

Билет 4 Формулировка задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования. Нарушение условий индивидуальной рациональности в задаче с бинарными переменными, моделирующими состояние оборудование.

Выбор состава генерирующего оборудования оказывает определяющее влияние на ценообразование в конкурентном рынке электроэнергии. Это продиктовано особенностями производства электроэнергии на современных электростанциях и вытекающими из этих особенностей процедурами планирования. Длительность цикла краткосрочного планирования составляет сутки. На предстоящие сутки оператор зоны централизованного управления (каковой является ЕЭС РФ), исходя из прогнозируемых условий почасового потребления, должен запланировать мощность электростанций, которые будут нести нагрузку для покрытия прогнозируемого потребления, а также будут находиться в резерве.

В процессе планирования оператор определяет, какие блоки станций будут включены, а какие выключены, т.е. определяет состав работающего оборудования. Пуски/остановы большинства блоков внутри суток явление скорее исключительное, поскольку по технологии требуется, как правило, несколько часов для подготовки блока к работе в нормальном диапазоне регулирования. Помимо этого блок при пуске несет дополнительные затраты топлива на технологические нужды, что сопоставимо с несколькими часами работы в нормальном режиме. После того, как выбор состава определен, в ценообразовании на рынке участвуют только пущенные блоки и станции. Все это говорит о том, что цена неоптимального выбора состава может оказаться дорогой для рынка.

Особенностью задачи с формальной точки зрения является ее дискретная природа и наличие сложных моделей, отражающих технологию и ценовые характеристики блоков электростанций. Одним из распространенных подходов к решению задачи является техника Лагранжевой релаксации. Все системные ограничения, связывающие разные блоки между собой, снимаются с помощью функции Лагранжа, а оставшиеся ограничения формируют набор независимых блочных подзадач, которые решаются, в том числе, методами динамического программирования. Такой подход зачастую не требовал описания блочных подзадач в форме задачи математического программирования с линейными ограничениями и с целочисленными переменными. Однако в последнее время возрос интерес именно к линейным целочисленным формулировкам данной задачи.

Введение

Рассматривается задача выбора состава включенного генерирующего оборудования (задача ВСВГО) при управлении энергосистемой в условиях конкурентного рынка электроэнергии Российской Федерации. Управление работой энергосистемы осуществляется диспетчерской службой в режиме реального времени, при этом обеспечивается баланс производства и потребления мощности в энергосистеме с учетом неопределенности изменения графика потребления. Управление режимами работы электростанций требует тщательного планирования, поскольку включение холодного энергоблока тепловой электростанции может занимать значительное время, а для уже включенных энергоблоков имеются ограничения по скорости набора и сброса нагрузки. В Российской Федерации функционирует конкурентный рынок электроэнергии и мощности. В условиях рынка планирование режимов работы энергосистемы осуществляется не только с учетом технологических ограничений электростанций, но и с учетом ценовых заявок поставщиков и потребителей электроэнергии.

Процесс краткосрочного планирования в Единой энергосистеме (ЕЭС) можно разделить на три этапа [1]. Обозначим через X операционные сутки, в течение которых происходит производство и поставка электроэнергии. На первом этапе, в сутки $X-2$, при помощи формализованной процедуры ВСВГО Системным оператором единой энергосистемы России осуществляется планирование включения в сеть и отключения от сети генераторов. Далее, в сутки $X-1$, проводится аукцион ценовых заявок поставщиков и потребителей электроэнергии (рынок на сутки вперед, РСВ) и определяются плановые графики работы генерирующего оборудования на сутки X . Плановый график работы генерирующего оборудования при уточненных прогнозных данных корректируется в балансирующем рынке (БР) в сутки X каждые два часа (планируется переход к расчетам каждый час).

При планировании графиков работы генерирующего оборудования в рынке на сутки вперед и в балансирующем рынке состав оборудования заранее известен участникам, что позволяет

сформулировать технологические ограничения тепловых электростанций в виде простых ограничений минимально и максимально возможной нагрузки генерирующего оборудования, а также ограничений скорости набора и сброса нагрузки. В процедуре выбора состава оборудования, напротив, состав оборудования заранее не известен, поэтому при построении математической модели данной процедуры все технологические ограничения электростанций необходимо заложить в формализованную математическую модель, чтобы полученный состав и плановый график работы генерирующего оборудования был технически реализуем с минимальными отклонениями от запланированного.

