

## Вопросы формирования равновесных узловых цен оптового рынка электроэнергии

Васьковская Т.А.

10 августа 2016

### Аннотация

Расчет равновесных узловых цен сопряжен с трудностями их анализа. В статье предложен подход, позволяющий в деталях объяснить формирование цены в любом узле. Подход основан на исследовании свойств множителей Лагранжа задачи оптимизации установившихся режимов, лежащей в основе расчетов рынка на сутки вперед и балансирующего рынка. Рассматривается зависимость узловой цены от ценовых заявок и параметров оптимального установившегося режима.

**Ключевые слова:** установившийся режим, оптимизация, множители Лагранжа, узловые равновесные цены.

Задача анализа равновесных узловых цен рынка на сутки вперед<sup>1</sup> существует с момента запуска оптового рынка электроэнергии. И участникам рынка, и инфраструктурным организациям важно понимать, под влиянием каких факторов складываются узловые цены. Это необходимо для доверия к результатам их расчета и объяснения, почему узловые цены сложились именно на таком уровне, возможности их прогнозирования.

Подходы к анализу узловых цен не менялись в течение длительного времени. Множество случаев ценообразования до сих пор остаются без объяснения. Такими случаями являются: формирование узловых цен на слишком низком или слишком высоком уровне (например, ниже 100 руб./МВт·ч или выше принятых заявок поставщиков электроэнергии), формирование существенно отличающихся цен в соседних узлах и др. При этом стандартные комментарии о влиянии стоимости потерь и системных ограничений, стоимости покрытия замыкающего спроса являются общими и не отвечают на поставленный вопрос. Очевидно, что необходимы дальнейшие исследования по данной тематике.

В основе расчета узловых цен лежит оптимизация установившихся режимов (УР) электроэнергетических систем (ЭЭС). Задача оптимизации решается методом множителей Лагранжа, а равновесные узловые цены приравниваются к множителям Лагранжа (МЛ) к уравнениям баланса активной мощности в узлах ЭЭС. Множители Лагранжа традиционно принято считать вспомогательными переменными, используемыми при решении задач оптимизации и проверке условий их оптимальности. Использование МЛ в качестве узловых

---

<sup>1</sup>А также индикаторов балансирующего рынка.

равновесных цен переводит их из второстепенных величин в разряд основных, определяющих в дальнейшем стоимость электроэнергии.

По определению МЛ характеризуют величину изменения значения целевой функции в результате малого изменения правой части (предела) ограничения. Экономический смысл МЛ определяется как теневая цена соответствующего ограничения. В регламентах оптового рынка электроэнергии и мощности<sup>2</sup> дано следующее определение узловой цены: узловая цена отражает стоимость покрытия «закрывающего» (или «последнего») 1 МВт спроса со стороны генераторных агрегатов энергосистемы.

Проиллюстрируем сложность понимания МЛ на примере ЭЭС из 30 узлов с 6 генераторами. Исходные данные схемы и результаты, обсуждаемые в статье, опубликованы в репозитории исследовательских данных [1]. Рассмотрим целевую функцию

$$f = 0,8P_{g1} + 1250P_{g2} + 500P_{g13} + 1500P_{g22} + 0,8P_{g23} + 1000P_{g27} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где коэффициенты 0,8, 500, . . . 1500 определяют степень приоритетности загрузки генерации. Будем их называть параметрами целевой функции. Параметр 0,8 обеспечивает наиболее высокую приоритетность загрузки, в то время как 1500 – самую низкую приоритетность. Выбранные параметры соответствуют тем, которые используются в реальных расчетах. Например, 0,8 - это параметр для так называемых ценопринимающих заявок поставщиков электроэнергии. Параметры по сути являются удельными ценами производства электроэнергии и измеряются в рублях на мегаватт-час. Целевая функция (1) при этом отражает совокупную стоимость производства электроэнергии.

Проведя минимизацию целевой функции, мы получим следующие МЛ (см. граф электрической сети на рис. 1). В результате оптимизации генераторы в узлах 1, 13, 23 полностью загружены, генераторы в узлах 2, 22, 27 загружены частично, они на рисунке выделены. Можно предположить, что из-за некоторых ограничений допустимой области УР, не было возможности разгрузить мощность наименее приоритетного источника электроэнергии в узле 22. Как следует из определения узловых цен в регламентах оптового рынка, генераторы 2, 22, 27 являются замыкающими.

Наибольший интерес вызывают МЛ в узлах 16 и 17, поскольку существенно отличаются от других МЛ. Отметим, что объяснения формирования МЛ на уровне 205,7 и 1789,1 руб./МВт·ч в виде «стоимости покрытия замыкающего спроса» совершенно недостаточно для понимания, как они сформированы. Как может быть, что удельные цены замыкающих поставщиков равны 1000-1500 руб./МВт·ч, а узловая цена в пять раз ниже или на 20% выше? В этом случае обычно дается пояснение, что такой уровень МЛ обуславливается вкладом системных ограничений.

