

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ И ВОЛАТИЛЬНОСТЬ ЦЕН НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Вавилов А. П., Трофимов Г. Ю. ¹

Институт финансовых исследований, г. Москва

E-mail: g.trofimov@ifs.ru

В статье предлагается сравнительный анализ свойств обычных и сверхпроводящих энергосетей на основе теоретической модели рынка электроэнергии. Рассматривается конкурентный рынок электроэнергии, основанный на сетевом взаимодействии производителей и потребителей. В простейшем случае сеть включает два узла, соединенных одной линией электропередачи. Мы показываем, что использование технологии сверхпроводимости дает двоякий выигрыш благодаря возрастающей отдаче от масштаба. Во-первых, сверхпроводящая линия обеспечивает более высокий интегральный эффект по сравнению с обычной линией при больших объемах передачи энергии. Во-вторых, волатильность цен на электроэнергию оказывается более низкой для сверхпроводящей линии при достаточно большой допустимой мощности.

1. Введение

Явление сверхпроводимости было открыто более ста лет назад, однако лишь в последние годы мировая энергетика оказалась на пороге технологического прорыва, связанного с этим явлением. Благодаря исследованиям и разработкам в области высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) появились принципиально новые возможности повышения эффективности электроэнергетики. Данное направление технического прогресса совпало по времени с революционными сдвигами,

¹ Авторы признательны Поманскому А. Б. и Самойленкову С. В. за полезные замечания.

обусловленными переходом на возобновляемые источники энергии и развитием цифровых технологий. Все эти изменения уже оказывают очень существенное влияние на структуру энергетики и развитие рынка электроэнергии.

Одно из главных преимуществ линий электропередачи (ЛЭП) со сверхпроводимостью заключается в сокращении технологических потерь энергии. Они весьма ощутимы для России и составляют 11-12% от объемов генерации. Для стран Запада такие потери в среднем в 1,5-2 раза ниже, но они также имеют значение. Основной причиной технологических потерь в энергосетях является диссипация энергии из-за сопротивления в металлических проводах. Помимо этого, электроэнергия теряется при передаче в связи с преобразованием напряжения генерации в высоковольтное напряжение ЛЭП и обратно – в среднее и низкое напряжение распределительных сетей.

Для высокотемпературных сверхпроводящих линий потери энергии из-за сопротивления отсутствуют, и поэтому нет необходимости использовать трансформаторные подстанции для изменения напряжения. Линии со сверхпроводимостью могут обеспечивать гораздо более высокую максимальную нагрузку: ВТСП-кабель способен передавать на порядок большую мощность, чем медный кабель при таком же напряжении. По этой причине сверхпроводящие линии являются намного более компактными по сравнению с обычными воздушными и кабельными ЛЭП аналогичной мощности, что в будущем может дать значительную экономию земельных ресурсов. Для прокладки высоковольтной воздушной ЛЭП требуется отведение прилегающей территории шириной более 200 метров, что практически невозможно в условиях плотной городской застройки. Однако использование сверхпроводящих кабельных линий позволяет гибко наращивать мощности энергообеспечения по мере развития жилых районов. Немаловажно, что для таких линий отсутствует электромагнитное излучение в окружающее пространство, наносящее вред здоровью людей. Кроме того, применение ВТСП-оборудования, в первую очередь ограничителей тока короткого замыкания, позволяет повысить надежность, безопасность и качество электроснабжения населения (см. Бокс).

Бокс: ВТСП-технологии

Низкотемпературная сверхпроводимость применяется уже в течение нескольких десятилетий в некоторых областях науки и техники (например, в магниторезонансных томографах и ускорителях частиц). При этом для поддержания температур близких к абсолютному нулю в качестве криогена используется жидкий гелий. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости в 1986 г. привело к появлению сверхпроводящих материалов с критической температурой (при которой теряется свойство сверхпроводимости) выше точки кипения жидкого азота -196°C . Это позволило заменить дорогой гелий дешевым жидким азотом и снизить на порядок затраты на поддержание свойства сверхпроводимости. Разработки ВТСП-лент второго поколения, выполняющих функцию проводника тока, находят применение в широком диапазоне областей (железнодорожный транспорт, самолетостроение, атомная энергетика, медицинское оборудование, металлургия и др.), открывая, в частности, коммерческие перспективы для развития энергосетей на основе сверхпроводимости.

Начиная с 2006 г. в некоторых странах (США, Германия, Россия, Китай, Южная Корея, Япония) реализуются пилотные проекты по строительству сверхпроводящих линий электропередачи. Пока они применяются в основном в системах распределения электроэнергии внутри крупных городов. В Санкт-Петербурге в 2020 г. планируется ввести в строй сверхпроводящую линию постоянного тока длиной 2,5 км, самую большую в мире по протяженности и с передаваемой мощностью 50 МВт, которая должна соединить две городские подстанции. В Москве запланирована прокладка ВТСП-кабеля в районе Сколково, – а сейчас уже начал действовать ВТСП-ограничитель тока на подстанции Мневники. Анализ экономической эффективности по этим и другим проектам подтверждает, что использование сверхпроводимости не только повышает надежность и качество городских энергосетей, но и дает экономию капитальных затрат порядка 20%.

На наш взгляд, при том что практические выгоды от использования сверхпроводимости в энергетике воплощаются в реальность, основной потенциал ВТСП-технологий в этой сфере еще не начал реализовываться. Мы имеем в виду строительство новых магистральных ВТСП-линий большой мощности и протяженности. В основе эффективности таких крупномасштабных проектов лежит *принцип экономии от увеличения масштаба*. Данный принцип в случае сверхпроводящих линий действует по

той причине, что их функционирование требует непрерывных фиксированных затрат энергии на охлаждение провода, причем величина таких затрат практически не зависит от нагрузки на кабель. Основную роль здесь играют два фактора – отсутствие потерь энергии из-за сопротивления при передаче и возможность увеличения максимальной нагрузки на линию в разы по сравнению с обычными ЛЭП. В последнем же случае действует *принцип убывающей отдачи*, поскольку для обычных сетей потери энергии из-за сопротивления растут нелинейно с увеличением нагрузки и само это увеличение ограничено допустимыми физическими возможностями металлических проводов.

В статье (Thomas et al. 2016) рассматривались показатели сравнительной эффективности для магистральных высоковольтных линий, проектируемых для перспективного развития энергосистемы Германии. В частности, там сравнивались потери энергии из-за сопротивления для обычных линий с постоянным током и фиксированные затраты для сверхпроводящих линий. В той работе ключевую роль играло предположение о фиксированных затратах энергии на охлаждение ВТСП-кабеля, не зависящих от уровня нагрузки. Как показал количественный анализ, ВТСП-линии имеют преимущество при больших объемах передаваемой энергии, то есть при высокой максимально допустимой мощности линии порядка нескольких гигаватт и существенном уровне нагрузки на линию (более 25-32% при допустимой мощности 4 ГВт). Для выполнения данных условий требуется стабильная генерация энергии и устойчивый спрос, характерный для мегаполисов или крупных конгломератов.

В нашей статье предлагается сравнительный анализ свойств обычных и сверхпроводящих энергосетей на основе теоретических моделей рынка электроэнергии. Как будет показано, различие этих сетей проявляется не только и не столько в количественном сопоставлении потерь энергии, сколько в принципиальных особенностях технологий, основанных на возрастающей или убывающей отдаче от масштаба. Такие особенности отражаются в сравнительной эффективности сверхпроводящих и обычных энергосетей, а также в том влиянии, которое новые технологии могут оказать на функционирование рынка электроэнергии.

В исходной модели мы рассматриваем рынок электроэнергии, основанный на сетевом взаимодействии производителей и потребителей. В простейшем случае сеть включает два узла, соединенных одной линией. Задача централизованного управления энергосистемой заключается в выборе оптимальных объемов генерации и потоков электроэнергии. Целевой функцией задачи является интегральный экономический эффект, представленный суммой ренты потребителей и прибылей от генерации и поставки

электроэнергии. Заметим, что задача выбора оптимальных потоков в энергосети, вообще говоря, отличается от моделей торговых потоков или транспортной задачи из-за специфики генерации и передачи электроэнергии.

Для целей сравнительного анализа обычных и сверхпроводящих линий нам необходимо прежде всего дать адекватное формальное описание фактора сопротивления для линии электропередачи. Данному аспекту не уделялось должное внимание: в экономических моделях энергосетей обычно предполагается, что сопротивление незначительно и им можно пренебречь. Лишь в некоторых работах (например, Bohn et al. 1984, Chao, Peck 1996, Li 2015) рассматривались задачи управления энергосистемой с учетом потерь передаваемой электроэнергии из-за сопротивления. Для нас важно сопоставить обычные и сверхпроводящие линии, поэтому необходимо так или иначе учесть в модели фактор сопротивления для обычных линий.

Мы проводим сравнительный анализ для оптимального решения задачи управления энергосистемой, которое в теории реализуется с помощью рынка совершенной конкуренции. При этом не учитываются эффекты локальной монополии генератора или оператора сети, – это тема отдельного исследования. Наш анализ нацелен не столько на описание существующих реалий, сколько на выявление потенциальных возможностей новых технологий в идеальных условиях совершенного рынка.

С помощью простой статической модели мы показываем, как интегральный экономический эффект от генерации и поставки электроэнергии формируется и распределяется между участниками сетевого взаимодействия. Это происходит по-разному для обычной и сверхпроводящей ЛЭП, поскольку в первом случае убывающая отдача приносит рентный доход владельцу линии, тогда как во втором случае такая возможность отсутствует, что дает выигрыш потребителям. Мы демонстрируем, что сравнение интегральных эффектов для рассматриваемых технологий передачи электроэнергии сводится к сопоставлению удельных потерь энергии из-за сопротивления и удельных фиксированных затрат на обеспечение сверхпроводимости. Данное сопоставление показывает, что сверхпроводящая линия имеет преимущество перед обычной при больших объемах передачи энергии.

