

conditions of becoming more frequent recurrence of scientific and technical development predetermined the system of researches, conducted an author in part of application in prognosis calculations, so-called «technological time». Forecast volumes of manufacture industries FEC of Russia, as well as new energy technology roadmap enables the State regulator to form a managerial decisions for development of fuel and energy complex of Russia.

Keywords: new calls and requirements, scientific and technical progress, world patent requests, new energy technologies, alternative energy, global energy development trends, forecasts of energy consumption, route map of new technologies, decisions of the State regulator.

Author: Plakitkin Yury A., Dr.Sc.Econ., Prof., Deputy Director for scie. work, Institute of Energy Research of the Russian, **Moscow**, E-mail: uyn@eriras.ru.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫБОРА СОСТАВА ВКЛЮЧЕННОГО ГЕНЕРИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КОНКУРЕНТНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РОССИИ

Селезнев А.В.

ООО «Карана», г. Москва

alexey.seleznev@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО), возникающая при краткосрочном планировании режимов работы энергосистемы. В условиях конкурентного рынка выбор состава оборудования осуществляется ежедневно путем решения задачи минимизации общей стоимости производства электроэнергии на базе ценовых заявок участников. Задача выбора оборудования является нелинейной частично целочисленной задачей оптимизации большой размерности, содержащей значительное число бинарных переменных и нелинейных ограничений. Для решения задачи выбора состава оборудования разработан программный комплекс, позволяющий автоматизировать все этапы решения. В работе приводится описание архитектуры программного комплекса, дается обзор его функций, а также рассматриваются алгоритмы решения задачи выбора оборудования и классификации инициатив пусков и остановов. На примере модельной задачи для энергосистемы Сибири приводится сравнение различных целевых функций при постановке задачи выбора оборудования.

Ключевые слова: ВСВГО, выбор состава генерирующего оборудования, рынок электроэнергии.

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 электростанции 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 $s_{ti}, s_{ti}^u, s_{ti}^d \in \{0, 1\}$ индикаторы работы, пуска и останова соответственно для генератора $i \in B$ в момент времени t , где через B обозначено множество генераторов в энергосистеме. Через $p_{ti}^g \geq 0$ 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

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

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

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

и ограничений на максимальные потоки мощности по линиям электропередачи

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

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

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

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.

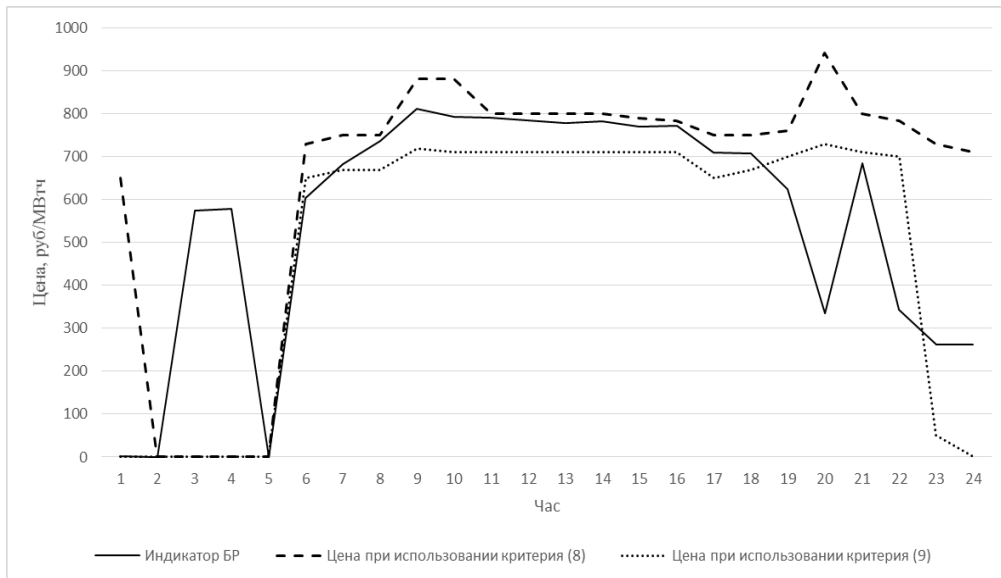


Рис. 1. Сравнение средней цены в рынке электроэнергии для энергосистемы Сибири при применении различных критериев стоимости в задаче ВСВГО.