<sup>2</sup>Регламент №7, Приложение 2, раздел 2. Регламенты доступны по адресу <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm>

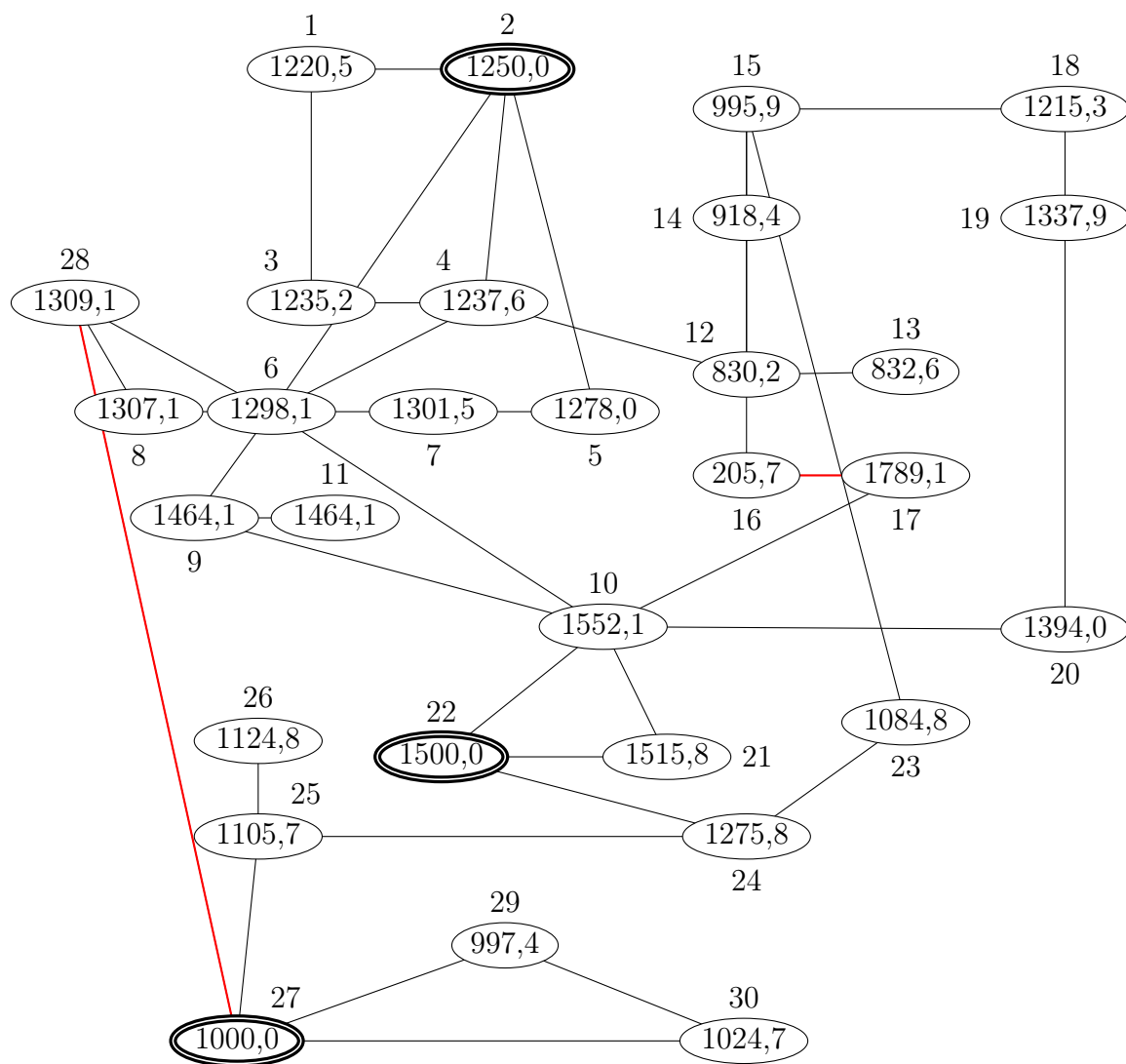


Рис. 1. Граф сети и МЛ в 30-узловой ЭЭС

По результатам решения задачи действительно можно наблюдать, что в линиях 16–17 и 27–28 переток активной мощности достиг максимально допустимого значения, вследствие чего, например, дальнейшая загрузка наиболее приоритетного из замыкающих генератора 27 была невозможна. При этом почему МЛ сформировались на уровне 205,7 и 1789,1 остается не ясным.

Ответы на подобные вопросы лежат в исследовании УР, на основе которого формируются МЛ. Как результат такого исследования, в данной статье впервые предлагается физическая интерпретация МЛ. Новый подход позволяет более детально рассмотреть МЛ, связать их напрямую с параметрами целевой функции задачи оптимизации и характеристиками оптимального УР. Подход основан на разложении МЛ на режимный компонент, компоненты, обусловленные сетевыми ограничениями, и компоненты, обусловленные ограничениями по напряжению [2]. Схема разложения при наличии  $S$  активных ограничений сети (ОС) и  $V$  активных ограничений по напряжению (ОН) показана на рис. 2. Отметим, что неактивные ограничения не оказывают влияния на оптимальный УР и МЛ.

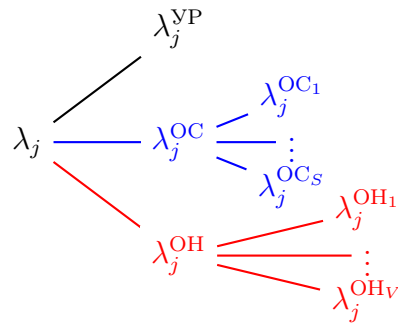


Рис. 2. Компоненты МЛ в узле  $j$

Важное значение имеют узлы, в которых располагаются замыкающие генераторы. Это узлы 2, 22, 27, они выделены на рис. 1. Можно сказать, что во время оптимизации генераторы в этих узлах проходили отбор последними, как наименее приоритетные. Это указывает на то, что любое небольшое изменение в оптимизационной задаче будет сбалансировано с их помощью. Для исследуемого электроэнергетического режима они являются балансирующими по активной мощности. Исходя из необходимых условий оптимальности режима (равенству нулю градиента функции Лагранжа по переменным задачи оптимизации) в таких узлах МЛ равны соответствующим параметрам функции Лагранжа. Действительно, МЛ в узле 2 равен 1250, в узле 22 равен 1500, а в узле 27 – 1000.