Влияние принципиально новой технологии на рынок электроэнергии должно проявиться в изменении волатильности рыночных цен. Спрос на данном рынке зависит от множества случайных факторов. Кроме того, генерация ветровой и солнечной энергии также является случайным процессом. При этом особенностью электроэнергетики

является отсутствие возможностей создавать материальные запасы для смягчения колебаний спроса и предложения (за исключением гидроэнергетики). К настоящему времени разработаны и испытаны опытные образцы ВТСП-накопителей энергии, но широкомасштабное применение такой техники – дело будущего. Поэтому колебания спроса отражаются непосредственно и существенным образом на колебаниях рыночных цен на электроэнергию.

Мы показываем, что сверхпроводящие сети обеспечивают более низкую волатильность цен при достаточной допустимой мощности ВТСП-линий. В нашей модели это происходит благодаря более гибкой реакции предложения на случайные изменения спроса в условиях сверхпроводимости. Данный эффект проявляется сильнее в сложных сетях с числом узлов больше двух, в которых играют роль системные факторы и положительная корреляция случайных колебаний спроса на локальных рынках.

В заключении мы рассматриваем возможности сверхпроводящей линии в качестве интерконнектора, то есть магистрального энергомоста, соединяющего локальные рынки. Как будет показано, сверхпроводящая линия обеспечивает эффективное взаимное страхование потребителей от изменений случайных факторов на стороне спроса. При этом благодаря интеграции локальных рынков на основе ВТСП-линий происходит снижение волатильности цен на электроэнергию.

2. Модель оптимальной генерации и передачи электроэнергии

Рассмотрим простейший случай энергосети с двумя узлами и одной линией, представленной на рис. 1. Электроэнергия генерируется производителями и продается в узле 0, затем передается по обычной (не сверхпроводящей) линии в узел 1, где покупается конечными потребителями. Линия в данном случае является предельно упрощенным представлением энергосети. Модели с двухузловой энергосетью рассматривались в ряде работ по экономике электроэнергетики, например, в статье (Jarrow, Tirole 2001). В этих работах, как и в нашей статье, под узлом понимается локальный рынок электроэнергии, тогда как в электротехнике узел определяется как место соединения трех и более ветвей электрической цепи (Данилов 2013, с.32).

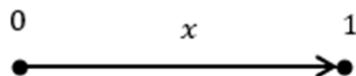


Рис. 1. Энергосеть с двумя узлами

Производимая электроэнергия передается для потребления в объеме x и частично теряется из-за сопротивления в проводах и выделения тепловой энергии. Мы предполагаем, что потери энергии являются функцией от объема передачи $l(x)$. Таким образом, величина генерации равна сумме передаваемой энергии и сетевых потерь, $x + l(x)$.

Рассмотрим вначале модель централизованного управления энергосистемой в виде задачи максимизации интегрального экономического эффекта производства, передачи и потребления электроэнергии:

$$\mathcal{E} = \max_x [u(x) - c(x + l(x))] \quad (1)$$

с учетом ограничения на допустимую мощность линии

$$x \leq \bar{x}. \quad (2)$$

Целевая функция (1) представляет собой полезность энергопотребления $u(x)$ в стоимостном выражении за вычетом затрат на генерацию $c(x + l(x))$, где $c = const$ обозначает предельные затраты генерации. Функция полезности $u(x)$ является возрастающей и вогнутой, а функция потерь $l(x)$ – возрастающей и выпуклой. Ограничение (2) отражает максимально допустимую нагрузку на линию \bar{x} , которая определяется, например, предельным уровнем повышения температуры провода.

При определенных условиях (см. Vohn et al. 1984, p. 374) потери при передаче электроэнергии могут быть представлены квадратичной функцией от объема передаваемой энергии:

$$l(x) = Rx^2 \quad (3)$$

где R – величина сопротивления линии. Заметим, что в теоретических и прикладных экономических моделях нередко используется предположение о квадратичной функции потерь или производственных издержек. Данное предположение, как правило, принимается ради удобства анализа, так как обеспечивает линейный вид функций

предложения. В нашей же модели квадратичная функция потерь (3) вытекает из физических соотношений: её вывод можно найти в упомянутой статье Vohn et al. (1984, p. 374).

С учетом (3) функция Лагранжа для оптимизационной задачи (1)-(2) имеет вид:

$$L = u(x) - c(x + Rx^2) - \mu(x - \bar{x}), \quad (4)$$

где μ – это множитель Лагранжа для ограничения (2), который удовлетворяет условиям дополняющей нежесткости:

$$\mu = 0, \text{ если } x < \bar{x}$$

$$\mu \geq 0, \text{ если } x = \bar{x}.$$

Ниже мы рассмотрим каждый из этих двух случаев по отдельности и будем называть первый *режимом свободной линии*, а второй *режимом ограничения на линию*.

Дифференцируя функцию Лагранжа по x , получаем условие оптимальности первого порядка:

$$u'(x) = c + 2Rcx + \mu. \quad (5)$$

Предельная полезность энергопотребления должна равняться сумме предельных затрат генерации c , предельных потерь в сети $l'(x) = 2Rcx$ и оценки сетевого ограничения μ .

Ниже мы будем использовать линейно-квадратичную функцию полезности, которая применяется в исследованиях по экономике электроэнергетики:

$$u(x) = \alpha x - Bx^2 \quad (6)$$

где α – резервационная цена, соответствующая предельной полезности при нулевом потреблении, $\alpha = u'(0)$, B – параметр, отражающий снижение предельной полезности с увеличением потребления. Возможна иная интерпретация линейно-квадратичной полезности: αx – отдача от энергопотребления, Bx^2 – потери в стоимостном выражении из-за сопротивления в энергопотребляющем оборудовании. Для функции полезности (6) предполагается, что резервационная цена (или показатель отдачи от энергопотребления) превосходит предельные издержки генерации, $\alpha > c$.

2.1 Оптимум как конкурентное равновесие

Теоретически оптимальная программа производства и передачи электроэнергии может быть реализована через конкурентный рынок. Допустим, что электроэнергия продается в узле 1 по рыночной цене p , а представительный потребитель выбирает уровень потребления y , обеспечивающий максимум потребительской ренты:

$$\psi = \max_y [u(y) - py]. \quad (7)$$

Аналогично конкурентная сетевая компания максимизирует прибыль от передачи и реализации электроэнергии, учитывая потери:

$$\pi = \max_x [px - c(x + Rx^2)] \quad (8)$$

при ограничении (2). Сетевая компания покупает электроэнергию у конкурентных генераторов в узле 0 в объеме x по цене, равной предельным издержкам генерации c .

Равновесная цена вычисляется из условия первого порядка для задачи потребителя (7):

$$p = u'(y) \quad (9)$$

и баланса спроса и предложения на рынке электроэнергии:

$$y = x. \quad (10)$$

При этом из условия первого порядка для задачи сетевой компании (8) следует, что

$$p = c + 2cRx + \mu. \quad (11)$$

Таким образом, равновесная цена электроэнергии на конкурентном рынке обеспечивает выполнение условия оптимальности (5), то есть покрывает издержки генерации и передачи с учетом сетевого ограничения на мощность.

Из выражения для цены (11) получаем линейную функцию предложения энергии:

$$x = \frac{p - c - \mu}{2cR}. \quad (12)$$

Предложение пропорционально ценовому дифференциалу $p - c - \mu$ и обратно пропорционально стоимостным потерям из-за сопротивления cR . Цена электроэнергии в узле 1 равна p , тогда как $c + \mu$ – это полные предельные издержки производства и передачи энергии без учета потерь. Функции предложения энергии имеют более сложный вид для сетей с более чем двумя узлами, в чем мы сможем убедиться в дальнейшем.

2.2 Режим свободной линии

Предположим, что ограничение на допустимую передачу энергии (2) не является связывающим, то есть $x < \bar{x}$, откуда следует, что $\mu = 0$. На рис. 2 представлены выигрыши производителей и потребителей для этого случая. На горизонтальной оси отложены объемы предложения или спроса, на вертикальной – цены и предельные издержки. Линия sE соответствует предельным издержкам генерации и передачи электроэнергии, $s + 2cRx$. Функция обратного спроса, $p(y) = u'(y)$, изображена на рис. 2 в виде прямой линии αy_0 , которая соответствует линейно-квадратичной функции полезности (6):

$$p(y) = \alpha - 2By \quad (13)$$

Точка $y_0 = \alpha/2B$ на горизонтальной оси показывает спрос при нулевой цене.

Точка $E = (x^*, p^*)$ на рис.2 соответствует равновесному уровню генерации и цены на электроэнергию. Величина прямых потерь энергии в стоимостном выражении, $cl(x) = cR(x^*)^2$, представлена треугольником l . Кроме того, существуют так называемые безвозвратные потери, возникающие из-за снижения объемов генерации относительно потенциально возможного уровня и изображенные в виде треугольника EMN . Они аналогичны безвозвратным потерям, возникающим из-за различных искажений рынка (the deadweight losses).