До 01.06.2014 г. планирование состава оборудования при помощи процедуры ВСВГО выполнялось в режиме недельного планирования с однократной корректировкой в середине недели. С 01.06.2014 г. действует регламент ежедневных расчетов ВСВГО в скользящем режиме. В этом режиме задача ВСВГО решается ежедневно в сутки $X-2$ на сутки X , $X+1$, $X+2$. При этом запланированный состав оборудования на сутки X носит окончательный характер и закладывается в предварительный диспетчерский график, а состав оборудования на сутки $X+1$ и $X+2$ может быть уточнен при следующих расчетах. Выбранный состав оборудования учитывается в дальнейшем при планировании нагрузки в рынке на сутки вперед и в балансирующем рынке.

Для решения задачи ВСВГО разработан программный комплекс, позволяющий автоматизировать все этапы решения задачи, включая загрузку и обработку исходных данных, проверку исходных данных на полноту и непротиворечивость, подготовку расчетной модели, решение задачи оптимизации, обработку и публикацию результатов расчета. В данной работе дается обзор моделей и алгоритмов, используемых при решении задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования, приводится описание и архитектура программного комплекса для решения задачи ВСВГО и рассматривается задача классификации причин пусков и остановов генерирующего оборудования, которая решается после задачи ВСВГО.

1. Постановка задачи выбора состава оборудования

Рассмотрим задачу ВСВГО с интервалами планирования $t = \overline{1, T}$. Обозначим через $s_{it}^u, s_{it}^d \in \{0, 1\}$ индикаторы работы, пуска и останова соответственно для генератора $i \in B$ в момент времени t , где через B обозначено множество генераторов в энергосистеме. Через $p_{it}^g \geq 0$ обозначим производство мощности генератором i в момент времени t . В общем виде задача выбора состава оборудования может быть сформулирована как задача минимизации стоимости работы, пусков и остановов генерирующего оборудования

$$(1) \quad \sum_{t=1}^T \sum_{i \in B} \{s_{it}^u \cdot \hat{C}_{it}^u + s_{it}^d \cdot \hat{C}_{it}^d + GenCost(s_{it}, p_{it}^g)\} \rightarrow \min_{s, s^u, s^d, p^g}$$

при наличии общесистемных ограничений баланса генерации и потребления с учетом потерь в сети

$$(2) \quad \sum_{i \in B} p_{it}^g = \hat{P}_t^c + Loss_t(p_t^g), \quad t = \overline{1, T}, \quad p_t^g = (p_{t1}^g, p_{t2}^g, \dots, p_{tn}^g, \dots), \quad i \in B,$$

и ограничений на максимальные потоки мощности по линиям электропередачи

$$(3) \quad Flow_{ik}(p_t^g) \leq \hat{F}_{ik}^{\max}, \quad t = \overline{1, T}, \quad k = \overline{1, N_t^{sec}},$$

где N_t^{sec} – общее число контролируемых сечений (групп линий электропередачи и трансформаторов, по которым задаются ограничения максимального потока мощности). Кроме общесистемных ограничений (2)-(3) также важно учитывать режимные и технологические ограничения электростанций (4)-(7). Полная постановка задачи ВСВГО с учетом всех технологических ограничений отдельных электростанций и общесистемных ограничений приводится в [2]. Выпишем соотношения, связывающие индикаторы пуска и останова с переменными состояния

$$(4) \quad s_{it}^u = \min(0, s_{it} - s_{t-1,i}), \quad s_{it}^d = \min(0, s_{t-1,i} - s_{t,i}), \quad t = \overline{1, T}, \quad i \in B,$$

и ограничения, задающие диапазон работы включенных генераторов

$$(5) \quad s_{ti} \cdot \hat{P}_{ti}^{\min} \leq p_{ti}^g \leq s_{ti} \cdot \hat{P}_{ti}^{\max}, t = \overline{1, T}, i \in B.$$

Участниками и Системным оператором могут задаваться ограничения режимов работы групп генерирующего оборудования $V_k \subseteq B, k = \overline{1, N^g}$, принадлежащих одной электростанции, например, ограничения на минимальное число генераторов во включенном состоянии

$$(6) \quad \sum_{i \in V_k} s_{ti} \geq \hat{M}_{tk}^{on} - w_{tk}^{on}, t = \overline{1, T}, i \in B,$$