Именно эти параметры и формируют МЛ в остальных узлах и кроме разложения на компоненты по факторам: УР, ОС, ОН, каждый из компонентов раскладывается на компоненты параметров целевой функции. Схематично это показано на рис. 3. Каждый компонент определяется некоторым коэффициентом  $k_{jm}^*$ , умноженным на ценообразующий параметр целевой функции  $C_m$ , где  $m \in M$ , а  $M$  - множество замыкающих генераторов. В рассматриваемом примере это множество состоит из трех генераторов. В сумме все компоненты составляют МЛ.

Рассмотрим балансирующие узлы по реактивной мощности. Ими будут генераторные узлы, если в них генерация (потребление) реактивной мощности не была ограничена заданными пределами регулирования. Таким образом, выбор балансирующих узлов по активной и реактивной мощности фактически определяется в ходе оптимизации.

Заранее выбранный балансирующий узел может использоваться для расчета УР в ходе оптимизации, но его выбор не влияет на ее результаты. Это объясняется тем, что во время оптимизации генерирующие мощности подбираются таким образом, чтобы целевая функция была оптимальной и выполнялись ограничения задачи оптимизации, одно из которых состоит в выполнении баланса мощности в балансирующем узле (БУ). Если дополнительных ограничений в балансирующем узле не накладывается, то с точки зрения поиска оптимального УР такой узел не будет отличаться от других узлов.

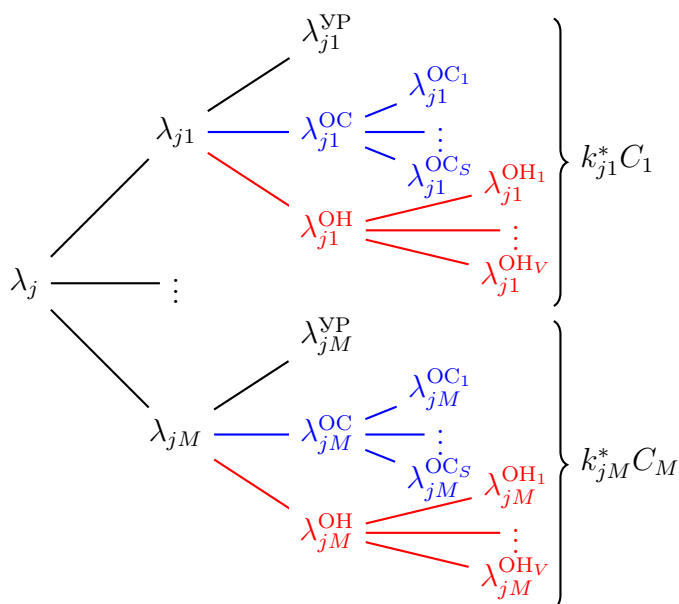


Рис. 3. Компоненты МЛ в узле  $j$  с детализацией по ценообразующим параметрам целевой функции к уравнению баланса активной мощности

Также роль заранее выбранного балансирующего узла указать, в каком из узлов будет нулевая фаза напряжения. Выбор иного узла в качестве балансирующего приведет к тому же оптимальному режиму с одинаковым сдвигом фаз напряжения во всех узлах.

Из этого следует, что оптимальный режим можно рассматривать как УР электроэнергетической системы с распределенным балансирующим узлом (РБУ) по активной мощности, включающим узлы с замыкающими генерирующими мощностями в целевой функции. На рис. 4 показаны множество узлов задачи и их типы.

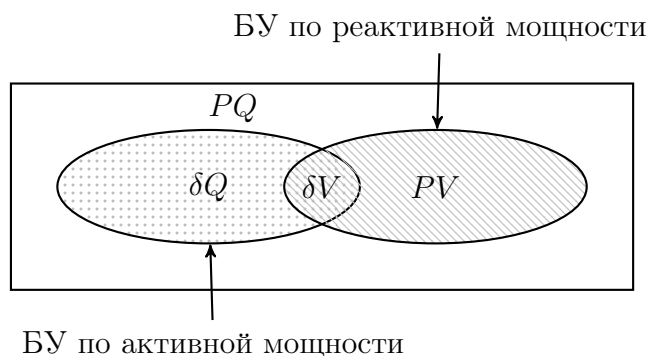


Рис. 4. Диаграмма Венна типов узлов в энергосистеме по результатам оптимизации

Диаграмма иллюстрирует отнесение узлов к разным типам для расчета оптимального УР. Здесь  $PV$  узлы – это узлы, в которых балансируется реактивная мощность при фиксированной активной мощности,  $\delta Q$  и  $\delta V$  узлы (обозначены так по аналогии):  $\delta V$  – узлы, в которых балансируется и активная, и реактивная мощность, а  $\delta Q$  – узлы, в которых активная мощность балансируется, а реактивная находится на пределе. Все остальные узлы являются

$PQ$  узлами, в том числе и генераторные узлы, в которых активная и реактивная мощность установлены на максимальном или минимальном значении соответствующих ограничений.

Коэффициенты  $k_{jm}^{УР}$  в режимных компонентах МЛ определяются следующим образом.

Это загрузка РБУ для покрытия последнего 1 МВт мощности в узле  $j$  равняется производной  $\partial P_m^{РБУ} / \partial P_j$  в полученном УР (рис. 5). Если провести численный эксперимент расчета УР с РБУ после снижения нагрузки на 1 МВт, то коэффициенты будут с некоторой точностью равны разнице между генерацией РБУ до и после эксперимента.