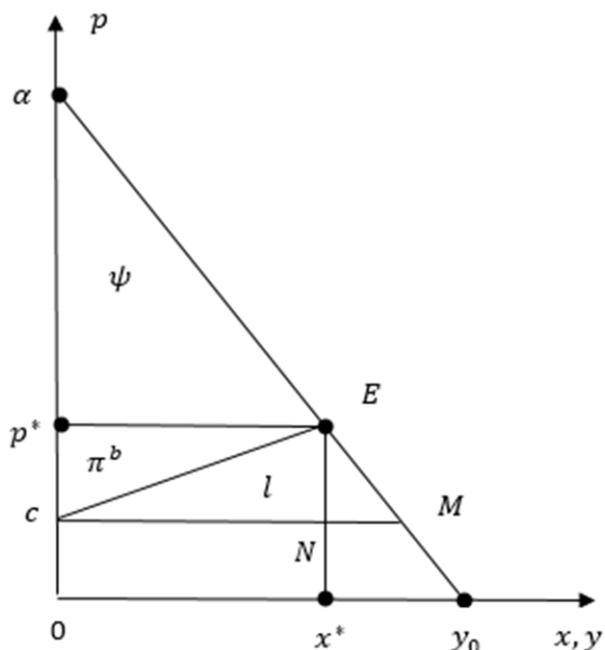


Рис.2. Выигрыши и потери в режиме свободной линии

Интегральный экономический эффект \mathcal{E} представлен на рис. 2 треугольником $\alpha E c$, который включает треугольник потребительской ренты ψ и треугольник π^b прибыли сетевой компании от реализации электроэнергии, $\pi = \pi^b$. По сути эта прибыль представляет собой ренту за пользование сетью, которую мы условимся называть *базовой рентой*. Она возникает благодаря потерям при передаче электроэнергии, что кажется на первый взгляд парадоксальным. Однако это всего лишь свойство рентного дохода, обусловленного убывающей отдачей (ренты Рикардо).

2.3 Режим ограничения на линию

Теперь рассмотрим случай, когда ограничение на допустимую нагрузку линии (2) является связывающим и оценка этого ограничения неотрицательна, $\mu \geq 0$. Тогда цена на электроэнергию устанавливается из условия

$$\bar{p} = u'(\bar{x}), \quad (14)$$

а оценка ограничения (2) находится из условия (11):

$$\mu = \bar{p} - c - 2cR\bar{x}. \quad (15)$$

При связывающем сетевом ограничении в дополнение к базовой ренте возникает доход, который мы будем называть *конгестионной рентой* (от англ. *congestion rent*). Данная рента вычисляется как произведение оценки сетевой нагрузки на величину передаваемой энергии $\pi^c = \mu \bar{x}$ и представляет собой вознаграждение за ограниченность мощности сети. Прибыль сетевой компании от реализации электроэнергии в режиме ограничения на линию является суммой базовой и конгестионной ренты $\pi = \pi^b + \pi^c$.

Рисунок 3 демонстрирует равновесное состояние $\bar{E} = (\bar{x}, \bar{p})$ и распределение доходов сторон в этом режиме, то есть при $\bar{x} < x^*$. Как и на предыдущем рисунке, αy_0 показывает линию обратного спроса. Линия sK изображает предельные издержки генерации и передачи электроэнергии $c + 2cRx$. Суммарный экономический эффект \mathcal{E} представлен четырехугольником $\alpha \bar{E} K c$, который включает потребительскую ренту, обозначенную треугольником ψ , базовую ренту в виде треугольника π^b , а также конгестионную ренту в виде прямоугольника π^c . Безвозвратным потерям соответствует треугольник $\bar{E} M N$, который заметно больше треугольника EMN на рис. 2. Увеличение безвозвратных потерь вызвано связывающим ограничением на величину генерации, поскольку $\bar{x} < x^*$.

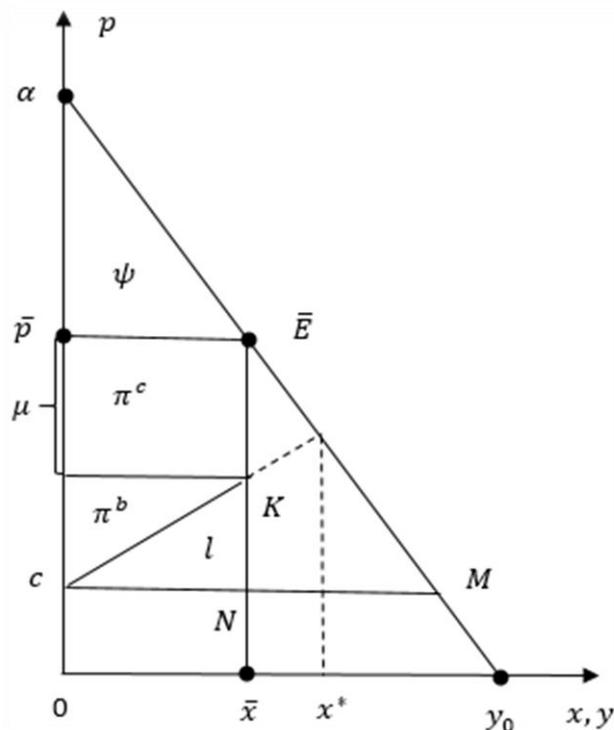


Рис. 3. Выигрыши и потери в режиме ограничения на линию

2.4 Решение для линейного спроса

Рассмотрим решение исходной задачи (1)-(2) для линейно-квадратичной функции полезности (6). В приложении А показано, что если ограничение сети (2) не является связывающим, то оптимальная цена рассчитывается как

$$p^* = \frac{cR}{cR + B} \alpha + \frac{B}{cR + B} c. \quad (16)$$

Она является комбинацией резервационной цены α и предельных издержек генерации c . Чем больше сопротивление линии, тем больше вес α и тем ближе цена электроэнергии к уровню резервационной цены.

Мы также показываем в приложении А, что оптимальное производство энергии в режиме свободной линии равно

$$x^* = \frac{\alpha - c}{2(cR + B)}. \quad (17)$$

Из рис. 2 видно, что прибыль равна стоимости потерь энергии (площади треугольников π^b и l одинаковы), то есть $\pi^b = cR(x^*)^2$. Нетрудно показать, что потребительская рента составляет $\psi = B(x^*)^2$, откуда получается суммарный экономический эффект:

$$\mathcal{E} = \pi^b + \psi = (cR + B)(x^*)^2. \quad (18)$$

Если же сетевое ограничение является связывающим, то предложение энергии равно \bar{x} , а оптимальная цена определяется как

$$\bar{p} = \alpha - 2B\bar{x}, \quad (19)$$

что следует из (14). Возвращаясь к рис. 3, можно показать, что потребительская рента равна $\psi = B\bar{x}^2$, базовая рента равна $\pi^b = cR\bar{x}^2$, а конгестивная рента с учетом (15), (19) равна $\pi^c = \mu\bar{x} = (\bar{p} - c - 2cR\bar{x})\bar{x} = (\alpha - c)\bar{x} - 2(cR + B)\bar{x}^2$, откуда следует:

$$\mathcal{E} = \psi + \pi^b + \pi^c = (\alpha - c)\bar{x} - (cR + B)\bar{x}^2. \quad (20)$$

Данная формула может быть получена непосредственно путем подстановки $x = \bar{x}$ в целевую функцию (1).

3. Модель линии со сверхпроводимостью

Рассмотрим передающую сеть с двумя узлами, изображенную на рис. 1, в условиях сверхпроводимости. В данном случае можно принять, что $R = 0$, то есть сопротивление равно нулю и отсутствуют потери от передачи электроэнергии, $l(x) \equiv 0$. Но при этом необходимы фиксированные затраты энергии F на обеспечение функционирования сверхпроводящей линии.

Задача максимизации интегрального экономического эффекта имеет вид:

$$\mathcal{E}_s = \max_x [u(x) - c(x + F)] \quad (21)$$

с учетом ограничения на нагрузку линии

$$x \leq \bar{x}_s, \quad (22)$$

где \bar{x}_s – максимально допустимая (критическая) мощность сверхпроводящей линии.

Индекс s используется здесь и ниже при обозначении оптимальных решений для задачи (21)- (22). Ограничение на нагрузку линии (22) аналогично условию (2) в исходной задаче, но имеет иную физическую природу. Если в обычном проводнике ограничение на нагрузку линии связано с допустимой величиной повышения температуры электропровода, то в сверхпроводнике такое ограничение определяется критическим уровнем передаваемого тока. Превышение этого уровня вызывает потерю сверхпроводимости.

3.1 Двухчастный тариф и конгестивная рента

Рассмотрим задачу производства и передачи энергии для сверхпроводимости (21)- (22) и запишем условие первого порядка аналогичное (5):

$$u'(x) = c + \mu_s,$$

где μ_s – оценка ограничения на нагрузку сверхпроводящей линии. В режиме свободной линии $\mu_s = 0$ и равновесная цена $p_s^* = u'(x_s^*)$ равна издержкам генерации:

$$p_s^* = c. \quad (23)$$

Однако такая цена не покрывает фиксированные затраты cF . Теоретически, чтобы обеспечить безубыточность производства при возрастающей отдаче от масштаба,

необходимо использовать двухчастный тариф (cF, c) , который включает фиксированный платеж и цену электроэнергии на уровне предельных издержек.

Рисунок 4а показывает состояние равновесия $E_s = (x_s^*, p_s^*)$ с двухчастным тарифом в условиях сверхпроводимости в режиме свободной линии. Объем генерации x_s^* соответствует значению цены на уровне предельных издержек, и для линейно-квадратичной полезности этот объем равен:

$$x_s^* = \frac{\alpha - c}{2B}, \quad (24)$$

что получается из (17) при $R = 0$. В таком случае базовая рента равна нулю, $\pi_s^b = 0$. Это значит, что фиксированная часть тарифа cF должна выплачиваться за счет части потребительской ренты, изображенной на рис. 4а в виде заштрихованного четырехугольника площадью cF .