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 $\hat{C}_{ti}^u$, 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 останова генераторов в часы минимальной нагрузки используется модельная стоимость останова $\hat{C}_{ti}^d$, не выплачиваемая участникам, но предотвращающая останов генераторов на незначительные (до $\hat{T}_i$ часов) интервалы времени

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

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

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

где через $l_{ti} = \partial \text{Loss}_t(p_t^g) / \partial p_{ti}^g$ 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

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

где через $f_{tki} = \partial \text{Flow}_{tk}(p_t^g) / \partial p_{ti}^g$ обозначена производная потока мощности через контролируемое сечение k по нагрузке генератора $i \in B$ в момент времени t , а $\tilde{F}_{tk}$ – 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.

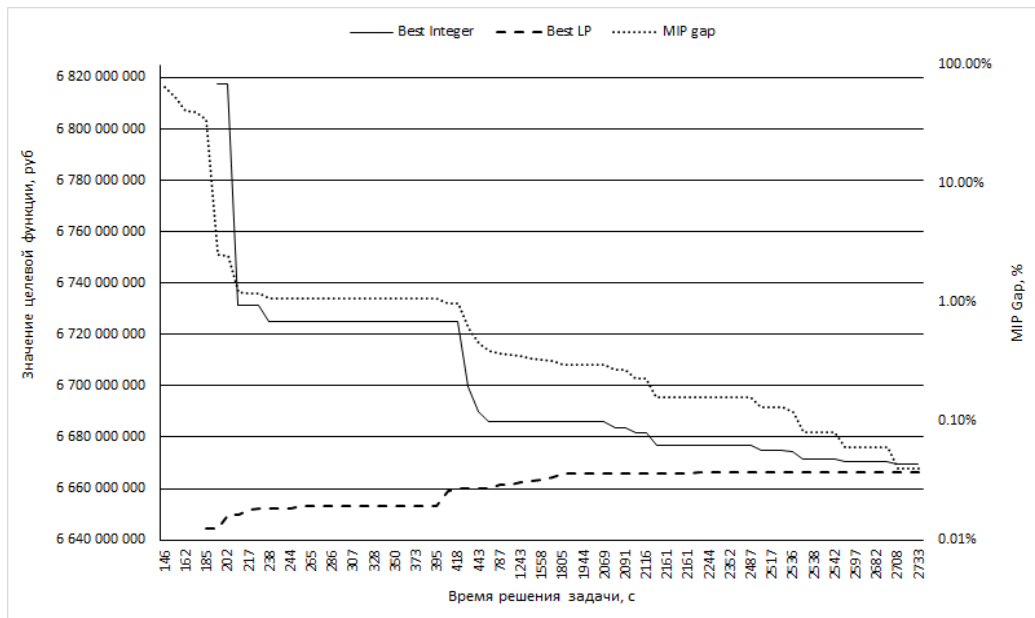


Рис. 2. Иллюстрация протокола решения задачи ВСВГО.

3. Программный комплекс для решения задачи ВСВГО

3.1. Общее описание программного комплекса

Для решения задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования разработан специализированный программный комплекс, установленный в Системном операторе. Перечислим ниже основные задачи, решаемые программным комплексом ВСВГО.

- Сбор, интеграция и обработка данных о топологии электрической сети, технологических и режимных ограничениях генерирующего оборудования, уровне потребления электроэнергии, ограничениях пропускной способности сети, заявках генерирующего оборудования. Данные поступают из внешних систем в различных временных регламентах, в задачу программного комплекса входит обработка и визуализация полученного массива информации для дальнейшего контроля со стороны технологов, управляющих процессом расчета ВСВГО.