Рис. 5. Физическая интерпретация  $k_{jm}^{УР}$

Далее рассмотрим активные ОС. Со стороны рассматриваемого УР с РБУ определяющим является отклик перетока активной мощности по контролируемому сечению на изменение мощности в узле  $j$ , т.е.  $\partial P_s / \partial P_j$ , где  $s = 1, \dots, S$ .

Экономическая интерпретация активных ограничений рассматривается как степень влияния ограничения на целевую функцию, т.е. степень изменения целевой функции при изменении предела ограничения. Для ОС ее принято называть ценой сечения. Рассмотрим ее физическую интерпретацию как отклик мощности в РБУ на изменение предела ограничения.

В такой формулировке рассматривается изменение генерирующей мощности РБУ в задаче оптимизации установившегося режима (ОУР) при изменении максимально допустимого перетока мощности по контролируемому сечению. Очевидно, что:

- 1) изменение максимально допустимого перетока ведет к изменению генерирующей мощности РБУ, и как следствие, – к изменению целевой функции (1);
- 2) такое изменение повлияет на РБУ только в том случае, если ограничение активно.

Указанный отклик для ОС в контролируемом сечении  $s$  является производной  $\partial P_m^{РБУ} / \partial P_s^{\max}$  в задаче ОУР. По сравнению с УР, в котором производные могут быть рассчитаны с помощью матрицы Якоби, здесь производная определяется для оптимизационной задачи, в которой направление отклика задается целевой функцией. Как результат, коэффициенты  $k_{jm}^{ОС_s}$  равны произведению двух рассмотренных производных (рис. 6):

$$k_{jm}^{ОС_s} = \frac{\partial P_s}{\partial P_j} \frac{\partial P_m^{РБУ}}{\partial P_s^{\max}}.$$

Аналогично определяются коэффициенты  $k_{jm}^{ОН_v}$  для ОН при  $v = 1, \dots, V$  (рис. 7):

$$k_{jm}^{ОН_v} = \frac{\partial U_v}{\partial P_j} \frac{\partial P_m^{РБУ}}{\partial U_v^{\max}} \text{ или } k_{jm}^{ОН_v} = -\frac{\partial U_v}{\partial P_j} \frac{\partial P_m^{РБУ}}{\partial U_v^{\min}}.$$

Таким образом, МЛ определяются параметрами целевой функции и свойствами УР в оптимальной точке. Преимуществами рассмотрения МЛ в таком виде является их пред-

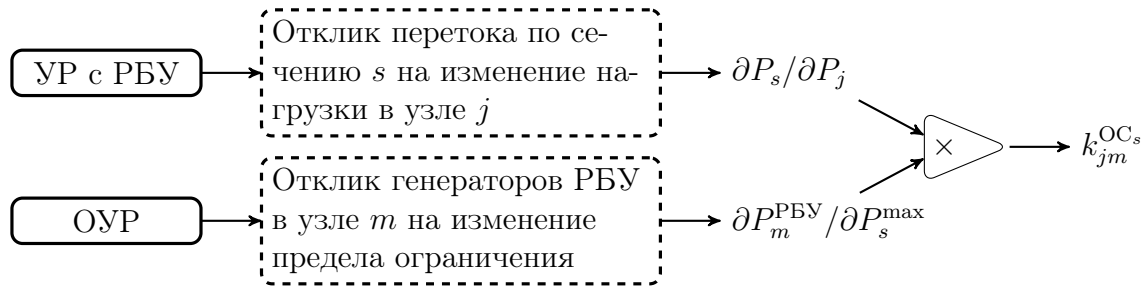


Рис. 6. Физическая интерпретация  $k_{jm}^{OC_s}$

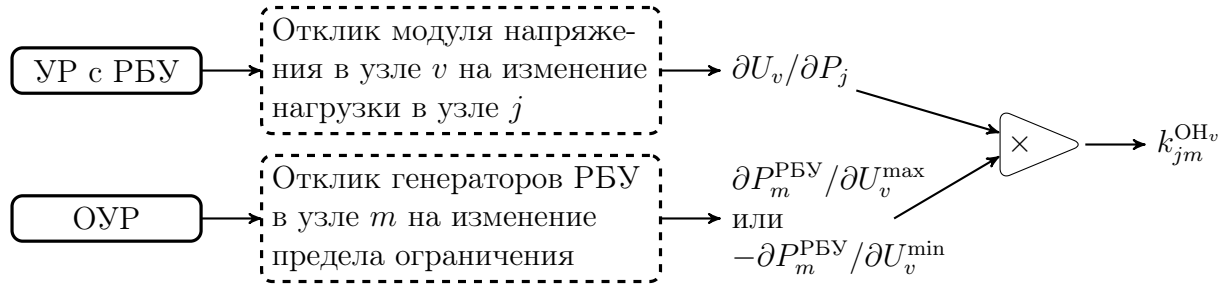


Рис. 7. Физическая интерпретация  $k_{jm}^{OH_v}$

сказуемость и обоснованность. Кроме того, МЛ как и УР в оптимальной точке не зависят от выбора балансирующего узла. Предлагаемая физическая интерпретация, основанная на РБУ, также не задействует в расчетах заранее заданный балансирующий узел.

Рассматривая решение ОУР на рис. 1, отметим, что кроме активных ОС в линиях 16-17 и 27-28 имеются активные ОН: максимального предела достигло напряжение в узле 29, минимального – в узле 13.