Поскольку в условиях сверхпроводимости прямые потери энергии отсутствуют, а цена равняется предельным издержкам генерации, то отсутствуют также безвозвратные потери. Интегральный экономический эффект равен потребительской ренте за вычетом фиксированных затрат:

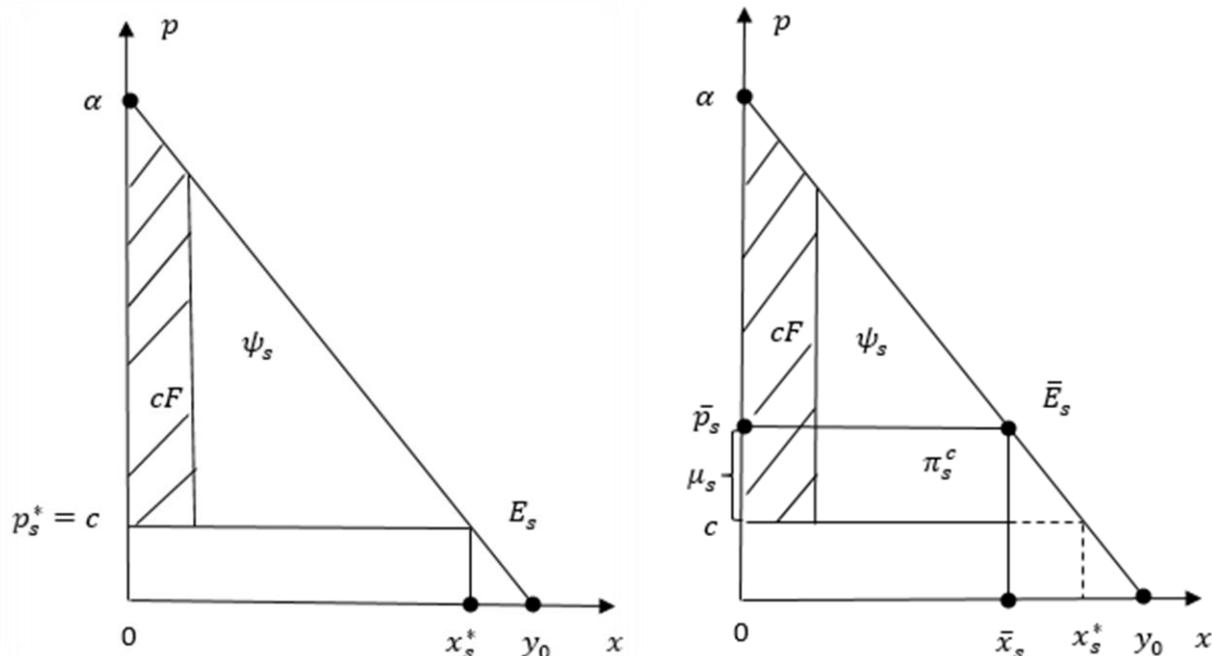
$$\mathcal{E}_s = \psi_s - cF = B(x_s^*)^2 - cF, \quad (25)$$

что следует из (18) при $\pi^b = 0$. Интегральный эффект является неотрицательным, если $B(x_s^*)^2 \geq cF$ или с учетом (24):

$$\alpha \geq c + 2(cFB)^{1/2}. \quad (26)$$

Иными словами, сверхпроводящая линия экономически эффективна, если фиксированные затраты cF не слишком велики.

Рис. 4а: Режим свободной линии Рис. 4б: Режим ограничения на линию



Если же ограничение на нагрузку линии (22) является связывающим и $\mu_s \geq 0$, то оптимальная цена равна

$$p_s = c + \mu_s . \quad (27)$$

При этом возникает конгестионная рента, изображенная прямоугольником π_s^c на рис. 4б, демонстрирующем состояние равновесия $\bar{E}_s = (\bar{x}_s, \bar{p}_s)$ в режиме ограничения на линию. В данном случае фиксированные сетевые расходы могут финансироваться сторонами совместно на контрактной основе как за счет ренты потребителя, так и за счет конгестионной ренты. Такую возможность иллюстрирует заштрихованный четырехугольник на рис. 4б.

Вопрос о финансировании фиксированных затрат имеет для нас в большей мере теоретическое значение. В реальности доля таких затрат может быть достаточно мала. Например, для проектируемых ВТСП-линий сверхвысокой мощности порядка 4-10 ГВт затраты энергии на поддержание системы охлаждения составляют не более 1-2% от объема передаваемой энергии. Это следует из расчетов, приведенных в упомянутой выше статье (Thomas et al. 2016). В данном случае, по всей видимости, отпадает практическая необходимость в использовании двухчастного тарифа на электроэнергию и тем более в софинансировании фиксированных затрат.

Для линейно-квадратичной полезности (6) равновесная цена в режиме ограничения на линию вычисляется аналогично (19):

$$\bar{p}_s = \alpha - 2B\bar{x}_s . \quad (28)$$

Так как в условиях сверхпроводимости базовая рента равна нулю, то прибыль от реализации электроэнергии совпадает с конгестионной рентой, $\pi_s = \pi_s^c$. Для линейно-квадратичной полезности потребительская рента равна $\psi_s = B\bar{x}_s^2$, а конгестионная рента выражается как $\pi_s^c = \mu_s \bar{x}_s = (\alpha - c)\bar{x}_s - 2B\bar{x}_s^2$, откуда получается интегральный экономический эффект:

$$\mathcal{E}_s = \psi_s + \pi_s^c - cF = (\alpha - c)\bar{x}_s - B\bar{x}_s^2 - cF . \quad (29)$$

Как и выше, это выражение можно проверить непосредственно путем подстановки $x = \bar{x}_s$ в целевую функцию (21).

3.2 Экономический эффект сверхпроводимости

Сравним показатели интегрального экономического эффекта для двух технологий передачи энергии. Речь идет о статических показателях эффекта, относящихся к текущим производственным результатам и не учитывающих инвестиции в создание линии. Однако приводимый ниже сравнительный анализ несложно дополнить, чтобы можно было сопоставлять приведенные стоимости проектов.

Сеть со сверхпроводимостью обеспечивает более высокий интегральный экономический эффект по сравнению с обычной сетью, если $\mathcal{E}_s > \mathcal{E}$. Для сверхпроводящей линии отсутствуют потери энергии $l(x)$, но требуются фиксированные затраты F на функционирование линии. Можно предположить, что для сравнения экономического эффекта достаточно соотнести потери в обычной линии и фиксированные затраты в сверхпроводящей. Однако следующее утверждение показывает, что это не совсем так.

Утверждение. (i) В режиме свободной линии сверхпроводимость обеспечивает более высокий экономический эффект, $\mathcal{E}_s > \mathcal{E}$, если

$$F < l(\tilde{x}^g) , \quad (30)$$

где $\tilde{x}^g = (x^* x_s^*)^{1/2}$ – среднее геометрическое нагрузки для обычной и сверхпроводящей линий. (ii) В режиме ограничения на линию условие $\mathcal{E}_s > \mathcal{E}$ выполнено, если

$$F < l(\bar{x}) + \Delta\bar{x} \cdot (p(\tilde{x}^a) - c)/c, \quad (31)$$

где $\Delta\bar{x} = \bar{x}_s - \bar{x}$ – разность допустимых нагрузок сверхпроводящей и обычной линий, $p(\tilde{x}^a)$ – цена для предложения энергии, равного среднему арифметическому допустимых нагрузок $\tilde{x}^a = (\bar{x}_s + \bar{x})/2$.

Доказательство данного утверждения приводится в приложении Б. Согласно условию (30) в режиме свободной линии фиксированные затраты на обеспечение сверхпроводимости должны быть меньше потерь энергии в обычной сети. Однако потери рассчитываются для усредненного уровня нагрузки \tilde{x}^g , так как сопоставление по отдельности для x^* или x_s^* было бы некорректным. Из условия (31) следует, что для сравнения экономического эффекта в режиме ограничения на линию нужно учитывать разницу допустимых мощностей $\Delta\bar{x}$. Лишь в том случае, если эти мощности равны, $\bar{x}_s = \bar{x}$, условие утверждения (31) сводится к неравенству:

$$F < l(\bar{x}).$$

В данном случае достаточно сопоставить фиксированные затраты и потери соответственно для сверхпроводящей и обычной линий, чтобы сравнить экономический эффект.

Неравенство для фиксированных затрат и потерь энергии в режиме свободной линии (30) можно переписать в виде неравенства для их удельных значений, рассматривая в явном виде квадратичную функцию потерь, $l(\tilde{x}^g) = R(\tilde{x}^g)^2 = Rx^*x_s^*$:

$$F/x_s^* < Rx^*. \quad (32)$$

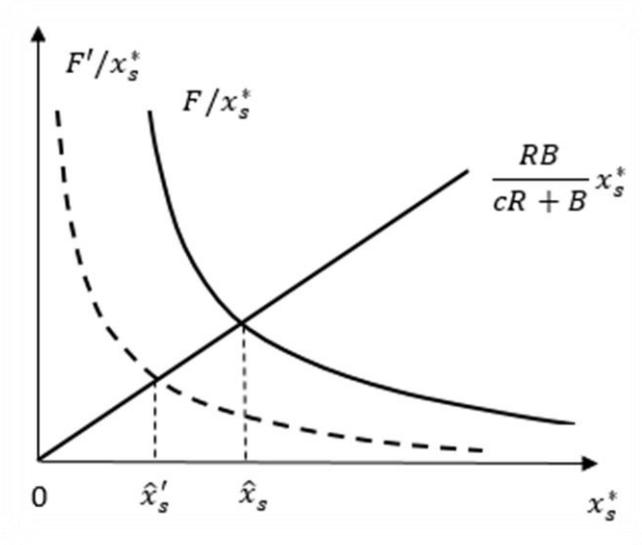
Это значит, что интегральный экономический эффект для сверхпроводящей линии больше, если фиксированные затраты в долях передаваемой энергии меньше потерь.

На рис. 5 неравенство (32) отображено графически с учетом того, что оптимальные нагрузки на обычную и сверхпроводящую линии соотносятся как

$$x^* = \frac{B}{cR + B} x_s^*,$$

что следует из (17), (24). На горизонтальной оси рис. 5 отложены значения x_s^* и выделен пороговый уровень нагрузки на линию \hat{x}_s . Для нагрузок выше этого уровня выполнено условие (32), то есть экономический эффект для сверхпроводящей линии больше, чем для обычной.

