

DOI:

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ НА КРУПНОЙ ТЭЦ СО СЛОЖНЫМ СОСТАВОМ ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ РЫНОЧНЫХ ТРЕБОВАНИЙ¹

Аракелян Э.К., Андрюшин А.В., Ягупова Ю.Ю., Неклюдов А.В., Мезин С.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Россия, г. Москва ул. Красноказарменная д.14

Edik_arakelyan@inbox.ru, YagupovaYY@mpei.ru

Аннотация: рассматриваются особенности математической модели оптимизации распределения тепловой и электрической на крупной ТЭЦ со сложным составом оборудования в составе традиционных теплофикационных агрегатов и теплофикационной ПГУ. Приводится выбор и обоснование критериев оптимизации на разных этапах подготовки и выхода станции на рынок электроэнергии и мощности. Анализируются недостатки ранее предложенных алгоритмов оптимального распределения применительно к ТЭЦ со сложным составом оборудования и со сложной схемой отпуска электроэнергии и тепла. Предложены методика и алгоритм решения поставленной задачи на базе эквивалентирования оборудования ТЭЦ и декомпозиции задачи с учетом схем выдачи электроэнергии и тепла. Дано описание математических методов оптимизации с учетом особенностей режимов работы ПГУ на пониженных нагрузках. Даны требования к информационному обеспечению при интеграции разработанного алгоритма в прикладное программное обеспечение АСУТП на базе ПТК.

Введение

Эффективность является одним из важнейших направлений развития существующих технологических процессов. В статье будет описана методика, позволяющая находить режимы работы оборудования производства, обеспечивающие его максимальную эффективность с учётом технологических ограничений. Критерием эффективности производства будет выступать величина маржинальной прибыли, получаемой от производственных мощностей.

При построении оптимизационной модели необходимо учитывать особенности метода оптимизации. Задача актуальна для режимной оптимизации основного и вспомогательного оборудования электростанций в широком диапазоне нагрузок. В работе описывается построение оптимизационной модели ТЭС, на основании которой производится расчёт режимов, обеспечивающих её максимальную эффективность.

В качестве примера сложного технологического процесса рассматривается тепловая электрическая станция (ТЭС). Тепловая электрическая станция производит тепло и электроэнергию, используя в качестве топлива основной и резервный вид топлива (газ и мазут). Для большинства ТЭС России характерно изменение присоединенных тепловых нагрузок в зависимости от сезона и погодных условий. ТЭС имеет договора на покупку топлива и продажу электроэнергии и тепла. Маржинальная прибыль определяется как разница между объёмом денежных средств, поступивших за продажу электроэнергии и тепла, и перечисленных за используемое топливо. Прибыль станция получается от продажи электроэнергии на рынке РСВ (рынок на сутки вперед). Цена электроэнергии РСВ обладает высокой волатильностью. Поэтому возникает потребность в регулярном планировании режимов работы оборудования. При работе на рынке РСВ состав включённого генерирующего оборудования определён. Решение задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО) производится заранее. Горизонт планирования ВСВГО может варьироваться то 2-х до 5 суток.

При планировании режимов эксплуатации тепловых электрических станций (ТЭС) в краткосрочной перспективе (от нескольких часов до нескольких недель) обычно учитываются следующие требования:

- Производство и распределение между генерирующими единицами заданного количества электроэнергии
- Отпуск заданной мощности в соответствии с плановым графиком для каждой группы точек поставки генерации
- Отпуск тепла внешним потребителям в соответствии с плановым графиком поставки тепла.
- Обеспечение необходимого уровня чистоты окружающей среды.

¹ Исследование проводится при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-19-00601.