В табл. 1 приведено разложение МЛ на компоненты с соответствующими коэффициентами для узла 16, в табл. 2, 3 – отклики УР с РБУ и ОУР<sup>3</sup>.

Таблица 1. Коэффициенты УР, ОС и ОН для МЛ в узле 16

$C_m$	$k_{16m}^{УР}$	$k_{16m}^{OC_{16-17}}$	$k_{16m}^{OC_{27-28}}$	$k_{16m}^{OH_{13}}$	$k_{16m}^{OH_{29}}$	$\sum k_{16m}^*$
$C_2 = 1250$	0,32738	4,05418	0,04297	0,00255	0	4,42708
$C_{22} = 1500$	0,60665	-4,78801	0,01146	0,00740	0	-4,16250
$C_{27} = 1000$	0,06682	0,91680	-0,05534	-0,01270	0	0,91558
Компоненты МЛ и итоговый МЛ	1386,02	-1197,49	15,56	1,59	0	205,68

Режимный компонент МЛ в узле 16 составляет  $\lambda_{16}^{УР} = 1386,02$ . Такой был бы МЛ при данном режиме при отсутствии ограничений. Фактором снижения МЛ оказалось ОС в линии 16-17 с компонентом  $\lambda_{16}^{OC_{16-17}} = \sum_m k_{16m}^{OC_{16-17}} C_m = 4,05418 \cdot 1250 - 4,78801 \cdot 1500 + 0,91680 \cdot 1000 = -1197,49$ .

<sup>3</sup>Напряжение измеряется в о.е.

Таблица 2. Отклики УР на изменение мощности в узле 16

$\frac{\partial P_2^{\text{РБУ}}}{\partial P_{16}}$	$\frac{\partial P_{22}^{\text{РБУ}}}{\partial P_{16}}$	$\frac{\partial P_{27}^{\text{РБУ}}}{\partial P_{16}}$	$\frac{\partial P_{s:16-17}}{\partial P_{16}}$	$\frac{\partial P_{s:27-28}}{\partial P_{16}}$	$\frac{\partial U_{13}}{\partial P_{16}}$	$\frac{\partial U_{29}}{\partial P_{16}}$
0,32738	0,60649	0,06682	0,56013	-0,03696	-0,02163	0

Таблица 3. Отклики ОУР на изменение пределов активных ограничений

$m$	$\frac{\partial P_m^{\text{РБУ}}}{\partial P_{s:16-17}^{\text{max}}}$	$\frac{\partial P_m^{\text{РБУ}}}{\partial P_{s:27-28}^{\text{max}}}$	$\frac{\partial P_m^{\text{РБУ}}}{\partial U_{13}^{\text{min}}}$	$\frac{\partial P_m^{\text{РБУ}}}{\partial U_{29}^{\text{max}}}$
2	7,23796	-1,16270	0,11775	-0,23003
22	-8,54808	-0,31000	0,34204	-0,33690
27	1,63780	1,49732	-0,58706	0,61717

Таким образом, основной отрицательный вклад вносит распределение мощности между генераторами в РБУ: для обеспечения последнего 1 МВт в данном узле из-за данного ограничения был разгружен генератор 22 на 4,78801 МВт, и загружены генераторы 2 и 27 на 4,05401 и 0,91680 МВт соответственно. С учетом параметров этих генераторов в целевой функции МЛ снижается на величину 1197,49.

Рассмотрим формирование коэффициентов  $k_{16m}^{\text{OC}_{16-17}}$ . Во-первых, нас интересует влияние изменения активной мощности в узле 16 на переток мощности в линии 16–17. Производная  $\partial P_{16-17}/\partial P_{16}$  равна 0,56013, то есть при уменьшении нагрузки на 1 МВт, переток по линии 16-17 возрастает на 0,56013 МВт. Во-вторых, нас интересует влияние предела перетока активной мощности по сечению на загрузку РБУ. Если  $P_{s:16-17}^{\text{max}}$  увеличить на 1 МВт, произойдет перераспределение мощности между замыкающими генераторами. Наименее приоритетная мощность генерации в узле 22 разгрузится на 8,54808 МВт, более приоритетные генераторы 2 и 27 загрузятся на 7,23796 и 1,63780 МВт соответственно. Следует отметить, что ограничение во втором сечении (линии 27–28) остается активным, поэтому возможности загрузить генератор 27 как более приоритетный вместо генератора 2 не появляется. Умножив  $\partial P_{s:16-17}/\partial P_{16} = 0,56013$  на  $\partial P_m^{\text{РБУ}}/\partial P_{s:16-17}^{\text{max}}$ , получаем искомые коэффициенты.

Аналогично исследуется МЛ в любом другом интересующем узле, в частности в узле 17 режимный компонент составляет 1434,4. Дополнительно к нему добавляется компонент ОС в линии 16–17 в размере 341,93. Основное различие с узлом 16 заключается в том, что производная  $\partial P_{16-17}/\partial P_{17}$  равна  $-0,15994$ , а значит последний 1 МВт в этом узле требует пропорциональной перезагрузки РБУ: загрузки генератора 22 с  $C_{22} = 1500$  на  $0,15994 \cdot 8,54808 = 1,367$  МВт и разгрузки других замыкающих генераторов на  $0,15994 \cdot 7,23796 = 1,158$  и  $0,15994 \cdot 1,63780 = 0,262$  МВт соответственно.

Таким образом, ОС из-за перераспределения генерации РБУ являются причиной искажения МЛ по сравнению с режимными компонентами.