или ограничения на минимальное и максимальное производство мощности

$$(7) \quad \hat{P}_{tk}^{g \min} \leq \sum_{i \in V_k} p_{ti}^g \leq \hat{P}_{tk}^{g \max}.$$

Данные ограничения могут быть вызваны, например, теплофикационными режимами работы, соображениями устойчивой работы электростанции или условиями обеспечения заданного уровня напряжения в узлах электрической сети. Кроме ограничений (6)-(7) совместных режимов работы для генераторов одной электростанции могут задаваться более сложные режимы работы составного генерирующего оборудования, такого как парогазовые установки или двухкорпусные блоки. Более подробная модель таких ограничений приведена в [2].

В условиях конкурентного рынка поставщики электроэнергии для участия в процедуре ВСВГО помимо собственных технологических ограничений подают ценовые заявки, в которых указываются пары объем-цена в отношении групп генерирующего оборудования, а также стоимость пуска отдельных генераторов. По правилам рынка участник предоставляет объем, указанный в заявке по цене не выше заявленной. Следует отметить, что цены в заявках, подаваемых участниками для ВСВГО, являются ограничением сверху для цен заявок генерирующего оборудования участника в рынке на сутки вперед, таким образом ограничиваются возможности поставщиков по манипулированию ценами на рынке.

В качестве критерия стоимости работы включенного генерирующего оборудования в задаче ВСВГО в настоящее время используется стоимость включенной мощности (стоимость электроэнергии плюс стоимость резерва, размещенного на включенных в сеть генераторах).

$$(8) \quad GenCost(s_{ti}, p_{ti}^g) = \hat{C}_{ti} \cdot \hat{P}_{ti}^{\max} \cdot s_{ti}, t = \overline{1, T}, i \in B.$$

Использование данного критерия позволяет минимизировать величину включенного резерва мощности в пределах задаваемого Системным оператором норматива, однако может привести к повышению цены на электроэнергию в рынке на сутки вперед или в балансирующем рынке вследствие первоочередного размещения нагрузки и резерва на генераторах, работающих в режиме вынужденных состояний. В качестве альтернативного критерия, применявшегося Системным оператором до 2011 г. и рассмотренного в работе [1], исследовался критерий минимизации стоимости производства электроэнергии

$$(9) \quad GenCost(s_{ti}, p_{ti}^g) = \hat{C}_{ti} \cdot p_{ti}^g \cdot s_{ti}, t = \overline{1, T}, i \in B.$$

На рис. 1 приведено сравнение индикативной цены [3], сформированной в модели балансирующего рынка на составе оборудования, отобранного в соответствии с критериями оптимальности (8) и (9). Для сравнения также приведена реальная цена, сформировавшаяся в балансирующем рынке за данные сутки. Следует отметить, что модельные цены построены с использованием заявок генераторов в ВСВГО, тогда как индикатор БР сформирован на заявках, подаваемых участниками позднее в рынок на сутки вперед и в балансирующий рынок.

В табл. 1 сравниваются параметры состава включенного генерирующего оборудования тепловых электростанций, сформированного в результате решения задачи ВСВГО с различными критериями оптимальности. Заметим, что в результате решения задачи с критерием минимизации стоимости производства электроэнергии имеется значительное превышение резерва на включенном генерирующем оборудовании по сравнению с нормативно заданной величиной в 1200 МВт.

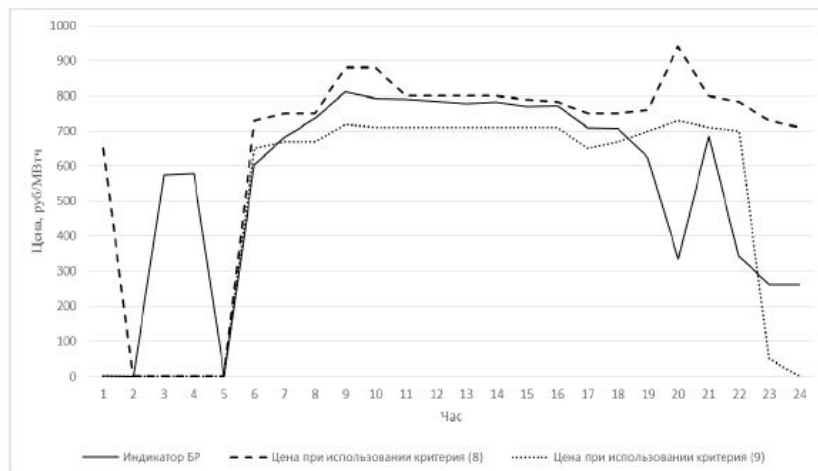


Рис. 1. Сравнение средней цены в рынке электроэнергии для энергосистемы Сибири при применении различных критериев стоимости в задаче ВСВГО.

