

**ПОСТАНОВКА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ****Цыганаш В. Е., Белоиваненко Ю. С., Зверев В. М.**

Сформулированы и проанализированы основные проблемы решения задачи оптимального управления мощным теплоэнергетическим объектом. Для подсистем объекта выбрана единая определяющая переменная, благодаря которой разработан общий критерий оптимального управления, опробованный в промышленных условиях для менее сложной системы и открывающий перспективу сведения оптимизационной задачи к задаче выбора предпочтительной инициативы. Сформулирована критериальная функция, позволяющая разделить сигналы по частотным свойствам, позволяющая лучше согласовывать динамические особенности оператора и системы, что создает условия для более полного учёта динамических свойств объекта управления.

Сформульовані і проаналізовані основні проблеми розв'язання задачі оптимального управління потужним теплоенергетичним об'єктом. Для підсистем об'єкта вибрана єдина визначальна змінна, завдяки якій був розроблений загальний критерій оптимального управління, випробуваний в промислових умовах для менш складної системи і відкриваючий перспективу зведення оптимізаційної задачі до задачі вибору кращої ініціативи. Сформульовано критериальна функція, що дозволяє розділити сигнали за частотними властивостями, що дозволяє краще узгоджувати динамічні особливості оператора і системи, що створює умови для більш повного врахування динамічних властивостей об'єкта управління.

The main problems of solving the problem of optimal control of a powerful heat and power facility are stated and analyzed in the article. Object subsystems a single variable thanks to developed a general criterion for optimal control, tested in an industrial environment for less complex systems and offer ins the challenge of information optimization problem to select the preferred initiative is selected. The criterion function, which allows to separate signals on the frequency properties, which allows to coordinate better the dynamic features of the operator and the system that creates conditions for better integration of the dynamic properties of the control object is formulated.

Цыганаш В. Е.

канд. техн. наук, доц. кафедры АПП ДГМА
app@dgma.donetsk.ua

Белоиваненко Ю. С.

ассистент кафедры АПП ДГМА

Зверев В. М.

нач. цеха ООО «Краматорсктеплоэнерго»

УДК 681.52.136

Цыганаш В. Е., Белоиваненко Ю. С., **Зверев В. М.**

ПОСТАНОВКА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) как объект управления достаточно сложна и отличается рядом особенностей [1].

1. На процесс влияет большое число входных переменных, определяющих качественные показатели. Входными переменными могут быть: характеристики материалов, сжигаемых в топке котла электростанции, или характеристики сырья, подаваемого в мельницу; скорость подачи материалов в объект; температура, давление пара в котле; электрическое напряжение или ток, на передающей стороне электропередачи и т. д.

2. Ряд входных переменных могут лишь контролироваться, т. е. только измеряться, но ими нельзя управлять по воле оператора. Не поддаются обычно управлению, например, характеристики топлива, воды, которые подаются в объект.

3. На процесс воздействуют более или менее существенные случайные возмущения, которые не могут быть ни измерены, ни предсказаны [2]. Среди них могут быть атмосферные условия, старение агрегатов и т. д. Зачастую неизвестна даже физическая сущность случайных возмущений, но их влияние на процесс может оказаться весьма существенным. К неизвестным случайным помехам прибавляется и сравнительно низкая точность контроля и регистрации технологических переменных.

4. Процесс осуществляется в весьма длинных технологических цепочках, часть звеньев которых охватывается обратными связями – всё это создаёт дополнительные трудности для управления, так как возникает необходимость учёта динамики объекта, например, в виде времени эквивалентного запаздывания [3].

5. На ряд входных и выходных переменных обычно налагаются технологические и эксплуатационные ограничения, за пределами которых получается либо недопустимое понижение качества готового продукта, либо даже срыв технологического процесса.

Для повышения требований к качеству работы такого энергообъекта, а именно: его устойчивости, надежности, быстродействия, расширения его функциональных возможностей необходим поиск принципиально новых путей совершенствования процесса управления.