Полученный подход позволяет проанализировать, каким образом будут сформированы МЛ, если оптимальный УР останется прежним. Имеется некоторый коридор параметров



целевой функции для генераторов 2, 22 и 27, при которых оптимальный УР не изменится. Ответим на вопрос, насколько низкой может быть МЛ в узле 16? Согласно полученным коэффициентам МЛ в узле формируется следующим образом:  $205,68 = 4,42708 \cdot 1250 - 4,16250 \cdot 1500 + 0,91558 \cdot 1000$ . МЛ в узле будет равен нулю, если параметр 1250 заменить на 1204 или если параметр 1000 заменить на 775. На рис. 8 и 9 показаны МЛ, полученные после решения задачи оптимизации при корректировке параметров целевой функции. В первом случае МЛ в узле 16 действительно упал до нуля, во втором случае установился на уровне 0,9. Полученные МЛ немного отличаются от ожидаемых 2,03 и -0,33. Это объясняется тем, что отклики в ОУР зависимы от параметров целевой функции. Однако эта зависимость, как видно из примера, не столь существенна.

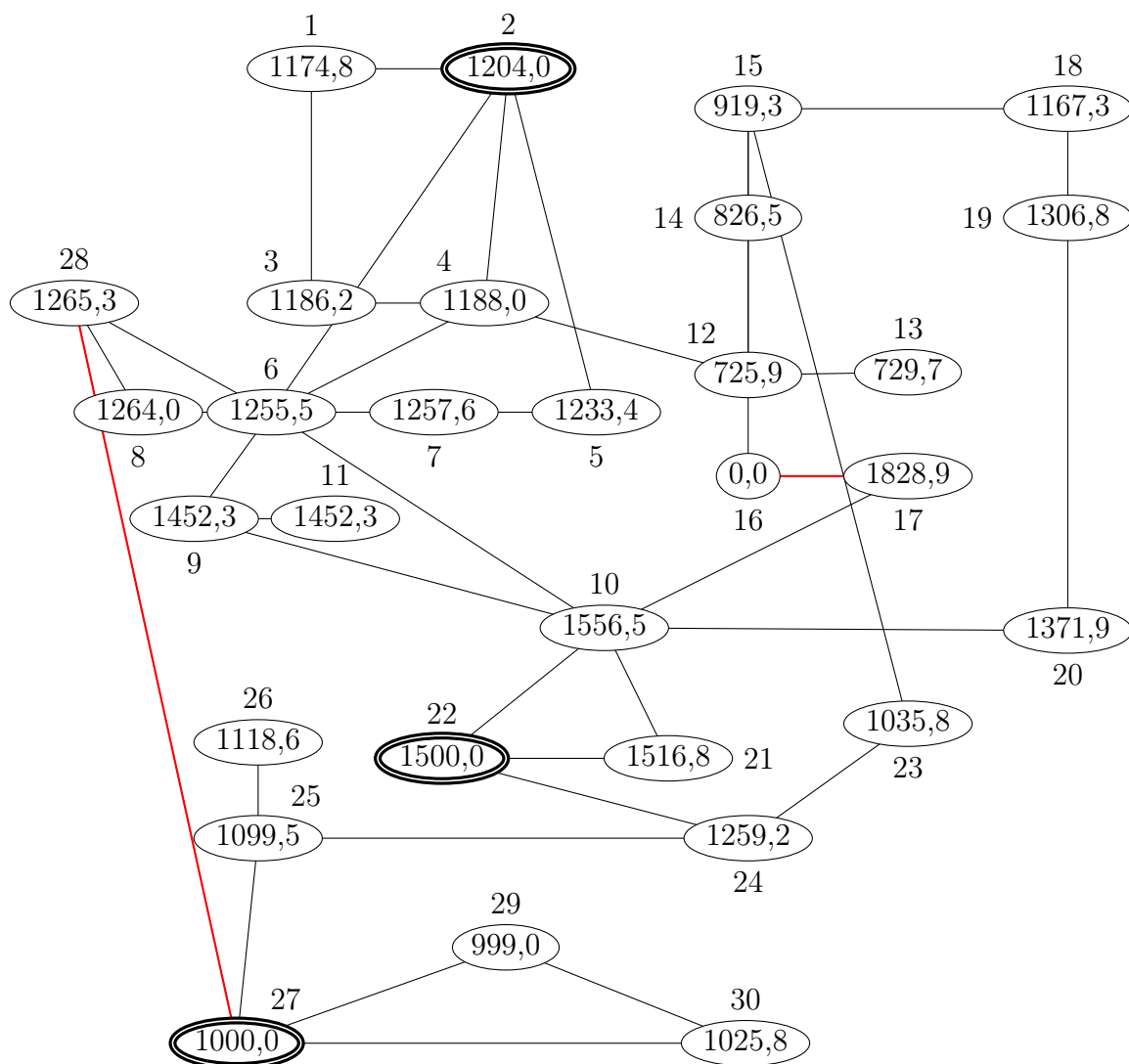


Рис. 8. Граф сети и МЛ в 30-узловой ЭЭС

После снижения МЛ до нуля возникает следующий вопрос, а что будет, если цены в заявках уменьшить далее – ниже 1204 и 775? Тогда МЛ в узле 16 будет отрицательным. С математической точки зрения МЛ к ограничениям типа равенств могут быть как положительными, так и отрицательными. С экономической точки зрения такие МЛ дают сигнал к увеличению потребления для целей улучшения целевой функции. С физической точки зре-