Таблица 1. Сравнение параметров отобранного генерирующего оборудования для энергосистемы Сибири при применении различных критериев стоимости в задаче ВСВГО

Параметр	Критерий (8)	Критерий (9)
Мощность отобранного оборудования, МВт	13 220	14 204
Резерв мощности при нормативе 1200, МВт	1 209	2 070
Стоимость включенной мощности, руб.	231 427 497	249 843 256
Стоимость производства электроэнергии, руб.	144 240 733	141 416 444
Максимальная цена в рынке, руб./МВтч	941	730

Критерии стоимости (8) и (9) приведены в упрощенном виде для случая одноступенчатых заявок, подаваемых участниками в отношении каждого генератора. По правилам рынка [4] участникам разрешено подавать до трех пар объем-цена в отношении групп генерирующего оборудования, принадлежащих одной электростанции. Система при этом выбирает оптимальный по критерию стоимости состав включенного генерирующего оборудования с выполнением общесистемных и станционных ограничений. Дополнительно к парам объем-цена в заявках генераторов подается стоимость пуска $\hat{C}_{ii}^u$, которая выплачивается по факту исполнения требования пуска генератора, запланированного в результате решения задачи ВСВГО. При этом оплата производится только в том случае, если пуск был запланирован не по инициативе участника, т.е. для выполнения общесистемных ограничений (2)-(3) или для выполнения внутростанционных ограничений (6)-(7), задаваемых Системным оператором. В связи с этим возникает задача классификации инициатив, решаемая программным комплексом ВСВГО (см. раздел 3.3).

При использовании критерия минимизации стоимости включенной мощности (8) может производиться значительное число остановов генерирующего оборудования в часы кратковременного снижения потребления электроэнергии (например, в ночные часы) с последующими пусками в часы роста потребления. Для предотвращения остановки генераторов в часы минимальной нагрузки используется модельная стоимость останова $\hat{C}_{ii}^d$, не выплачиваемая участникам, но предотвращающая останов генераторов на незначительные (до $\hat{T}_i$ часов) интервалы времени

$$(10) \quad \hat{C}_{ii}^d = \hat{T}_i \cdot \hat{C}_{ii} \cdot \hat{P}_{ii}^{\max}, t = \overline{1, T}, i \in B.$$

2. Алгоритм решения задачи выбора состава оборудования

Сформулированная задача ВСВГО (1)-(8) является нелинейной частично целочисленной задачей математического программирования большой размерности. Ограничения (2) и (3) носят нелинейный характер, поэтому для постановки задачи в линейной форме выполним линеаризацию данных ограничений в окрестности некоторого установившегося электрического режима, соответствующего производству мощности $\hat{p}_t^g$ [2, 5]. Для того чтобы полученные в результате линеаризации коэффициенты соответствовали допустимому режиму работы энергосистемы, разработан алгоритм выбора значений $\hat{p}_t^g$, реализованный в программном комплексе ВСВГО. В линейном приближении соотношение баланса мощности в энергосистеме с учетом потерь в сетях (2) можно заменить соотношением

$$(2') \quad \sum_{i \in B} (1 - l_{ii}) \cdot p_{ii}^g = \hat{P}_t^c + \tilde{L}_t, \quad t = \overline{1, T}, \quad i \in B,$$

где через $l_{ii} = \partial \text{Loss}_i(p_i^g) / \partial p_{ii}^g$ обозначена производная функции потерь по нагрузке генератора $i \in B$ в момент времени t , а $\tilde{L}_t$ – постоянная величина, полученная при линеаризации. Аналогичным образом выписываются линейные соотношения для потока активной мощности по контролируемым сечениям

$$(3') \quad \sum_{i \in B} f_{iki} \cdot p_{ii}^g \leq \hat{F}_{ik}^{\max} + \tilde{F}_{ik}, \quad t = \overline{1, T}, \quad k = \overline{1, N_t^{\text{sec}}},$$

где через $f_{iki} = \partial \text{Flow}_{ik}(p_i^g) / \partial p_{ii}^g$ обозначена производная потока мощности через контролируемое сечение k по нагрузке генератора $i \in B$ в момент времени t , а $\tilde{F}_{ik}$ – постоянная величина, полученная при линеаризации.