При планировании режимов эксплуатации тепловых электрических станций на более длительной перспективе к уже сформулированным требованиям необходимо добавить

- Снижение ежегодных издержек на эксплуатацию оборудования
- Учёт выполнения плановых мероприятий, обеспечивающий требуемый уровень надёжности элементов эксплуатируемого оборудования.
- Обеспечение надёжной работы энергосистемы
- Тепловая электрическая станция может иметь несколько составляющих дохода:
- Доход от продажи электроэнергии на рынке на сутки вперед (РСВ) и балансирующем рынке (БР), от продажи тепла, а также продажи электроэнергии по регулируемым договорам (РД).
- Доход от продажи мощности в секторе рынка конкурентного отбора мощности (КОМ).
- Доход за участие в рынке системных услуг (услуг по обеспечению системной надёжности)

К затратам относятся:

- Переменные затраты: оплата стоимости использованного топлива, экологический сбор
- Постоянные затраты (заработная плата персонала, траты на обслуживание оборудование и ремонтные компании, и т.д.)
- Штрафы за невыполнение обязательств
- Маржинальная прибыль определяется как разница между доходом и расходом.

Предполагается, что переменные затраты станция компенсирует за счёт продажи электроэнергии на рынках РСВ и БР, а также договорам РД. Постоянные затраты станция обеспечивает за счёт продажи мощности в секторе рынка КОМ.

Доход и расход от продажи электроэнергии и тепла является основным оптимизируемым параметром для максимизации маржинальной прибыли электростанции. Внутростанционное планирование режима работы оборудования является краткосрочным (от нескольких часов до нескольких суток).

В случае, когда состав оборудования уже согласован с системным оператором и задан диспетчерский график, решается задача оптимального ведения режима (оперативное планирование). В этом случае целью оптимизации является минимизация стоимости используемого топлива и экологического сбора при условии ведения режима в соответствии с диспетчерским графиком и выполнению требований по тепловым отборам внешним потребителям.

В случае, когда станция осуществляет планирование режима на сутки вперед - состав оборудования задан. Решается задача максимизация величина разницы дохода и расходов с учётом стоимости электроэнергии на рынке при ограничениях, связанных с обеспечением требований по тепловым отборам внешним потребителям.

В случае, когда станция планируется режим на несколько суток вперед, возможно варьировать состав оборудования. Решается задача выбора состава включенного генерирующего оборудования.

Высокая волатильность цен на рынке электроэнергии формирует потребность в регулярном планировании режимов работы оборудования, а также формирует ограничения на время выполнения оптимизации. Задача актуальна для режимной оптимизации основного и вспомогательного оборудования электростанций в широком диапазоне нагрузок.

Участие в секторе рынка конкурентного отбора мощности станции сводится к подаче ценовой заявки о стоимости единицы генерируемой мощности. Заявка формируется и подаётся раз в год. Далее ТЭС работает в соответствии с установленным тарифом. Доходная часть в этом секторе становится фиксированной. Расходной частью будут ремонтные компании, которые чаще всего регламентированы. Оптимизация в этой части сектора рынка заключается в выборе оптимального времени проведения ремонтных компаний. Данная задача относится к задачам долгосрочного планирования. Сроки проведения ремонтных компаний строго согласуется с системным оператором центрального диспетчерского управления.

Рынок системных услуг позволяет электрической станции участвовать в процессах обеспечении надёжности энергосистемы. Оптимизация режимов работы оборудования, участвующего в рынке системных услуг, вызвана неравномерностью графиков электрических нагрузок в рамках объединённых энергетических систем (ОЭС) или зон свободного перетока (ЗСП). Изменение структуры электропотребления привели к увеличению неравномерности электрических нагрузок. Уменьшается доля нагрузки промышленных производств, в то время как доля потребления на коммунальные нужды и сельское хозяйство расчёт. В ночное время нагрузка уменьшается до минимального значения, а в дневные часы достигается максимум нагрузок. Одной из особенностей графиков электрических нагрузок является увеличение скорости изменения нагрузок. Для обеспечения резерва мощности энергосистемы, состояния энергетических агрегатов (котлы, турбины, генераторы)

могут быть в различных состояниях резерва: оперативный, холодный, горячий. В целом, основными состояниями энергетических агрегатов считаются: работа, резерв, плановый профилактический ремонт (ППР), вынужденный (аварийный) простой. Состояния, через которые агрегат проходит из одного состояния в другое (пуск, остановка, работа) называют промежуточными. В каждом состоянии агрегат имеет свой характер работы, что влияет на экономичность и надёжность.