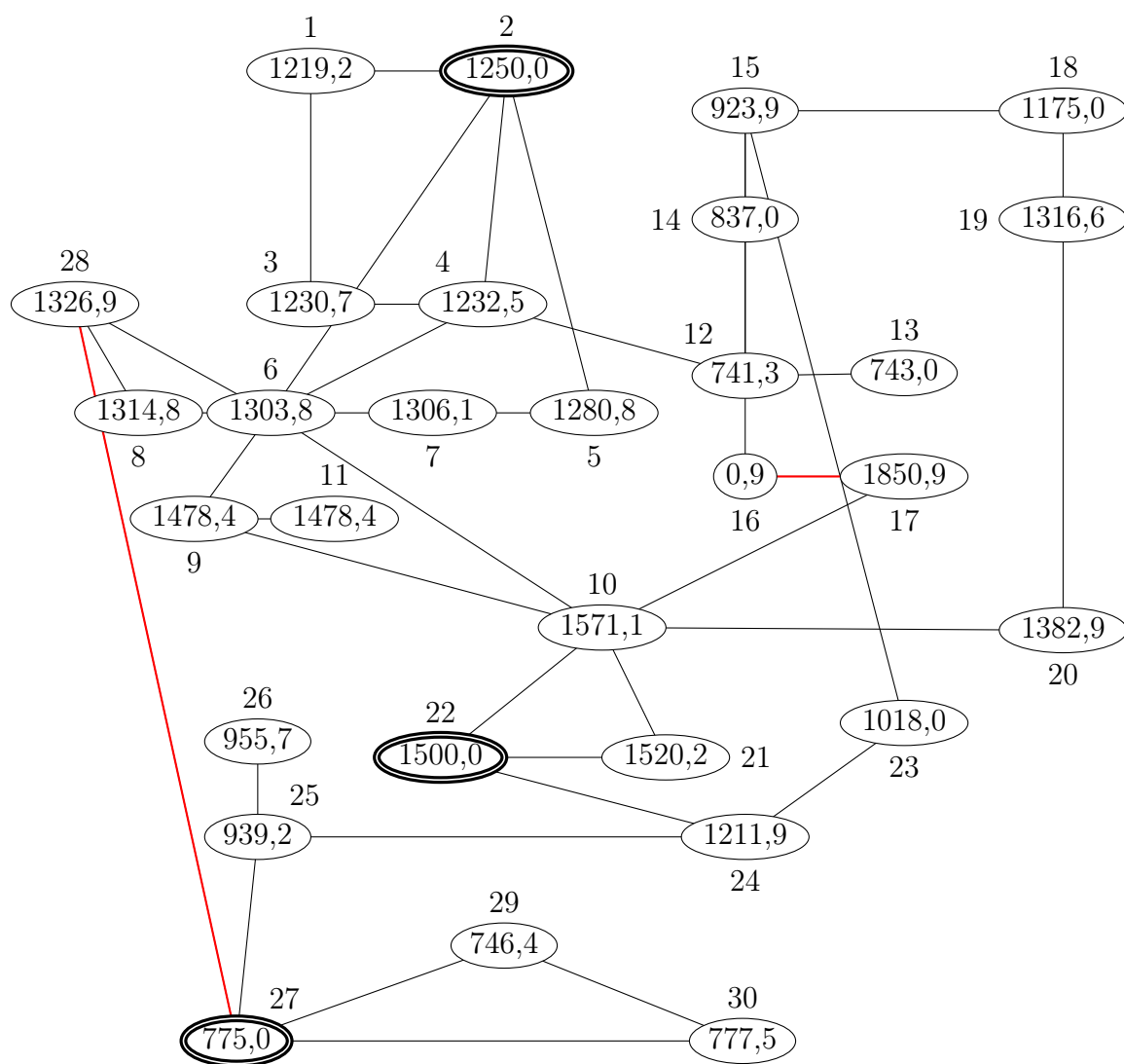


Рис. 9. Граф сети и МЛ в 30-узловой ЭЭС

ния увеличение нагрузки в узле 16 ведет к разгрузке сечения и перераспределению генерации РБУ причем таким образом, что целевая функция улучшается.

Следует отметить, что на оптовом рынке электроэнергии и мощности регламентируется обработка МЛ, включающая в том числе обнуление МЛ ниже 1. При этом по данным отчета о равновесных ценах, публикуемого АО АТС<sup>4</sup>, нулевые равновесные цены появляются в различных узлах каждые вторые сутки. Это свидетельствует о высокой частоте появления сложных случаев ценообразования.

Рассмотрим далее влияние ОН на узлы 29, 30. Формирование МЛ в них выглядит достаточно странным. Во-первых, это нагрузочные узлы, в которых МЛ по сравнению с генераторными должен увеличиваться, а электрически они связаны только с генераторным узлом 27. Можно ожидать, что будучи узлом в составе РБУ именно он определяет формирование МЛ в рассматриваемых узлах. Но картина формирования МЛ противоречит данным рас-

<sup>4</sup>Доступен по ссылке [https://www.atsenergo.ru/nreport?rname=big\\_nodes\\_prices\\_pub](https://www.atsenergo.ru/nreport?rname=big_nodes_prices_pub)

суждениям: в узле 29 МЛ ниже, а в узле 30 – выше 1000. Объяснение лежит в активном ограничении по напряжению в узле 29.

В табл. 4 представлены ненулевые компоненты МЛ. В данном случае гипотеза о том, что влияющим узлом в РБУ для рассматриваемых узлов 29-30 является узел 27 подтверждается для режимного компонента. Коэффициент режимного компонента для генератора 27 равен 1,02486 и 1,04197 соответственно. Здесь 2,5% и 4,2% отражают потери активной мощности при доставке в узлы последнего 1 МВт мощности нагрузки от узла 27. Дополнительным влияющим фактором оказалось ОН в узле 29, в котором модуль напряжения достиг максимального значения.