Целью настоящей работы является постановка и обоснование задачи оптимального управления технологическим режимом ТЭЦ с более высокими требованиями к быстродействию, простоте, надежности и эффективности.

Отмеченные особенности свидетельствуют о том, что необходима разработка непростой системы управления, состоящей из большого количества элементов, включающих сложные взаимосвязи частей и сложные условия работы. Однако и в такой сложной системе имеются положительные факторы, позволяющие за счет простоты и доступности регулирования производственного и теплофикационного отбора пара оперативно реагировать на изменение текущего режима ТЭЦ таким образом, чтобы наиболее эффективно управлять всей производимой энергией. Этому, в частности, способствует более полное использование пара, отдавшего часть своей энергии турбине и в дальнейшем используемого для сталеплавильного производства (пароэжекторный насос), для внутренних нужд станции, города и других потребителей. Но такой системой может быть только система оптимального управления, состоящая из отдельных подсистем.

При достаточно медленном изменении характеристик в некоторых подсистемах можно строить первичное управляющее устройство согласно теории оптимальных систем, снабдив

его, однако, изменяемыми параметрами. Вторичное управляющее устройство – оптимизатор, – наблюдая работу подсистемы, должно изменять параметры первичного устройства так, чтобы система в целом оставалась близкой к оптимальной, несмотря на непредвиденное изменение характеристик управляемого объекта.

Если же характеристики подсистемы изменяются сравнительно быстро, то подсистема, работающая согласно указанному выше принципу, может оказаться далёкой от оптимальной. В этом случае возникает задача отыскания наилучшего алгоритма поиска оптимальных методов управления, задача создания оптимальной системы автоматического поиска либо, вообще, оптимальной системы автоматического приспособления.

Таким образом, важнейшим требованием в процессе управления является оптимальное использование на каждом этапе или режиме функционирования системы всех располагаемых ресурсов (энергетических, информационных, вычислительных и др.) для достижения главной для этого этапа цели при соблюдении множества ограничений. Другими словами, требуется оптимизация «в большом», осуществляемая в реальном времени в процессе управления [4]. Несмотря на то, что такой подход порождает ряд проблем, задач и методов их решения, прежде всего, следует отметить, что оптимизация в «большом» в реальном масштабе времени требует полного использования имеющейся априорной информации в виде модели управляемого процесса, заданной в той или иной форме. Но располагаемой априорной информации обычно недостаточно для осуществления оптимизации «в большом» в процессе управления. Необходимым является также оптимальное и субоптимальное оценивание параметров и характеристик по экспериментальным данным – идентификация. Особо важной является параметрическая идентификация, выполняемая в реальном масштабе времени в эксплуатационных режимах объекта управления. Для упрощения решения этой задачи очень важным является выбор определяющей переменной, которая охватывала бы все подсистемы, характеризовала сущность процесса энергопреобразования, допускала точное измерение в реальных условиях и отражала интересы потребителя.

Проведем декомпозицию технологического процесса для упрощенного варианта ТЭЦ как системы и выделим определяющую переменную. Для этого рассмотрим структурную схему объекта (рис. 1).

Она содержит три подсистемы. В каждой подсистеме можно выделить энергоснабжающую часть («источник питания» – $ИП_i$) и, связанную с ней энергопотребляющую часть («нагрузка» – $Н_i$), где $i = 1, 2, 3$. В свою очередь, части отдельных подсистем также связаны между собой аналогичным образом, образуя однородную многостадийную систему. Если вскрыть эти объективно существующие взаимосвязи и учесть полезность системы в целом, то в качестве количественной характеристики степени выполнения системой своего функционального назначения удобно выбрать мощность потока, связывающего эти взаимодействующие части.