1 Формирование оптимизационной модели

При формировании оптимизационной модели, производится декомпозиция оборудования станции на группы элементов. Далее каждая группа элементов описывается в виде элемента оптимизационной модели. В настоящее время для режимов ТЭЦ применяются различные методы оптимизации, а выбор математического аппарата зависит от типов турбоустановок, способов представления энергетических характеристик турбин, структуры отпуска тепла со станции. К ним относятся методы: линейного программирования, динамического программирования, смешанно-целочисленного линейного программирования (СЦЛП) и другие.

В качестве основных элементов оптимизационной модели технологического процесса используются котлы, турбины, коллектор пара высокого, низкого давлений. Вспомогательное оборудование учитывается в виде поправок на характеристики основного оборудования и в виде дополнительных собственных нужд. Оптимизационная модель строится для периода времени, разбитого на несколько интервалов. Описание элементов оптимизационной модели должно быть сформировано для каждого интервала времени. Формирование пространственно-временной оптимизационной модели необходимо для учёта динамических ограничений таких как скорость набора и сброса нагрузки. Также необходим учёт интегральных ограничений по объёму используемого топлива на рассматриваемый период.

Оптимизационная модель может быть использована для решения задач:

- планирование режимов работы оборудования с учётом цены РСВ на сутки вперед;
- решение задачи выбора состава включенного генерирующего оборудования (ВСВГО);

Решение задачи ВСВГО выполняется до 5 суток, погрешность прогноза цены электроэнергии составляет в среднем 6-10%. Прогноз цены РСВ является одним из основных показателей, на основании которых выполняется планирование.

К этапам формирования оптимизационной тестовой модели ТЭС относятся: формирование топологии станции; формирование уравнений связи между компонентами; задание энергетических характеристик (ЭХ) оборудования станции; введение временных рядов, определяющих ограничения по режимам работы оборудования станции; формирование целевой функции для решения задачи оптимизации.

2 Учет экологических и надёжностных факторов

Как правило, все методы основаны на однокритериальном подходе, таком как минимизация расхода топлива, а другие факторы не рассматриваются или же берутся в виде ограничений. К таким факторам относятся экологические требования, экономические и надёжностные характеристики оборудования. Вместе с тем очевидно, что и показатели экономичности и надёжности энергетического оборудования имеют тенденцию к ухудшению как во времени, так и от режимов их эксплуатации. Так, известно, что энергоблок, вышедший из капитального ремонта и такой же блок, отработавший после капитального ремонта несколько лет, как по экономичности, так и по надёжности имеют различные показатели. Проблема заключается в отсутствии методических положений по учету указанных долгосрочных факторов. Это приводит к тому, что при выборе состава генерирующего оборудования за несколько суток вперед без учета долгосрочных показателей зачастую приводит к большому риску аварийного останова, либо к неоправданным затратам топлива.

Учет нескольких различных факторов в задаче оптимизации приводит к тому, что целевая функция может иметь достаточно сложный характер. В данном случае применение часто используемых в практике методов решения задачи оптимизации, к примеру, метода динамического программирования или метода множителей Лагранжа затруднительно. Поэтому в данной модели планируется применить метод смешанно-целочисленного линейного программирования (СЦЛП), где минимизируется целевая функция, а компоненты представлены в виде множества переменных, связанных между собой равенствами и неравенствами, также присутствует ограничение на область допустимых значений.

Решая задачу оптимизации режимов работы оборудования станции, можно принять некоторые допущения: величины, отражающие внешние и внутренние балансовые связи (выработка

электроэнергии и тепла, например), считаются в каждый момент времени; принимается, что запасов топлива на станции достаточно для бесперебойной работы всей станции в период рассматриваемого времени; а величины, отражающие внешние ограничения (экологические ограничения, ограничения по водопотреблению, показателям по надежности электро- и тепло- снабжения) считаются заданными.