- Проверка полученных данных на наличие типичных ошибок, анализ ограничений на режимы работы генерирующего оборудования, определение генераторов, работающих в режиме вынужденных состояний. На этапе проверки выявляются некорректно заданные ограничения, которые не могут быть выполнены в результате решения задачи ВСВГО. Также выявляются вынужденные пуски и остановки генерирующего оборудования, что позволяет оценить общую картину до начала расчета и определить изменение состояний генерирующего оборудования в результате некорректно заданных технологических ограничений.

- Подготовка расчетной модели ВСВГО, расчет матриц сетевых коэффициентов и формирование матрицы задачи ВСВГО в виде задачи частично целочисленного линейного программирования.

- Решение частично целочисленной задачи выбора состава оборудования.
- Расчет электрического режима на выбранном составе оборудования. При расчете режима применяется модель, аналогичная модели балансирующего рынка электроэнергии [1].
- Классификация инициатив пусков и остановов генерирующего оборудования в результате решения задачи ВСВГО.

- Анализ результатов расчета с использованием формируемых технологом сценариев. Модуль анализа результатов позволяет оценить решение, предложенное системой по принципу «что если» путем внесения изменения в отобранный состав оборудования и анализа с точки зрения нарушения системных ограничений или изменения целевой функции.

- Формирование результатов расчета в виде отчетных таблиц и публикация результатов во внешних системах с целью доведения их до участников и диспетчерских центров. Опубликованные результаты расчета используются в дальнейшем для задания предварительных диспетчерских графиков с использованием уточненных технологических ограничений участников, а затем и в рынке на сутки вперед и в балансирующем рынке.

3.2. Архитектура программного комплекса ВСВГО

Программный комплекс ВСВГО построен на основе многослойной архитектуры и состоит из отказоустойчивого кластера серверов приложений, системы управления базами данных (СУБД), вычислительного кластера и веб-интерфейса для доступа технологов расчета и администраторов системы. Данные из внешних информационных систем поступают с использованием различных технологий информационного обмена, в том числе через веб-службы, прямое обращение к внешним СУБД или через файловые адаптеры. Результаты расчета размещаются на сайте балансирующего рынка [9], публикуются в автоматизированной системе информационного обмена между диспетчерскими центрами и участниками рынка («Модес-Terminal»), рассылаются по электронной почте и формируются в виде отчетов для утверждения службой планирования режимов и главным диспетчером. На рис. 3 представлена укрупненная структурная схема программного комплекса для решения задачи ВСВГО.



Рис. 3. Структурная схема программного комплекса ВСВГО.

Для задач, поддающихся распараллеливанию, разработана система управления вычислительным кластером, позволяющая организовать расчеты на вычислительной системе, содержащей один или несколько вычислительных узлов. Примерами таких задач, решаемых программным комплексом, являются задачи анализа исходных данных, классификации инициатив, задача расчета электрических режимов и задача линеаризации и подготовки матриц частично целочисленной задачи ВСВГО. Система управления вычислительным кластером осуществляет мониторинг доступности узлов и степени их загрузки, производит распределение задач по узлам для достижения оптимального уровня нагрузки на вычислительную систему. При решении регламентных задач ВСВГО применяются системы от двух до четырех вычислительных узлов с общим числом процессорных ядер от 8 до 64.