В результате преобразования нелинейной задачи к линейному виду получим задачу частично целочисленного линейного программирования с критерием (1), (8) при ограничениях (2'), (3'), (4)-(7), характеристики которой приведены в табл. 2. Задачи аналогичной размерности возникают при моделировании процедуры выбора состава оборудования в рынке PJM (США) [6]. Процедуры решения таких задач в том или ином виде задействуют метод ветвей и границ, однако современные методы существенно используют при решении эвристические алгоритмы и методы отсечения для поиска допустимых субоптимальных решений [7, 8]. Из-за большого числа бинарных переменных в задаче ВСВГО ее точное решение на практике невозможно. Методы ветвления, используемые при решении данной задачи, позволяют получать на каждом шаге оценку оптимальности решения (MIP gap) через относительную невязку оптимальности, вычисляемую как

$$(11) \quad (\text{BestInteger} - \text{BestLP}) / \text{BestLP},$$

где BestInteger – значение целевой функции в наилучшем найденном целочисленном решении, BestLP – наилучшая оценка целевой функции, полученная путем релаксации ограничений целочисленности в алгоритме ветвления [7].

Таблица 2. Количество переменных и ограничений в задаче

Параметр	Значение
Общее число переменных в задаче	766 438
Число целочисленных бинарных переменных	68 085
Общее число ограничений	1 054 792
Число ненулевых элементов в матрице задачи	7 154 644

Проведенные испытания показывают, что решение задачи оптимизации ВСВГО с оценкой оптимальности MIP gap = 0,5% занимает приемлемое время (около 500 сек., см. рис. 2), дальнейшее увеличение точности ведет к существенному увеличению времени расчета. На практике неоптимальное решение задачи может приводить к нерациональным результатам как для индивидуальных участников рынка, так и для рынка в целом. Для выявления подобных результатов и

для классификации инициатив пусков и остановов генераторов разработаны алгоритмы [5], реализованные в программном комплексе ВСВГО.

Для регламентных расчетов ВСВГО приемлемое время решения задачи оптимизации составляет около одного часа, поэтому использование требования к невязке MIP gap в 0,5% позволяет решать задачу ВСВГО с допустимой точностью за время, не превышающее максимальное, даже в условиях сложных режимов работы энергосистемы.

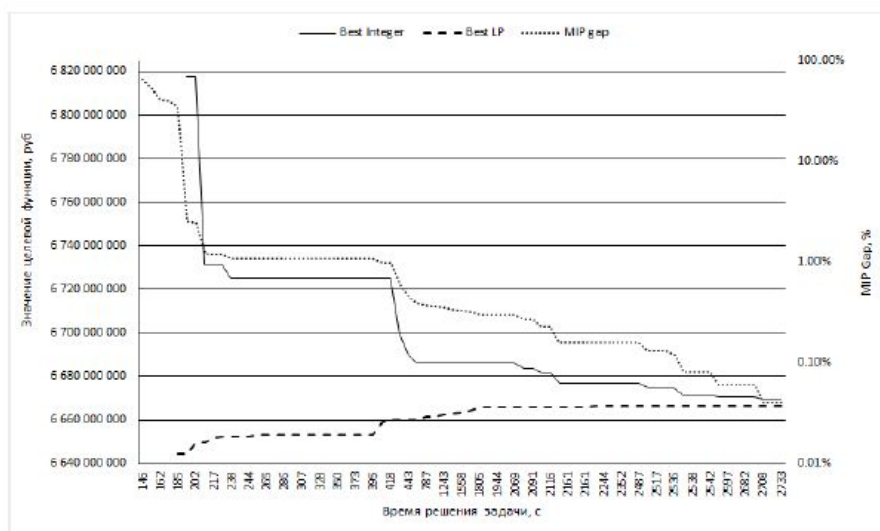


Рис. 2. Иллюстрация протокола решения задачи ВСВГО.

Больше информации для подготовки:

<https://drive.google.com/open?id=0B5DmX7JXGIWaNVJwOE1OdIB0TXc>