Оптимизационная функция, учитывающая технико-экономический, экологический и надежностный факторы может быть представлена как:

$$(1) F(x) = \lambda_1 * F_1(x_i) + \lambda_2 * F_2(x_j) + \lambda_3 * F_3(x_k)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$$

где $F_1(x_i)$, $F_2(x_j)$, $F_3(x_k)$ - критерий оптимальности соответственно по технико-экономическим показателям (минимальные затраты на топливо или на тепло и т.п.); надежности (обеспечивает минимизацию затрат на обеспечение заданной надежности электро и теплоснабжения); экологическому фактору (не превосходит допустимых норм, которые могут меняться при неблагоприятных метеорологических условиях; λ_1 , λ_2 , λ_3 - весовые коэффициенты соответствующих критериев; x_i , x_j , x_k - параметры оптимизации.

При работе в базовых режимах в случае соблюдении условий по допустимым выбросам отдается предпочтение критерию $F_1(x_i)$, в условиях недостатка мощностей и при наличии на станции оборудования, отработавшего расчётный ресурс - $F_2(x_j)$, при неблагоприятных метеорологических и других условиях, требующих максимальное снижение выбросов с дымовыми газами при соблюдении балансовых уравнений по мощности и выработке электроэнергии - $F_3(x_k)$.

При работе электростанции на частичных нагрузках, когда выбросы с дымовыми газами значительно ниже расчетных, а также при благо приятных метеоусловиях значение весовых коэффициентов λ_1 , λ_2 следует выбирать, исходя из реального технического состояния оборудования.

При создании комплекса программ, обеспечивающих решение столь сложных задач, на ТЭЦ можно применять способ декомпозиции - разбиение сложной оптимизационной задачи на несколько связанных между собой подзадач, образующих систему алгоритмов, куда входит: распределение тепловой и электрической нагрузки при фиксированных расходах сетевой и циркуляционной воды; формирование вариантов распределения заданной тепловой нагрузки с учетом ограничений каждого источника; расчет надежностных характеристик электро и теплоснабжения как ограничивающего фактора и другие.

Для учета экологического фактора для заданных подзадач формируется оптимальное распределение электрической и тепловой нагрузки в виде эквивалентной характеристики расхода топлива. Далее для каждой точки характеристики рассчитываются выбросы по каждой дымовой трубе, затем рассчитываются суммарные выбросы в районе расположения и сравниваются с предельно допустимой концентрацией (ПДК). Если же суммарные выбросы меньше предельно допустимой концентрации, тогда полученное ранее решение принимается за оптимальное и формируется режим работы оборудования.

При учете фактора надежности по оптимальным критериям экономичности и экологии выбирается ряд вариантов, мало отличающихся между собой по значению критериев. Затем на основе выбранного критерия надежности (вероятность нахождения энергоблока в рабочем состоянии, коэффициент готовности и т.д.) анализируются заданные или прогнозируемые состояния, полученные с помощью выбранных подзадач. После чего выбирается вариант с наилучшим надежностным показателем и по нему формируется режим работы оборудования.

Учет фактора надежности при выборе оптимального состава работающего оборудования можно проводить по двум направлениям:

- по критериям экономичности и экологии, результаты корректируются требованиями обеспечения заданной надежности в виде обязательных ограничений, во всех рассматриваемых вариантах:
- в виде условных ограничений, которые характеризуются некоторыми экономическими функциями и учитываются при формировании экономического критерия выбора оптимального состава.

В случае невыполнения условий по экологии или заданной надежности формируется пакет мероприятий (режимных, организационных и т.д.) по снижению вредных выбросов или увеличению уровня надежности из числа возможных в реальных условиях станции.