Эта характеристика не только является определяющей переменной, служащей объективной мерой для оценки системы, но и придаёт системе целый ряд других важных свойств. Прежде всего, она позволяет сформировать аналитическое выражение для критерия оптимального управления, определить частные критерии платы за полезность, расширить функциональные возможности системы и увеличить её надёжность. Кроме того, она достаточно просто связана аналитически с наиболее общим показателем эффективности энергопользования, а именно, с коэффициентом полезного использования (КПИ), который определяет долю полезно потреблённой энергии в расходе первичного природного энергоресурса.

По значению КПИ судят о совершенстве энергоснабжающего процесса в целом, включая его научно-технический уровень, организацию управления и культуру эксплуатации. В свою очередь, КПИ определяется как произведение частных коэффициентов полезного действия (КПД) различных звеньев энергоснабжающего процесса. По соотношению частных КПД судят об энергетической эффективности каждого звена [2].

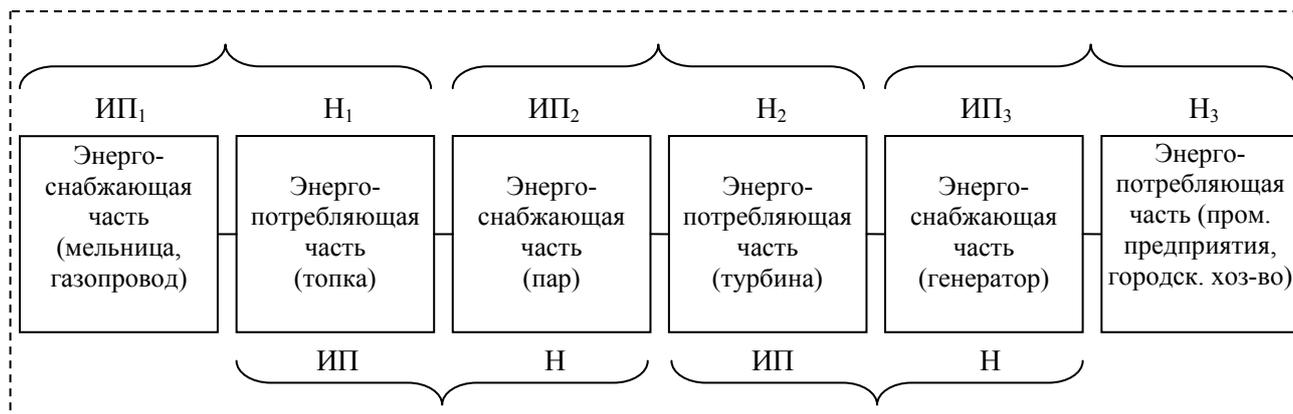


Рис. 1. Декомпозиция энергообъекта на подсистемы «Источник питания» (ИП) и «Нагрузка» (Н)

Общим недостатком этих показателей является то, что в них отсутствует информация, которую в режиме реального времени удобно непосредственно использовать для управления процессом энергопреобразования. По-видимому, при введении нового показателя (критерия), устраняющего этот недостаток и сохраняющего лучшие свойства КПИ и КПД, необходимо учитывать взаимосвязь технологических и энергетических режимов. В качестве такого критерия подходит характеристика эффективности энергоблока, определяемая отношением полезно используемой мощности $P_n(t)$ к подведенной от источника питания мощности $P_H(t)$, где t – время. Этот критерий:

$$K_n(t) = \frac{P_n(t)}{P_H(t)}$$

характеризует текущее значение коэффициента использования мощности источника питания и энергопотребителя в целом, т. е. он дает совместную текущую оценку эффективности энергоснабжающего и энергопреобразующего звеньев процесса энергопотребления с учетом энергоперетоков между звеньями. При определенных условиях он равен КПД. Его практическая ценность обусловлена тем, что он успешно может быть использован при разработке и внедрении более эффективных систем управления. На первый план при этом выходит главное его достоинство, заключающееся в том, что он комплексно характеризует не только собственно текущие мощности подсистем $ИП_i$ или $Н_i$, но и взаимные мощности, связывающие эти подсистемы. Благодаря этому $K_n(t)$ полнее характеризует энергопотребитель как систему, описывая не только подсистемы ИП и Н, но и отношения между ними.