3.3. Задача классификации инициатив

В отношении каждого генератора участниками рынка подается стоимость пуска $\hat{C}_{ti}^u$, которая выплачивается рынком участнику в результате успешного исполнения требования пуска генератора. При этом необходимо классифицировать причины, по которым был произведен пуск, поскольку часть пусков генерирующего оборудования носит нерыночный характер и производится для выполнения технологических ограничений самих участников. Оплата за такие пуски не производится. Также необходимо различать пуски для выполнения ограничений Системного оператора, задаваемых в отношении отдельных электростанций, и оптимизационные пуски, которые производятся для выполнения общесистемных ограничений баланса генерации и потребления, ограничений резервов или пропускной способности сетей, а также для замещения уже работающего, более дорогого генерирующего оборудования. Оплата пусков для ограничений, задаваемых Системным оператором, производится по заданному тарифу в отличие от оптимизационных пусков, которые оплачиваются по полной стоимости, задаваемой самим участником. Классификация инициатив существенно снижает возможности участников по манипулированию рынком, поскольку исключает из числа оплачиваемых те пуски, которые производятся в условиях отсутствия конкуренции.

После приведения к линейному виду задача ВСВГО является частично целочисленной задачей линейного программирования. Для таких задач из-за разрыва двойственности, в отличие от задач линейного программирования, невозможно оценить влияние ограничений на решение исходной задачи путем анализа решения двойственной задачи математического программирования. Для оценки влияния общесистемных ограничений применяется подход, основанный на построении ценовых индикаторов, позволяющих объяснить решение задачи выбора оборудования с точки зрения индивидуально-рациональных стратегий участников [5, 10]. При анализе внутростанционных ограничений, задаваемых Системным оператором или самим участником, применяется подход, основанный на решении иерархической системы задач.

Рассмотрим задачу для генераторов отдельной электростанции $E \subseteq B$, где B – множество генераторов в задаче ВСВГО. Обозначим через s_t и p_t^g переменные состояния для генераторов электростанции E :

$$(12) \quad s_t = (s_{ti_1}, s_{ti_2}, \dots, s_{ti_n}), p_t^g = (p_{ti_1}^g, p_{ti_2}^g, \dots, p_{ti_n}^g), t = \overline{1, T}, i_k \in E, k = \overline{1, n}.$$

Для данных генераторов в каждый момент времени t участником или Системным оператором задаются различные ограничения режимов работы

$$(13) \quad F_{tr}(s_t, p_t^g) \leq 0, t = \overline{1, T}, r \in R = \{1, 2, \dots, N^{\infty}, N^{\infty} + 1, \dots, N^{\infty} + N^{yq}\}.$$

Эти ограничения могут задаваться для различных, возможно пересекающихся, групп генерирующего оборудования, поэтому при анализе влияния ограничений требуется рассматривать все генераторы электростанции в целом. Кроме ограничений режимов работы (12) модель станции предусматривает также технологические ограничения, например, ограничения на минимальное время в работающем или остановленном состоянии, функционирование парогазовых установок и т.п. Подобные ограничения формируют связь переменных состояния между различными часами, не позволяя рассматривать задачу классификации инициатив для каждого часа в отдельности:

$$(14) \quad F^{\text{техн}}(s_1, \dots, s_T, p_1^g, \dots, p_T^g) \leq 0.$$

После решения задачи ВСВГО для генераторов электростанции E получим состояния генераторов в каждый момент времени $\bar{s}_t$. Это решение удовлетворяет ограничениям (13)-(14), т.е. существует такой график работы генерирующего оборудования $\bar{p}_t^g$, что данные ограничения выполнены. Тогда для классификации причин нахождения каждого генератора во включенном состоянии ($\bar{s}_{ti} = 1$) применим следующий алгоритм.

Алгоритм

1. Положим $k := 1, \bar{s}_t^0 := \bar{s}_t, R := \{1, 2, \dots, N^{\infty}, N^{\infty} + 1, \dots, N^{\infty} + N^{yq}\}$.
2. При ограничениях (13)-(14) решим задачу минимизации стоимости включенной мощности

$$(15) \quad \sum_{t=1}^T \sum_{i \in E} \hat{C}_{ti} \cdot s_{ti} \cdot \hat{P}_{ti}^{\max} \rightarrow \min_{s_t: s_{ti} \leq \bar{s}_{ti}^{k-1}}.$$

3. Обозначим решение задачи (15) через $\bar{s}_{ti}^k$. Если $R \neq \emptyset$, то положим $R := R \setminus \{k\}$, $k := k + 1$ и перейдем к п.2, иначе завершим работу алгоритма.