Рис. 5: Удельные потери и фиксированные затраты энергии



Следует отметить, что аналогичный график приведен на основе содержательных соображений в статье (Thomas et al. 2016, с. 387). Там сравнивались проекты магистральных сверхпроводящих и обычных линий с постоянным током для Германии. На графике в качестве аргумента рассматривался показатель относительного уровня нагрузки на линию, то есть в терминах нашей модели, отношение x_s^*/\bar{x}_s . Пороговый уровень нагрузки в статье (Thomas et al. 2016, с. 386) составляет 25% при допустимой мощности линии 4 ГВт. Такой оценке на нашем рис. 5 соответствует величина пороговой нагрузки $\hat{x}_s = 1$ ГВт, выше которой экономический эффект для сверхпроводящей линии должен быть больше чем для обычной.

3.3 Фактор расстояния

Из полученных нами результатов следует, что для анализа сравнительной эффективности сверхпроводимости необходимо корректное сопоставление фиксированных затрат, обеспечивающих сверхпроводимость, и потерь энергии из-за сопротивления. Эти величины в реальности зависят от физических свойств проводников и протяженности линий. Теоретически сопротивление для обычного провода прямо пропорционально длине линии d :

$$R = (\rho/z)d, \quad (33)$$

где ρ – удельное сопротивление, z – площадь поперечного сечения провода. Для сверхпроводящего кабеля величина фиксированных затрат энергии F пропорциональна расстоянию, поскольку требуется равномерная подпитка энергией криогенных мощностей по всей длине линии:

$$F = \varphi d ,$$

где φ обозначает энергозатраты на единицу длины. Энергия также должна расходоваться на поддержание давления для циркуляции криогена внутри ВТСП-кабеля. Это ограничивает длину сегментов кабеля между промежуточными охлаждающими/качающими станциями, обеспечивающими работу линии большой протяженности и требующими затрат энергии (Romashov et al. 2014).

Развитие технологий криосистем для таких линий должно привести в терминах нашей модели к снижению параметра φ , тогда как возможности снижения параметра R в основном уже реализованы. Уменьшение параметра φ означает сокращение фиксированных затрат до уровня $F' < F$, как показано на рис. 5, и, как следствие, снижение пороговой нагрузки для сверхпроводящей линии до величины \hat{x}'_s .

4. Стохастический спрос и волатильность цены электроэнергии

Рыночные цены на электроэнергию подвержены регулярным и случайным колебаниям, в первую очередь из-за факторов на стороне спроса. Рассмотрим особенности технологий передачи энергии в условиях стохастического спроса. Предположим, что резервационная цена α является случайной величиной с функцией распределения $\Phi(\alpha)$, имеющей конечную дисперсию и положительную плотность на интервале $(\alpha_{min}, \alpha_{max})$, где $\alpha_{max} \leq \infty$, $\alpha_{min} \geq c + 2(cBF)^{1/2}$. При минимально возможном уровне резервационной цены α_{min} линия со сверхпроводимостью является экономически эффективной, согласно условию (26). Нас интересует вопрос о влиянии случайных изменений параметра α на цену электроэнергии. При этом задача сети (1)-(2) или (21)-(22) решается для различных значений α , и рассматриваются зависимости оптимальной цены от данного параметра.

Эта цена имеет кусочно-линейный вид из-за ограничения на допустимую нагрузку линии в виде неравенства (2) в первой модели и (22) во второй. Оценки данных ограничений для линейного спроса можно представить следующим образом:

$$\mu = 2(Rc + B)\max[0, (x^* - \bar{x})] \quad (34)$$

$$\mu_s = 2B\max[0, (x_s^* - \bar{x}_s)], \quad (35)$$

что вытекает из соотношений (15), (17), (19) и (24), (27), (28) соответственно. Иначе говоря, оценка в режиме ограничения пропорциональна разрыву генерации: $x^* - \bar{x}$ или $x_s^* - \bar{x}_s$. Как можно видеть из рис. 3 или 4б, расширение данного разрыва ведет к увеличению оценки μ или μ_s .

Из выражений для оценок ограничений (34), (35) и полученных выше равновесных решений для цены (16), (19) и (23), (28) следуют кусочно-линейные зависимости цены электроэнергии от случайного параметра α :

$$P(\alpha) = \max[\theta\alpha + (1 - \theta)c, \alpha - 2B\bar{x}] \quad (36)$$

для обычной линии, где

$$\theta = \frac{cR}{cR + B}$$

и

$$P_s(\alpha) = \max[c, \alpha - 2B\bar{x}_s] \quad (37)$$

для сверхпроводящей линии (мы используем заглавные буквы для обозначения функций цены от α , чтобы отличать их от функции обратного спроса $p(y)$). Функции цены $P(\alpha)$, $P_s(\alpha)$ показаны на рис. 6. Пороговые значения резервационной цены $\bar{\alpha} = c + 2(cR + B)\bar{x}$ и $\bar{\alpha}_s = c + 2B\bar{x}_s$ соответствуют переключению режимов.

Чтобы сравнить дисперсии цен электроэнергии для обычной и сверхпроводящей сетей $P(\alpha)$ и $P_s(\alpha)$, рассмотрим эти функции при различных значениях допустимой мощности сверхпроводящей линии \bar{x}_s , которым соответствуют различные значения пороговой резервационной цены $\bar{\alpha}_s$. На рис. 7 (а, б) представлены два случая: в первом (7а) пороговое значение резервационной цены для сверхпроводящей линии равно минимально возможному значению этой цены, то есть $\bar{\alpha}_s = \alpha_{min}$ и во втором (7б), пороговые значения для сверхпроводящей и обычной линии совпадают, $\bar{\alpha}_s = \bar{\alpha}$.

Рис. 6: Функции цен $P(\alpha)$ и $P_s(\alpha)$

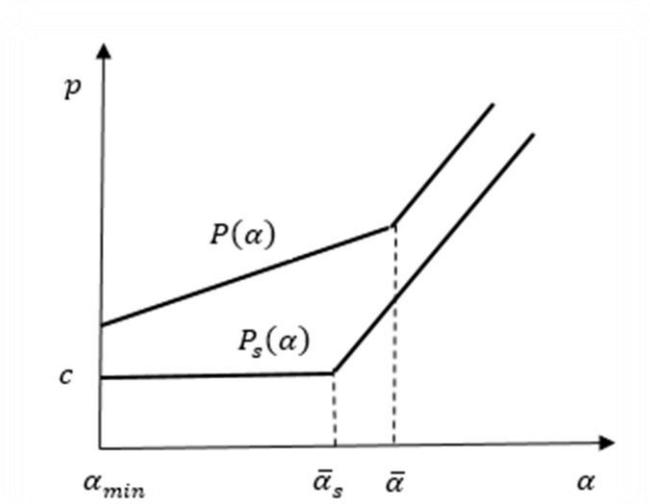
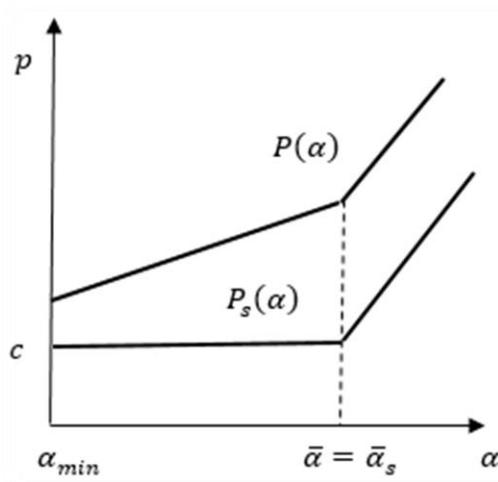
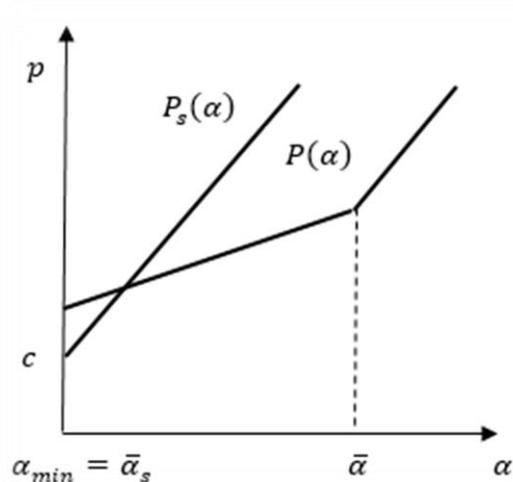


Рис. 7а: Функции $P(\alpha)$, $P_s(\alpha)$ для $\bar{\alpha}_s = \alpha_{min}$ Рис. 7б: Функции $P(\alpha)$, $P_s(\alpha)$ для $\bar{\alpha}_s = \bar{\alpha}$



В первом случае для $\bar{\alpha}_s = \alpha_{min}$ дисперсия цены для сверхпроводящей линии больше:

$$VarP_s(\alpha) > VarP(\alpha), \quad (38)$$

поскольку, как можно видеть из рис. 7а, условная дисперсия цены для этой линии больше на интервале $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}$: $Var(P_s(\alpha)|\alpha_{min} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}) > Var(P(\alpha)|\alpha_{min} \leq \alpha \leq \bar{\alpha})$, а на интервале $\bar{\alpha} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$ условные дисперсии цен одинаковы:

$Var(P_s(\alpha)|\bar{\alpha} \leq \alpha \leq \alpha_{max}) = Var(P(\alpha)|\bar{\alpha} \leq \alpha \leq \alpha_{max})$. Аналогично с помощью рис. 7б

демонстрируется, что во втором случае для $\bar{\alpha}_s = \bar{\alpha}$ дисперсия цены сверхпроводящей линии меньше:

$$VarP_s(\alpha) < VarP(\alpha). \quad (39)$$

Таким же образом можно показать, что неравенство для дисперсий (39) выполняется при $\bar{\alpha}_s \geq \bar{\alpha}$. Это имеет место, если допустимая мощность для сверхпроводящей линии \bar{x}_s достаточно велика. В общем случае дисперсия цены сверхпроводящей линии уменьшается с увеличением порогового значения $\bar{\alpha}_s$: $\partial VarP_s(\alpha) / \partial \bar{\alpha}_s \leq 0$. Действительно, эта дисперсия выражается как произведение: $VarP_s(\alpha) = (1 - \Phi(\bar{\alpha}_s))Var(P_s(\alpha) | \bar{\alpha}_s \leq \alpha \leq \alpha_{max})$, что следует из (37), и при этом оба сомножителя убывают по $\bar{\alpha}_s$.