В его основе лежит уравнение баланса мощностей, что придает ему объективность и избавляет от субъективизма. Так для отдельной подсистемы можно записать:

$$P_n(t) = P_H(t) - P_{nom}(t) - \Delta P_P(t),$$

где $P_H(t)$ – можно рассматривать как мощность, которую может развить источник питания в данный момент времени и при данных условиях; $P_{nom}(t)$ – мощность потерь; $\Delta P_P(t)$ – недоиспользованная мощность источника питания, возникающая в результате отклонения от оптимального режима работы подсистемы.

Очевидно, что при правильном выборе $P_H(t)$ и $\Delta P_P(t) = 0$ в подсистеме поддерживается оптимальный технологический режим:

$$P_{II}(t) = P_{II}(t)_{max}.$$

При этом траектория, образованная значениями $P_{\Pi}(t)_{\max}$, дрейфует в фазовой области. В настоящее время оперативное измерение этих смещений максимума мощности для управления не производится из-за трудной реализации такого измерения.

Положение оптимальной траектории можно оперативно определять и поддерживать на ней изображающую точку, если моделировать смещения максимума мощности в фазовой области. При этом с помощью модели лучше определять не $P_n(t)$, а нормированные её значения, т. е. $K_n(t)$. Тогда при оптимальном управлении подсистемой должно выполняться условие:

$$K_n(t) = \frac{P_H(t) - P_{\text{пот}}(t) - \Delta P_P(t)}{P_H(t)} \rightarrow \max$$

при ограничениях на переменные подсистемы.

Обозначив через $K_{ni}(t)$ коэффициенты использования мощности в отдельных подсистемах, можно получить общий коэффициент использования мощности для всего энергоблока $K_{n3}(t)$:

$$K_{n3}(t) = K_{n1}(t) \cdot K_{n2}(t) \cdot K_{n3}(t) = \frac{P_{n3}(t)}{P_H(t)},$$

где $P_{n3}(t)$ – полезно используемая мощность в третьей подсистеме. Особенности её в том, что она зависит от полезных мощностей и предыдущих подсистем. Тогда при оптимальном управлении энергоблоком должно выполняться условие:

$$K_{n3}(t) \rightarrow \max$$

при ограничениях на переменные энергоблока и отдельных подсистем.

Таким образом, цепочечная структура объекта, выбор единой определяющей переменной и аналогия взаимосвязей в системе значительно упрощают аналитическую формулировку оптимизационной задачи для объекта в целом.

Дальнейшее упрощение оптимизационной задачи в значительной степени зависит от выбора метода оптимизации. Подчеркнём, что в данном случае наибольшие перспективы связаны с максимизируемым функционалом, с его апостериорной коррекцией. Обусловлено это тем, что необходима оптимизация управления процессом, описываемым нелинейными моделями, поэтому прямая «параметрическая оптимизация» здесь невозможна, а субоптимизация затруднена, между тем как оптимизация через функционал осуществима и позволяет ограничиться небольшой мощностью функционала.

Неплохие перспективы для упрощения решения оптимизационной задачи предоставляют и большие объёмы априорной информации, накопленные за предшествующий период работы ТЭЦ. Они позволяют вести решение задачи в два этапа. На первом этапе удобно формировать из имеющейся априорной информации программную траекторию для текущего режима работы энергоблока, а на втором этапе обеспечить поддержание технологического процесса таким образом, чтобы изображающая точка, характеризующая процесс, могла перемещаться по программной траектории с учетом поддержания и оптимального режима в системе [3].