3 Учет особенностей работы ПГУ

Особенную актуальность задача поиска оптимального режима оборудования станции имеет для ТЭЦ со сложным составом оборудования, в том числе и ПГУ по причине того, что ресурсные характеристики и динамика их изменения во времени для традиционных паровых турбин и газовых турбин значительно отличаются между собой, что требует учета этих факторов при многокритериальном решении задач оптимизации режимов работ оборудования ТЭЦ, в частности, при выборе способов резервирования мощности агрегатов при прохождении провалов нагрузок в графиках энергопотребления. Но при проведении выбора стратегии проведения технического обслуживания и ремонта учитывались изменение показателей экономичности и надежности работы оборудования ТЭС во времени. Оптимальное управление режимами работы энергетического оборудования - это решение актуальной для современной энергетики двух взаимосвязанных задач: выбора состава генерирующего оборудования и оптимальное распределение заданной тепловой и электрической нагрузки между генерирующим оборудованием с учетом его текущего состояния.

4 Требования к информационному обеспечению

В настоящее время разработаны различные методики и программные комплексы для внутристанционной оптимизации режимов работы оборудования. К сожалению, они не нашли широкого применения в эксплуатации. Причиной сложности использования их в эксплуатации является значительная доля ручного ввода исходных данных для выбора оптимального режима при каждом изменении задания. Это обусловлено отсутствием интерфейсов взаимодействия между программными комплексами и системами автоматизации, установленными на электростанциях.

Целью проводимых исследований является усовершенствование методического, технического и информационного обеспечения АСУТП на базе современных программно-технических комплексов для практической реализации в автоматизированном режиме задачи оперативного управления режимами работы оборудования электростанции. При этом критерием оптимизации помимо достижения минимального расхода топлива (или суммарных затрат на топливо, максимальная прибыль станции и т.д.) по станции в целом, максимально эффективно использовать оставшийся ресурс оборудования. Этого можно достичь, если при выборе состава генерирующего оборудования, особенно при решении проблем прохождения провалов графиков энергопотребления, помимо критериев экономичности и надежности, учесть также фактор, характеризующий общее снижение ресурса генерирующего оборудования, как в краткосрочном, так и в долгосрочном интервалах времени. При этом, конечно, появляется необходимость мониторинга текущего состояния оборудования, учета изменения ресурса каждого агрегата при различных режимах его работы, но при этом можно достичь комплексного решения как проблем экономичности и надежности, так и максимального ресурсосбережения.

Заключение

Представленная методология позволяет производить расчет оптимального режима работы оборудования с учётом технологических ограничений не только в соответствии с критерием максимума маржинальной прибыли, но и с учетом фактора надежности и экологичности.

Особенностью и отличием предлагаемых исследований в данном направлении является так же и то, что рассматриваться будут ТЭС со сложным составом оборудования, включая теплофикационные блоки и агрегаты, и парогазовые установки (ПГУ).

Кроме того, необходимо учитывать особенности работы ТЭЦ в рыночных условиях, при выходе электростанций на рынок электроэнергии и мощности. Необходимо рассматривать оптимизационные задачи для всех трех этапов работы ТЭЦ на рынке: выбора состава работающего оборудования, выбора оптимальной загрузки ТЭЦ на рынке на сутки вперед (РСВ) и оптимизация на балансирующем рынке (БР) при наборе дополнительной электрической нагрузки.

Литература

1. Аракелян Э.К., Пикина Г.А.; под ред. Щедеркиной Т.Е. – 2-е изд., перераб. и доп. Оптимизация и оптимальное управление: учеб. пособие /– М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. Иванов Н.С. Теоретические и практические предпосылки создания программного обеспечения для оптимизации распределения нагрузок на ТЭС
3. Иващенко В.А., Фомин И.Н., Шульга Т.Э. Математическая модель и алгоритм оперативного управления генерирующим оборудованием ТЭС

4. *Andryushin A.V., Arakelyan E.K., Neklyudov A.V., Yagupova Y.Y. and Drobyshev T.O.* A formation of an approach to solving the problem of selecting the composition of the included generating equipment
5. *Andryushin A.V., Arakelyan E.K., Neklyudov A.V., Yagupov J.Y.,a Dolbikova N.S., Kokhova O.K.* Method of the Optimal Distribution of Heat and Electrical Loads
6. *Кудрявый В.В.* Комплексная оптимизация режимов работы электростанций с учетом факторов экономичности, экологии и надежности