Таким образом, при малых значениях пороговой резервационной цены $\bar{\alpha}_s$, соответствующих малым значениям допустимой мощности \bar{x}_s , дисперсия цены для сверхпроводящей линии больше, чем для обычной, то есть выполнено неравенство (38). Напротив, при больших значениях $\bar{\alpha}_s$, соответствующих большим значениям \bar{x}_s , дисперсии удовлетворяют неравенству (39). Иначе говоря, существует некоторое критическое значение допустимой мощности \bar{x}_s , при котором неравенство для дисперсий цены меняет знак.

Итак, мы показали, что при достаточно большом значении допустимой мощности сверхпроводящая линия обеспечивает более низкую волатильность цены электроэнергии (выраженную дисперсией цены). Это свойство объясняется тем, что эластичность предложения для сверхпроводящей линии выше, чем для обычной. Дело в том, что при достаточной допустимой мощности такой линии спрос с высокой вероятностью удовлетворяется при цене, равной издержкам генерации $p_s^* = c$ (в режиме свободной линии). В таком случае функция предложения энергии представляет собой вертикальную прямую. Для обычной сети функция предложения в свободном режиме является наклонной прямой (12), то есть эластичность предложения здесь ниже, чем при сверхпроводимости. Благодаря такому различию сверхпроводящая линия позволяет в большей степени абсорбировать случайные флуктуации спроса (при достаточно большой допустимой мощности), что влечет более низкую ценовую волатильность.

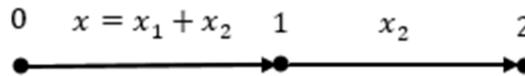
В рамках статической постановки задачи дисперсию цен можно понимать как статистическую характеристику для независимых реализаций случайной величины α . Заметим, что рассмотренную статическую модель несложно представить в динамическом

виде. С содержательной стороны переход к динамике упрощается тем, что в производстве электроэнергии не используются запасы готовой продукции и тем, что (с некоторыми оговорками) можно не принимать во внимание динамику производственных мощностей – ввод и выбытие электростанций или линий электропередачи. При этом необходимо иметь в виду, что в динамической версии модели следует учитывать серийную корреляцию параметра спроса α .

5. Системные эффекты сети и волатильность цен

До сих пор мы анализировали простейшую модель сети с двумя узлами. Представляют интерес системные взаимосвязи, которые могут проявиться в рамках более сложной сети. На рис. 8 представлена сеть с тремя узлами, соединенными последовательно с помощью двух линий. В узле с индексом 0 происходит генерация электроэнергии, а в узлах с индексами 1 и 2 – потребление. Энергия передается в количестве x_1 в узел 1 и в количестве x_2 в узел 2. Узел 1 является транзитным, так как через линию 1 передается $x = x_1 + x_2$, а через линию 2 – только x_2 .

Рис. 8: Энергосеть с тремя узлами и последовательными линиями



Рассмотрим для данной сети задачу максимизации интегрального экономического эффекта, аналогичную задаче (1), (2) для сети с обычной проводимостью:

$$\mathcal{E} = \max_{x, x_1, x_2} [u_1(x_1) + u_2(x_2) - c(x + l_1(x) + l_2(x_2))] \quad (40)$$

с учетом ограничений на передачу энергии и уравнения баланса:

$$x_1 + x_2 \leq \bar{x}^{(1)}, \quad (41)$$

$$x_2 \leq \bar{x}^{(2)}, \quad (42)$$

$$x_1 + x_2 = x. \quad (43)$$

Целевая функция (40) представляет собой сумму полезностей энергопотребления $u_1(x_1)$ и $u_2(x_2)$ за вычетом суммарных затрат на генерацию, где $l_1(x)$ и $l_2(x_2)$ обозначают потери

энергии для линий 1 и 2 соответственно. Функции потерь являются квадратичными: $l_1(x) = R_1 x^2$, $l_2(x_2) = R_2 x_2^2$, где R_1 и R_2 – это сопротивления на линиях 1 и 2. Как и выше, ограничения (41), (42) на объем передаваемой энергии учитывают максимально допустимую нагрузку $\bar{x}^{(1)}$ для линии 1 и $\bar{x}^{(2)}$ для линии 2. Ограничение (43) отражает баланс распределения передаваемой энергии между потребителями в узлах 1 и 2.

В модели с тремя узлами цены на локальных рынках дифференцированы и удовлетворяют условиям оптимального потребления:

$$p_j = u'_j(x_j), \quad j = 1, 2.$$

Рассмотрим режим свободных линий, при котором ограничения на допустимую передачу энергии (41), (42) не являются связывающими для обеих линий, то есть $x < \bar{x}^{(1)}$ и $x_2 < \bar{x}^{(2)}$. Из условий оптимальности первого порядка аналогичных (11), следует, что

$$p_1 = c + 2cR_1(x_1 + x_2), \quad (44)$$

$$p_2 = c + 2cR_1(x_1 + x_2) + 2cR_2x_2. \quad (45)$$

Оптимальные узловые цены обеспечивают покрытие предельных издержек генерации и передачи электроэнергии. Согласно формуле (45) для цены в конечном узле 2 предельные издержки передачи энергии включают сумму потерь из-за сопротивления на последовательных линиях 1 и 2.

Решая линейную систему (44), (45) для x_1 , x_2 , получаем функции предложения энергии по узлам:

$$x_1 = \frac{p_1 - c}{2cR_1} - \frac{p_2 - p_1}{2cR_2}, \quad (46)$$

$$x_2 = \frac{p_2 - p_1}{2cR_2}. \quad (47)$$

Это решение имеет прозрачный экономический смысл. Поставка x_1 для транзитного узла 1 формируется как разность суммарного предложения $x = (p_1 - c)/2cR_1$ и предложения x_2 для конечного узла 2. Обе функции предложения аналогичны функции (12) для двухузловой модели (в режиме свободной линии), в том смысле, что объемы передаваемой энергии пропорциональны ценовым дифференциалам: $(p_1 - c)$ для суммарного предложения и $(p_2 - p_1)$ для поставки узлу 2.

Решение для узловых цен рассмотрим для функций линейного обратного спроса, аналогичных (13):

$$p_j = \alpha_j - 2B_j y_j, \quad j = 1, 2. \quad (48)$$

С учетом линейных функций предложения (46), (47) и условий равновесия спроса и предложения в узлах 1 и 2:

$$y_j = x_j, \quad j = 1, 2, \quad (49)$$

получаем решения для равновесных цен, которые являются оптимальными (мы показываем это в Приложении В):

$$p_1^* = \phi_0 c + \phi_1 \alpha_1 + \phi_2 \alpha_2, \quad (50)$$

$$p_2^* = \theta \alpha_2 + (1 - \theta) p_1^*, \quad (51)$$

где

$$\theta = \frac{cR_2}{cR_2 + B_2},$$

$$\phi_0 = \frac{B_1}{cR_1 + B_1 + \theta B_1(R_1/R_2)}, \quad \phi_1 = \frac{cR_1}{cR_1 + B_1 + \theta B_1(R_1/R_2)}, \quad \phi_2 = 1 - \phi_0 - \phi_1.$$

Таким образом, оптимальные узловые цены представляют собой комбинации предельных издержек генерации c и резервационных цен α_1, α_2 . Решение для p_2^* в виде (51) аналогично оптимальной цене для двухузловой модели (16); разница лишь в том, что издержки генерации c заменены на узловую цену p_1^* .

Предположим, как и выше, что источником случайных возмущений равновесных цен электроэнергии являются колебания спроса, вызванные флуктуациями резервационных цен α_1, α_2 . Рассмотрим двумерную случайную величину (α_1, α_2) , заданную функцией распределения $\Phi(\alpha_1, \alpha_2)$ с моментами второго порядка σ_1^2, σ_2^2 и $\sigma_{12} > 0$, то есть α_1 и α_2 положительно коррелированы. Предположим, ради упрощения рассуждений, что область положительных значений плотности $\Phi(\alpha_1, \alpha_2)$ представляет собой ограниченное множество, такое, что с вероятностью 1 реализуется режим свободной линии. Иными словами, допустим, что ограничения на линию (41), (42) не являются связывающими при любых возможных реализациях α_1 и α_2 . Тогда на основе выражений (50), (51) можно выписать дисперсии цен:

$$\text{Var } p_1^* = \phi_1^2 \sigma_1^2 + \phi_2^2 \sigma_2^2 + 2\phi_1 \phi_2 \sigma_{12},$$

$$\text{Var } p_2^* = \theta^2 \sigma_2^2 + (1 - \theta)^2 \text{Var } p_1^* + 2\theta(1 - \theta) \text{Cov}(\alpha_2, p_1^*).$$

Дисперсии цен положительно зависят от моментов второго порядка, относящихся к обоим узлам. Перекрестные эффекты усиливают волатильность цен благодаря положительной корреляции резервационных цен α_1 , α_2 и взаимодействию потоков энергии в сети с тремя узлами. Например, согласно выражению (51), цена p_2^* линейно зависит от цены p_1^* и резервационной цены α_2 . Поэтому дисперсия p_2^* линейно зависит от дисперсии p_1^* и ковариации p_1^* и α_2 , которая положительна благодаря (50). Для оптимальной цены в модели с двумя узлами (16) подобный эффект невозможен в принципе.