Такой подход оказывается возможным, если удастся каким-либо образом расщепить систему на подсистемы более низкого порядка и исследовать каждую из подсистем независимо друг от друга. Такое расщепление системы составляет суть «метода разделения движений» [5]. В данном случае «разделение движений» уже произведено. Оно совпадает с организационным разделением объекта управления на подсистемы (рис. 1). Эти подсистемы могут быть исследованы независимо друг от друга благодаря тому, что разделение движений осуществляется на основе предположения, что переходный процесс по быстрым координатам (к положению равновесия, определяемому медленной координатой) происходит много

быстрее, чем изменяется медленная координата, в качестве которой используется мощность, развиваемая в первой подсистеме. По этой упрощённой нелинейной модели системы и даётся качественная характеристика объекта управления.

Апостериорную коррекцию программной траектории по ходу процесса энергопреобразования при этом удобно осуществлять с помощью оптимизатора, функции которого может выполнять лицо, принимающее решения (ЛПР), т. е. человек-оператор. Для успешной реализации этих функций необходимо благоприятное сочетание возможностей ЛПР с особенностями технологического процесса. Для этого достаточно, чтобы человек-оператор мог обеспечивать проведение апостериорной коррекции без запаздывания последовательно, начиная с третьей подсистемы. Выполнение этого условия и становится возможным при разделении движений на медленные и быстрые с учетом реакции человека-оператора.

Выбор в качестве определяющей переменной мощности создаёт условия для первого этапа разделения движений на медленные и быстрые, так как умножение переменных типа «потока» на переменные типа «потенциала» даёт произведение переменных (мощность), занимающее более широкий частотный диапазон, чем каждая из составляющих произведения. Для некоторых объектов и условий их работы такого разделения движений оказывается достаточно. Так, применение этого подхода для дуговой сталеплавильной печи ДСП-12 позволяет улучшить условия работы для оператора, сократить количество поломок электродов и время расплавления шихты [6]. Если же расширения диапазона разделения движений за счет перехода к мощности оказывается недостаточно, то его можно расширить за счет применения модели, выполненной в форме экстремального принципа [3].

ВЫВОДЫ

Выбор в качестве определяющей переменной мощности, обусловлен тем, что эта переменная может быть единой мерой оценки состояния всех трех подсистем. Её измерение по составляющим и фильтрация, с одной стороны, и управление и регулирование, с другой стороны, находятся друг с другом в замечательной взаимосвязи, выражающейся в виде принципа двойственности.

Сформулирована однородная критериальная функция для рассматриваемых подсистем, обеспечивающая разделение сигналов по частотным свойствам и позволяющая лучше согласовывать динамические особенности оператора и системы, что создает условия для более полного учёта динамических свойств объекта управления.

На основе разработанной критериальной функции может быть сформирована модель процесса энергопреобразования, обеспечивающая перспективу решения оптимизационной задачи «в большом» и позволяющая разделить процесс решения на два этапа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плетнев Г. П. *Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций* / Г. П. Плетнев. – М. : Энергоиздат, 1981. – 368 с.
2. Цыганаш В. Е. *Анализ задачи оптимального управления процессом преобразования энергии в турбоагрегате* / В. Е. Цыганаш, В. М. Зверев, Ю. С. Белоуваненко // *Радиоэлектроника. Информатика. Управление.* – 2007. – № 2(18). – С. 151–154.
3. Цыганаш В. Е. *Особенности двухэтапного решения оптимизационной задачи для сложной технологической системы* // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2005. – № 6. – С. 105–109.
4. *Справочник по теории автоматического управления* // Под ред. А. А. Красовского. – М. : Наука. гл. ред. физ.-мат. лит, 1987. – 712 с.
5. Геращенко Е. И. *Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем* / Е. И. Геращенко, С. М. Геращенко. – М. : Наука, 1975. – 296 с.
6. Цыганаш В. Е. *Исследование и разработка структуры управления дуговой печи для производства слитков крупных поковок.* // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. праць.* – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 594–598.

Статья поступила в редакцию 24.10.2011 г.