В результате работы алгоритма получим множество решений задачи ВСВГО для отдельной электростанции при последовательном выключении ограничений (13). Если для генератора i выполняется условие $\bar{s}_{ti}^k = 1$, $\bar{s}_{ti}^{k+1} = 0$, то будем считать, что этот генератор включен для выполнения ограничения k (при $k = 1$ включен «по оптимизации»). Алгоритм классификации причин нахождения генераторов в отключенном состоянии устроен аналогичным образом.

Пример работы алгоритма приведен в табл. 3 на основе решения модельной задачи ВСВГО, по размерности и количеству параметров аналогичной задаче, применяемой в регламентных расчетах.

Таблица 3. Классификация причин нахождения генераторов во включенном или отключенном состоянии по итогам решения задачи ВСВГО

Состояние	Причина	Количество генераторов	Мощность генераторов, МВт
Откл	По оптимизации	322	28 773
Откл	Вынужденный режим или снят с оптимизации	256	24 085
Откл	$P_{\max}$ по требованию станции	2	153
Вкл	По оптимизации	90	16 767
Вкл	Вынужденный режим или снят с оптимизации	291	20 273
Вкл	Минимум генераторов по требованию СО	25	3532
Вкл	Минимальная включенная мощность (СО)	3	470
Вкл	Минимум генераторов по требованию станции	287	32 688
Вкл	$P_{\min}$ по требованию станции	48	4 977

Заключение

Задача выбора состава включенного генерирующего оборудования является примером нелинейной частично целочисленной задачи математического программирования, возникающей при управлении энергосистемой в условиях конкурентного рынка. Алгоритмы решения задачи и анализа результатов, описанные в работе, позволяют на практике решать задачу ВСВГО для единой энергосистемы Российской Федерации, обеспечивая функционирование регламентной процедуры выбора состава оборудования. Для решения этой задачи под руководством автора работы создан специализированный программный комплекс (ПО ВСВГО), где автором непосредственно разработана математическая модель ограничений работы электроэнергетической системы с учетом резервов и пропускной способности сетей, а также модель технологических ограничений отдельной электростанции [2]. Кроме того, автором разработаны и реализованы алгоритмы и методы решения задачи, описанные в данной работе, алгоритмы проверки исходных данных и классификации инициатив, а также модули управления расчетной подсистемой и автоматизированные рабочие места технолога и администратора системы.

Дальнейшее развитие программного комплекса ВСВГО направлено на повышение скорости и точности расчетов путем снижения размерности задачи на основе предварительного анализа внутристанционных и общесистемных ограничений, а также на совершенствование алгоритмов апостериорного анализа результатов расчета.

Литература

1. Давидсон М.Р., Догадушкина Ю.В., Крейнс Е.М. и др. Математическая модель управления энергосистемой в условиях конкурентного оптового рынка электроэнергии и мощности в России // Изв. РАН. ТиСУ. 2009. №2. – С.84-94.
2. Селезнев А.В. Динамическая задача выбора состава оборудования при управлении энергосистемой в условиях конкурентного рынка электроэнергии // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. №4.
3. Давидсон М.Р., Догадушкина Ю.В., Крейнс Е.М. и др. Математическая модель конкурентного оптового рынка электроэнергии в России // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. №3. – С.72-83.
4. Приложение №3.1 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка. Регламент проведения расчетов выбора состава генерирующего оборудования. <http://www.np-sr.ru/regulation/joining/reglaments/index.htm?ssFolderId=165>.