Модель со сверхпроводимостью для трехузловой сети, изображенной на рис. 8, получается, если положить $R_j = 0$ и $l_j(x_j) \equiv 0$ для $j = 1, 2$ и ввести в целевую функцию (40) фиксированные затраты. Оптимальные узловые цены в условиях сверхпроводимости равны предельным издержкам генерации (для режима свободных линий):

$$p_{1s}^* = p_{2s}^* = c,$$

что следует из (44), (45). В данном случае перекрестное влияние случайных факторов отсутствует, а значит, устраняется системный эффект усиления ценовой волатильности.

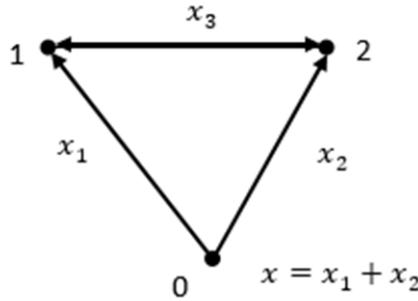
При этом даже частичный переход к сверхпроводящим линиям может дать системный эффект снижения волатильности (в рамках рассматриваемой здесь модели). Если, например, предположить, что линия 1 является сверхпроводящей, а линия 2 обычной, то оптимальная цена (51) для узла 2 получается такой же, как в модели с двумя узлами (16): $p_2^* = \theta\alpha_2 + (1 - \theta)p_{1s}^* = \theta\alpha_2 + (1 - \theta)c$, то есть отсутствует перекрестный эффект ценовой волатильности.

6. Сверхпроводящий интерконнектор и взаимное страхование

Свойство сверхпроводимости может быть использовано для эффективного перераспределения рисков в энергосети. В качестве иллюстрации рассмотрим сеть с тремя узлами, соединенными в виде треугольника, как показано на рис. 9. В узле 0 происходит генерация электроэнергии за вычетом потерь в объеме x . Энергия передается в количестве x_1 по линии 1 в узел 1 и в количестве x_2 по линии 2 в узел 2. Линии 1 и 2 являются обычными и передают энергию с потерями из-за сопротивления. Линия 3 представляет собой сверхпроводящий интерконнектор, соединяющий узлы 1 и 2 и передающий энергию в объеме x_3 из одного узла в другой, причем величина x_3 может быть отрицательной. Условимся считать, что $x_3 \geq 0$, если энергия передается из узла 1 в 2, и

$x_3 < 0$ в противном случае. Таким образом, энергопотребление составляет $y_1 = x_1 - x_3$ в узле 1 и $y_2 = x_2 + x_3$ в узле 2.

Рис. 9: Энергосеть с тремя узлами и интерконнектором



Задача оптимизации для данной сети несколько отличается от рассмотренной в предыдущем разделе:

$$\mathcal{E} = \max_{x, x_1, x_2, x_3} [u_1(x_1 - x_3) + u_2(x_2 + x_3) - c(x + l_1(x_1) + l_2(x_2) + F_3)] \quad (52)$$

при ограничениях:

$$x_j \leq \bar{x}^{(j)}, \quad j = 1, 2, \quad (53)$$

$$|x_3| \leq \bar{x}^{(3)}, \quad (54)$$

$$x_1 + x_2 = x. \quad (55)$$

В целевую функцию (52) включены суммарные издержки производства энергии, включая потери для обычных линий 1 и 2 и фиксированные затраты энергии F_3 для сверхпроводящей линии 3. Ограничения на допустимый объем передачи (53) для линий 1 и 2 аналогичны (42). Знак модуля для линии 3 в условии (54) означает, что допустимая мощность $\bar{x}^{(3)}$ ограничивает передачу энергии в обе стороны.

Рассмотрим вначале режим свободных линий, когда все ограничения в виде неравенств (53), (54) являются несвязывающими. Условие первого порядка для сверхпроводящего интерконнектора имеет вид:

$$u'_1(x_1 - x_3) = u'_2(x_2 + x_3). \quad (56)$$

Это условие означает интеграцию узлов 1 и 2 в общий рынок с единой ценой:

$$p = u'_1(x_1 - x_3) = u'_2(x_2 + x_3). \quad (57)$$

Условия первого порядка для узла 0 (линий 1 и 2) аналогичны (44), (45):

$$p = c + 2cR_j x_j, \quad j = 1, 2. \quad (58)$$

Отсюда следует, что установление единой цены влечет выравнивание структуры потерь электроэнергии между линиями 1 и 2, что, в свою очередь, определяет структуру поставок:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Рассмотрим линейные функции обратного спроса (48) и будем считать, что $B_1 = B_2 = B$, а резервационные цены α_1, α_2 являются случайными величинами с функцией распределения $\Phi(\alpha_1, \alpha_2)$. Из условий (57) и (58) получаем (см. Приложение Г):

$$p^* = \theta \tilde{\alpha} + (1 - \theta)c, \quad (59)$$

$$x_3^* = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{4B} + \frac{R_2 - R_1}{4cR_1R_2}(p - c), \quad (60)$$

где

$$\tilde{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}, \quad \theta = \frac{cR}{cR + B}, \quad R = \frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2}.$$

Оптимальная цена (59) определяется аналогично выражению (16) для двухузловой сети: $\tilde{\alpha}$ – это среднее арифметическое α_1 и α_2 , θ – весовой коэффициент для $\tilde{\alpha}$, R – эквивалентное сопротивление для параллельных линий 1 и 2.

Оптимальная передача энергии по интерконнектору (60) происходит из узла 1 в 2 при $x_3 > 0$, если $\alpha_2 > \alpha_1$ и $R_2 > R_1$, то есть резервационная цена выше в узле 2, чем в 1, и сопротивление больше для линии 2 чем для 1. Последнее означает, что согласно формуле (33), при прочих равных длина линии 2 больше, чем длина линии 1. В таком случае маршрут из узла 0 в 1 и 2 имеет абсолютное преимущество в смысле разрыва обратного спроса $\alpha_2 - \alpha_1 > 0$ и различия в расстояниях $R_2 > R_1$. Однако, как следует из (60), направление передачи по интерконнектору определяется из сравнительного, а не абсолютного преимущества линии. Если, например, $R_2 < R_1$ и удельная прибыль $(p - c)$ достаточно велика, то $x_3 < 0$, то есть передача происходит в обратном направлении – из 0 в 2 и 1, даже если разрыв обратного спроса по-прежнему в пользу узла 2, $\alpha_2 > \alpha_1$.

Интерконнектор обеспечивает взаимное страхование энергопотребления при колебаниях факторов на стороне спроса. Это происходит благодаря выравниванию предельных полезностей (56) при любых реализациях α_1, α_2 в пределах допустимых нагрузок на линии. Платой за страхование являются инвестиции в создание сверхпроводящей линии 3 (которые мы здесь не рассматриваем) и фиксированные затраты cF_3 , обеспечивающие её функционирование. Если бы эта линия была обычной, то условия Парето-оптимальности (56) не могли бы выполняться. Мы оставляем за рамками нашего анализа вопрос об оптимальном распределении страховой премии между потребителями из узлов 1 и 2. В контексте рассматриваемой здесь модели их вклад должен зависеть от свойств функции распределения вероятностей $\Phi(\alpha_1, \alpha_2)$ и различий в длине линий 1 и 2.

В качестве примера рассмотрим симметричный случай: 1) $R_1 = R_2 = R$, и 2) ограничения на нагрузку одинаковы для линий 1 и 2: $\bar{x}^{(j)} = \bar{x}, j = 1, 2$. При этом узлы 1 и 2 отличаются лишь значениями случайных параметров спроса α_1, α_2 . Допустим также, что функция распределения $\Phi(\alpha_1, \alpha_2)$ такова, что линия 3 с вероятностью 1 действует в свободном режиме, то есть ограничение для интерконнектора (54) не является связывающим:

$$|x_3^*| = \frac{|\alpha_2 - \alpha_1|}{4B} < \bar{x}^{(3)}.$$

Это выражение следует из (60) и означает, что разрыв значений резервационных цен α_1 и α_2 ограничен сверху по абсолютной величине.

В режиме ограничений на линии 1 и 2 цена для интегрированного рынка вычисляется аналогично решению (19) для двухузловой сети:

$$\bar{p} = \tilde{\alpha} - 2B\bar{x}.$$

Отсюда и из (59) следует, что оптимальная цена для симметричной сети с тремя узлами выражается в виде кусочно-линейной функции от средней резервационной цены $\tilde{\alpha}$:

$$P(\tilde{\alpha}) = \max[\theta\tilde{\alpha} + (1 - \theta)c, \tilde{\alpha} - 2B\bar{x}], \quad (61)$$

то есть совпадает с формулой оптимальной цены (36) для сети с двумя узлами. При этом пороговое значение для $\tilde{\alpha}$ определяется так же, как и для (36): $\bar{\tilde{\alpha}} = \bar{\alpha} = c + 2(cR + B)\bar{x}$.

Используя данный факт, нетрудно сравнить дисперсии цен для интегрированного рынка, представленного на рис. 9, и дезинтегрированного рынка с тремя узлами и двумя линиями, изображенными на том же рисунке, но с бездействующим интерконнектором.

Для дезинтегрированного рынка цены определяются на основе выражения (36) как $P(\alpha_1)$ и $P(\alpha_2)$. Можно показать, что

$$\text{Var}P(\tilde{\alpha}) \leq \frac{1}{2}(\text{Var}P(\alpha_1) + \text{Var}P(\alpha_2)). \quad (62)$$

Это следует из кусочно-линейного вида функций оптимальной цены (61) и (36), неравенства для условных дисперсий:

$$\text{Var}(\tilde{\alpha}|\tilde{\alpha} \leq \bar{\alpha}) \leq \frac{1}{2}(\text{Var}(\alpha_1|\alpha_1 \leq \bar{\alpha}) + \text{Var}(\alpha_2|\alpha_2 \leq \bar{\alpha}))$$

и такого же неравенства для условий $\tilde{\alpha}, \alpha_1, \alpha_2 > \bar{\alpha}$.