Таблица 4. Коэффициенты УР, ОС и ОН для МЛ в узлах 29 и 30

$C_m$	$k_{29m}^{УР}$	$k_{29m}^{ОН_{29}}$	$\sum k_{29m}^*$	$k_{30m}^{УР}$	$k_{30m}^{ОН_{29}}$	$\sum k_{30m}^*$
$C_2 = 1250$	0	-0,03598	-0,03598	0	-0,02256	-0,02256
$C_{22} = 1500$	0	-0,05270	-0,05270	0	-0,03304	-0,03304
$C_{27} = 1000$	1,02486	0,09654	1,12140	1,04197	0,06053	1,10250
Компонент МЛ и итоговый МЛ	1024,86	-27,49	997,38	1041,97	-17,23	1024,74

Рассмотрим формирование коэффициентов  $k_{jm}^{ОН_{29}}$ . Со стороны УР с РБУ имеем  $\partial U_{29}/\partial P_{29} = 0,15642$  и  $\partial U_{29}/\partial P_{30} = 0,09808$ . Эти производные равны соответствующим элементам матрицы, обратной матрице Якоби для расчета УР с РБУ.

Со стороны ОУР увеличение предела ограничения  $U_{29}^{\max}$  условно на 1 о.е. ведет к перезагрузке РБУ: повышению генерации в узле 27 на 0,61717 МВт и снижению генерации в узлах 2 и 22 на 0,23003 и 0,33690 МВт соответственно (см.  $\partial P_m^{РБУ}/\partial U_{29}^{\max}$  в табл. 3). ОН оказывает влияние на загрузку всех генераторов в РБУ и в этой связи оказывает влияние на МЛ в узлах в той степени, в какой изменение мощности в них воздействует на напряжение в узле 29. Таким образом, МЛ в узле 29 по сравнению с режимным компонентом снижается на 27,48 (компенсируя вклад потерь), а в узле 30 снижается на 17,23 и итоговые МЛ равны 997,37 и 1024,74 соответственно.

Таким образом, на данном примере наглядно показано, что МЛ аккумулируют в себе различные факторы, каждый из которых можно рассмотреть отдельно, а пофакторные компоненты МЛ определяются как произведение

- параметра целевой функции (цены в заявке) замыкающего генератора,
- степени влияния изменения мощности в узле на рассматриваемый фактор (загрузка РБУ для УР, переток активной мощности по сечению для ОС, модуль напряжения для ОН),
- степени влияния изменения предела ограничения на загрузку РБУ (для ОС и ОН),

На основании рассмотренной модели формирования МЛ, приняв, что параметры целевой функции определяются заявками поставщиков, можно сформулировать следующие свойства узловых равновесных цен рынка на сутки вперед (индикаторов балансирующего рынка):

1. Узловые цены формируются замыкающими поставщиками и отражают особенности УР, полученного в ходе оптимизации, аккумулируя в себе различные факторы.

2. Узловая цена разбивается на компоненты, каждая из которых имеет физическую и экономическую основы. Физическая интерпретация формируется с использованием откликов УР с РБУ и ОУР, экономическая определяется ценами замыкающих генераторов.

3. Узловые цены представимы с одной стороны в виде линейной комбинации параметров целевой функции, с другой стороны – в виде линейной комбинации влияния факторов УР, ОС и ОН.

4. При наличии активных сетевых ограничений или ограничений по напряжению к узловым ценам добавляются компоненты, которые могут как увеличивать их, так и уменьшать. В зависимости от влияния узловой мощности на переток мощности в контролируемом сечении или контролируемое напряжение и влияния ограничения на загрузку РБУ в отдельных узлах цены могут быть существенно выше максимальной или ниже минимальной из цен в заявках участников. Однако такие случаи на оптовом рынке регламентируются специальным образом.

## Выводы

1. Зачастую равновесные узловые цены оптового рынка электроэнергии трудно объяснить. Иногда может показаться, что цена в каком-либо из узлов не может сложиться на таком низком (или высоком) уровне или цены в соседних узлах не могут быть настолько различны. В данной статье предложено объяснение, почему цены складываются именно таким образом на основе физической интерпретации лежащих в их основе множителей Лагранжа к уравнениям баланса мощности в узлах ЭЭС.

2. Предложенный подход позволяет напрямую связать равновесные узловые цены и заявки участников рынка через коэффициенты связи, определяемые электроэнергетическим режимом, полученным в ходе оптимизации. Свойства электроэнергетического режима определяют отклик замыкающих генераторов на изменения в электроэнергетической системе, а цены в заявках показывают, как изменится целевая функция. Узловая цена определяется изменением целевой функции при покрытии последнего МВт нагрузки. Но кроме этого, показано, что узловую цену можно разбить по факторам: установившийся режим, сетевые ограничения, ограничения по напряжению.

3. На подробно рассмотренном примере ЭЭС из 30 узлов с одним из сложных случаев ценообразования, которые нередко возникают на оптовом рынке электроэнергии, продемонстрировано, что при изменении заявок генераторов, если установившийся режим сохраняется неизменным, коэффициенты связи также сохраняются, а узловые цены меняются предсказуемым образом.

## Список литературы

1. *Vaskovskaya T. A.* Datasets for explanation of physical interpretation for locational marginal prices. — 2016. — DOI: [10.5281/zenodo.59909](https://doi.org/10.5281/zenodo.59909).
2. *Васьковская Т. А.* Новая декомпозиция узловых цен на вклады ценообразующих заявок при оптимизации режимов электрических систем // *Электричество*. — 2015. — № 7. — С. 21—31.