5. Давидсон М.Р., Селезнев А.В. Математическая модель расчета ценовых индикаторов в задаче выбора состава генерирующего оборудования в условиях конкурентного рынка электроэнергии в России // Изв. РАН. ТлСУ. 2014. №3. – С.61-70.
6. Streiffert D., Philbrick R., Ott A. A Mixed Integer Programming Solution for Market Clearing and Reliability Analysis // Power Engineering Society General Meeting. 2005. V.3. – P.2724-2731.
7. Bixby R.E., Fenelon M., Gu Z., Rothberg E., Wunderling R. MIP: Theory and Practice – Closing the Gap. <http://miplib.zib.de/paper/bixbyfenelonrothbergwunderling2000.pdf>.
8. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, CPLEX User's Manual, Version 12 Release 4. – P.207-258. <http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r4/topic/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf>.
9. Сайт балансирующего рынка электроэнергии. <http://br.so-ups.ru/Public/MainPageData/VSVG/GenEquipOptions.aspx>
10. Gribik P.R., Hogan W.W., Pope S.L. Market-Clearing Electricity Prices and Energy Uplift. http://www.hks.harvard.edu/fs/whogan/Gribik_Hogan_Pope_Price_Uplift_123107.pdf.

UNIT COMMITMENT SOFTWARE FOR THE RUSSIAN COMPETITIVE ELECTRICITY MARKET

Abstract. A short-term unit commitment problem is considered. On the competitive market, the unit commitment problem is solved daily to minimize the total cost of production based on the bid prices of generation companies. Unit commitment problem is a large scale nonlinear mixed integer programming problem with large count of binary integers and nonlinear constraints. Special unit commitment software for the Russian electricity market has been developed and considered in this paper.

Keywords: unit commitment, electricity market.

Author: Seleznev Alexey V., software developer, Carana Ltd, Moscow, E-mail: alexey.seleznev@gmail.com.

ТЕМПОРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА БУДУЩЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Реут Д.В.

МВТУ им. Н.Э.Баумана, МИФИ, г. Москва

dmreut@gmail.com

Аннотация: Важным событием в современной энергетике представляется готовящаяся реализация замкнутого цикла ядерного топлива. Как сверхдлинный разомкнутый, так и замкнутый жизненный цикл ядерного топлива становится естественным фундаментом техно-социо-экономических стратегий, программ, проектов развития атомной промышленности. Специфика отрасли диктует нетривиальную привязку предметной и управленческой деятельности к базовому процессу, течение которого подлежит обустройству и сопровождению. Эта специфика определяется экстремальной продолжительностью процессов трансформации ядерного топлива в течение транзитивизационного технологического цикла. Ситуация требует проведения нового вида исследования – темпорального анализа. Отмеченные особенности заставляют говорить о «новой» или «будущей» энергетической отрасли. Наиболее рациональным механизмом вписывания этой отрасли в ткань народного хозяйства представляется эстафета интеллектуальных кластеров.

Ключевые слова: замкнутый цикл, жизненный цикл, атомная энергетика, интеллектуальный кластер, ранги бесконечности, эстафетное сопровождение.

Введение

Отечественным ученым Г.Б.Клейнером предложена следующая четырехчастная классификация [1]:

- 1) Ограниченная в пространстве и ограниченная во времени система (пример: проект).
- 2) Неограниченная в пространстве и ограниченная во времени система (пример: процесс).
- 3) Ограниченная в пространстве и неограниченная во времени система (пример: объект).
- 4) Неограниченная в пространстве и неограниченная во времени система (пример: среда).

Представленный классификатор нуждается в ряде оговорок.

А) Процесс (пункт 2) полагается в данной классификации ограниченным во времени, поскольку его поддержание требует ресурсов, которые бесконечными быть не могут. Иначе бы осуществилась идея вечного двигателя. Как известно, рассмотрение заявок на подобные устройства прекращено.

Б) Объект (пункт 3) полагается здесь идеальным типом. В отличие от него любой технический объект имеет ограниченный срок службы, по истечении которого он демонтируется либо