Неравенство (62) означает, что дисперсия единой цены электроэнергии, зависящей от среднего значения резервационной цены, меньше средней дисперсии узловых цен для дезинтегрированного рынка. В этом проявляется эффект снижения волатильности узловых цен электроэнергии благодаря сверхпроводящему интерконнектору, обеспечивающему взаимное страхование рисков.

7. Заключение

Технологии, основанные на сверхпроводимости, будут не только в полной мере востребованы энергетикой будущего, но, скорее всего, они станут играть в ней системообразующую роль. Это произойдет благодаря созданию сверхпроводящих магистральных линий электропередачи, что позволит реализовать преимущества таких линий в отдаленности от масштаба. С помощью простых теоретических моделей мы выявили эти преимущества при сравнении интегральных экономических эффектов и волатильности цен на электроэнергию.

В заключение важно отметить, что в следующем десятилетии начнется практическая реализация проектов магистральных ВТСП-линий в странах, лидирующих в данной сфере. Опубликованные в США и Великобритании исследования содержат аналогичный вывод в отношении внедрения ВТСП-линий в распределительных сетях (Eckroad 2016, Venuturumilli et al. 2017). Сдерживающим фактором здесь является то, что существующие обычные ЛЭП были рассчитаны на десятилетия и должны окупить инвестиции в их строительство. Кроме того, должны окупаться вложения в инновационные разработки, которые способствовали появлению новых сверхмощных ЛЭП с постоянным током. Эти линии представляют собой рубеж традиционной

технологии, с которой магистральные ВТСП-линии будут конкурировать и уже на данный момент сопоставимы по проектным затратам. Развитие конкурентных преимуществ будет зависеть в первую очередь от удешевления производства ВТСП-кабелей.

В данной статье мы не касались вопроса об издержках производства ВТСП-кабелей. Возрастающая отдача приводит к круговой причинности: масштаб выпуска определяется спросом, который через снижение издержек и цены товара растет с увеличением масштаба выпуска. Эффект масштаба имеет значение для производства ВТСП-ленты, являющейся самым дорогим компонентом кабелей. Расчеты показывают, что при достаточном объеме выпуска себестоимость ленты снижается до коммерчески выгодных уровней. При этом в конечном счете основную долю издержек в цене ленты составит стоимость сверхпроводящих материалов (Шавкин 2009).

Еще один вопрос, который мы здесь не затрагивали – это проблема экстерналий, которая не менее важна, чем экономический эффект. В наших моделях фигурировал чисто экономический критерий интегрального эффекта, отражающий интересы непосредственных участников сетевого взаимодействия. Однако ни генератор, ни сетевая компания, а во многих случаях, и конечный потребитель энергии не обязаны принимать во внимание негативные внешние эффекты ЛЭП на прилегающие территории, такие как изменение ландшафта, вред здоровью людей, потери земельных ресурсов и снижение стоимости недвижимости.

В этом отношении ВТСП-линии за счет их компактности и из-за отсутствия электромагнитного излучения, безусловно, предпочтительнее обычных высоковольтных воздушных и подземных линий, но, чтобы общественные предпочтения были заявлены, необходимы два условия. Во-первых, непосредственное участие населения прилегающих территорий в обсуждении проектов новых ЛЭП, оказывающих воздействие на окружающую среду. Во-вторых, широкая информированность всех заинтересованных сторон о преимуществах энергетики, основанной на сверхпроводимости.

Приложение А: Выражения (16), (17)

Из (9), (12), (13) получаем функции спроса и предложения:

$$y = \frac{\alpha - p}{2B}, \quad x = \frac{p - c}{2cR}$$

для $\mu = 0$. Условие равновесия спроса и предложения (10) дает:

$$(cR + B)p = cR\alpha + Bc ,$$

откуда следует (16). Подставляя p^* в функцию предложения, получаем (17).

Приложение Б: Утверждение

(i): Из (18), (25) имеем, что $\mathcal{E} < \mathcal{E}_s$, если

$$(cR + B)(x^*)^2 < B(x_s^*)^2 - cF .$$

Подставим в это неравенство оптимальные объемы генерации (17), (24):

$$(cR + B) \left(\frac{\alpha - c}{2(cR + B)} \right)^2 < B \left(\frac{\alpha - c}{2B} \right)^2 - cF .$$

Преобразуя обе части, получаем:

$$F < \frac{R(\alpha - c)^2}{4(cR + B)B} = Rx^*x_s^* = l((x^*x_s^*)^{1/2}) = l(\tilde{x}^g) .$$

(ii): Из (20), (29) имеем, что $\mathcal{E} < \mathcal{E}_s$, если

$$(\alpha - c)\bar{x} - (cR + B)\bar{x}^2 < (\alpha - c)\bar{x}_s - B\bar{x}_s^2 - cF .$$

Преобразуем с учетом (28):

$$\begin{aligned} cF &< cR\bar{x}^2 + (\alpha - c)(\bar{x}_s - \bar{x}) - B(\bar{x}_s^2 - \bar{x}^2) = cl(\bar{x}) + (\alpha - c)\Delta\bar{x} - B\Delta\bar{x}(\bar{x} + \bar{x}_s) \\ &= cl(\bar{x}) + \Delta\bar{x}(\alpha - B(\bar{x} + \bar{x}_s) - c) = cl(\bar{x}) + \Delta\bar{x}(\alpha - 2B\tilde{x}^a - c) \\ &= cl(\bar{x}) + \Delta\bar{x}(p(\tilde{x}^a) - c), \end{aligned}$$

откуда следует (31).

Приложение В: Выражения (50), (51)

Подставляя (47), (48) в условие равновесия для узла 2 (49), имеем:

$$\frac{\alpha_2 - p_2}{2B_2} = \frac{p_2 - p_1}{2cR_2} ,$$

откуда получаем (51). Подставляя (46), (48) в условие равновесия для узла 1 (49), имеем:

$$\frac{\alpha_1 - p_1}{2B_1} = \frac{p_1 - c}{2cR_1} - \frac{p_2 - p_1}{2cR_2}.$$

Подставляя в это уравнение выражение (51) для p_2 и преобразуя, получаем:

$$\begin{aligned} c^2R_1R_2(\alpha_1 - p_1) &= cR_2B_1(p_1 - c) - cR_1B_1(\theta\alpha_2 + (1 - \theta)p_1 - p_1) \\ (cR_1 + B_1 + \theta B_1(R_1/R_2))p_1 &= B_1c + cR_1\alpha_1 + \theta B_1(R_1/R_2)\alpha_2, \end{aligned}$$

откуда следует (50).

Приложение Г: Выражение (59), (60)

Для линейной функции спроса (48) имеем из условий (57), (58):

$$p = \alpha_j - 2B(x_j \mp x_3) \quad (\text{A2})$$

$$x_j = \frac{p - c}{2cR_j}$$

для $j = 1, 2$. Находим отсюда x_3^* :

$$x_3^* = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{4B} + \frac{x_1 - x_2}{2B} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{4B} + \frac{p - c}{4c} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{4B} + \frac{R_2 - R_1}{4cR_1R_2} (p - c)$$

Подставляя x_3^* в выражение (A2) для x_1 , получаем:

$$\begin{aligned} p &= \alpha_1 - 2B(x_1 - x_3^*) = \alpha_1 - 2B \left(\frac{(p - c)}{2cR_1} - \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{4B} - \frac{R_2 - R_1}{4cR_1R_2} (p - c) \right) \\ &= \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} - B(p - c) \left(\frac{1}{cR_1} - \frac{R_2 - R_1}{2cR_1R_2} \right) = \tilde{\alpha} - B \frac{R_1 + R_2}{2cR_1R_2} (p - c) \\ &= \tilde{\alpha} - \frac{B}{cR} (p - c) \end{aligned}$$

откуда следует (59).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Данилов И. А. (2013). *Общая Электротехника*. М.: Юрайт, Москва.

Шавкин С. (2009). Перспективы Снижения Стоимости ВТСП Проводов Второго Поколения // *Сверхпроводники для Энергетики, Информационный Бюллетень*. Том 6. Выпуск 2. С. 1-3.

Bohn R., Caramanis M., Schweppe F. (1984). Optimal Pricing in Electrical Networks in Space and Time // *The RAND Journal of Economics*. Vol. 15. No 3. P. 360 – 376.

Chao H.-P., Peck S. (1996), A Market Mechanism for Electric Power Transmission // *Journal of Regulatory Economics*. Vol. 10, P. 25-59.

Eckroad, S. (2016). Technical Analysis and Assessment of Resilient Technologies for the Electric Grid: Task 3 – Cost and Commercialization Assessment and Market Analysis // EPRI, Palo Alto. CA, USA.

Joskow P., Tirole J. (2000). Transmission Rights and Market Power on Electric Power Networks // *The RAND Journal of Economics*. Vol. 31. No 3. P. 450 – 487.

Li N. (2015). A Market Mechanism for Electric Distribution Networks // IEEE 54th Annual Conference on Decision and Control (CDC), December 15-18, 2015, Osaka, Japan.

Thomas H., Marian A., Chervyakov A., Stuckrad S., Rubbia K. (2016). Efficiency of Superconducting Transmission Lines: An Analysis with Respect to Load Factor and Capacity Rating // *Electric Power Systems Research*. No. 141. P. 381 – 391.

Romashov M., Sytnikov V., Shakarian Y., Ivanov Y. (2014). Prospects of Long-Distance HTS DC Power Transmission Systems // *Journal of Physics: Conference Series*. No. 507. P. 1 – 4.

Venuturumilli S., Zhang Z., Zhang M., Yuan W. (2017). Superconducting Cables – Network Feasibility Study; *Western Power Distribution* // Herald Way, Pegasus Business park, Castle Donington.