

## ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ И ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭНЕРГООБЛОКА ПГУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РЕЖИМНЫХ И ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ<sup>1</sup>

Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев (Иваново)

### Введение

Современные автоматизированные системы управления (АСУТП) электростанциями – особый класс многофункциональных иерархически построенных сложных систем управления. Рассматриваемые системы управления технологическими процессами строятся на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры и служат единым системообразующим компонентом информационно-технологической среды управления энергоблоком. При этом задача синтеза многофункциональных АСУТП затрагивает многие известные научные направления в области системного и обобщенного термодинамического анализа, теории многокритериальных систем управления и целый ряд других междисциплинарных задач и вопросов. Особенно остро междисциплинарные проблемы проявились при освоении инновационных парогазовых технологий (энергоблоков с парогазовыми установками (ПГУ)). Энергоблоки с ПГУ существенно поднимают эффективность использования топливо-энергетических ресурсов (расчетные оценки КПД энергоблоков с ПГУ достигают 50-60 %). Однако опыт эксплуатации, экспериментальные исследования показывают, что эффективность использования топлива весьма чувствительна к вариации множества режимных и внешних факторов: техническому состоянию тепломеханического оборудования, климатическим условиям. Одним из таких факторов является температура наружного воздуха, ее естественные отклонения от расчетной (+15<sup>0</sup>С) ведут к снижению эффективности использования топлива и к неоправданным (до 10% КПД) потерям. Применение методов математического моделирования теплоэнергетических объектов позволяет многие проблемные вопросы, возникающих в процессе создания и эксплуатации автоматизированного оборудования, решать своевременно на более ранних стадиях проектирования [1-4].

В настоящем докладе рассматриваются ключевые моменты создания имитационной модели сложного объекта, связанные с разработкой методики настройки и получением интегрированной оценки меры адекватности многопараметрической модели (полимодельного комплекса) энергоблока с ПГУ при изменяющихся внешних и режимных условиях.

### Основной результат

Разработке математической и имитационной моделей энергоблока с ПГУ предшествовало выполнение следующих задач.

1. Поиск и исследование критических факторов, существенно влияющих на эффективность использования топлива в газотурбинных и парогазовых установках.

Показано, что таким критическим фактором являются случайно изменяющиеся параметры внешней среды, вариация которых приводит к неконтролируемым вариациям режимных параметров энергоблока (температуры уходящих газов за камерой сгорания и ГТУ, активной мощности ГТ и др.), неэффективной работе ГТУ, утилизационной части ПГУ и энергоблока в целом [3,5].

<sup>1</sup> Исследования выполнялись при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-48-03215)

2. Обобщенный термодинамический анализ эффективности тепломеханического оборудования (ТМО) энергоблока ПГУ в аспекте проблемы структурного синтеза фундаментальных систем автоматического управления сложным объектом в части теоретического обоснования вектора необходимых для контроля параметров энергоблока ПГУ.

Показано, что обобщенными координатами, характеризующими состояние энергоблока как термодинамической системы, служат режимные параметры энергоблока: перепад давлений на установке, давление воздуха, а также обобщенные (комплексные) координаты – массовый расход воздуха и тепловой поток уходящих (дымовых) газов за ГТ [1].

Решение этих двух актуальных задач определило полноту разработки математической и имитационной модели энергоблока ПГУ с оперативным (в режиме реального времени) расчетом показателей технической эффективности.

Математическая модель энергоблока с ПГУ как комплекса взаимосвязанного оборудования включает следующее оборудование и процессы в них протекающие:

- компрессор ГТУ (процесс сжатия воздуха, расчеты объема поступающего воздуха, распределения воздуха на охлаждения газовой турбины);
- камера сгорания ГТУ (химические процессы сжигания топлива, расчеты объема окислителя для топлива, параметров выходящих дымовых газов);
- газовая турбина ГТУ (процесс расширения дымовых газов, расчеты неконтролируемых и нерегулируемых «присадок» холодного воздуха из компрессора);
- котел-утилизатор (границы образования пароводяной смеси в поверхностях нагрева, рециркуляция конденсата, материальные балансы воды и пара в барабанах высокого и низкого давлений);
- паровая турбина (процесс расширения пара);
- конденсационная установка (процесс конденсации пара).

При разработке математической модели применен феноменологический подход, который в своей теоретической основе базируется на законах сохранения неравновесной термодинамики и результатах обобщенного термодинамического анализа эффективности энергоблока ПГУ. Это позволило использовать фундаментальную физико-математическую основу и строго оценить влияние принимаемых допущений на качество конечного результата [1, 2, 6, 7].

Разработанная структура математической модели является открытой, т.е. технология ее построения предусматривает возможность простых переходов от упрощенных структур к более полным, с выделенными инвариантной и варьируемой частями, что, в свою очередь, позволяет моделировать работу энергоблока, при различном составе оборудования.

Модель представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния, дополнительно включающая в себя расчет тепловых потоков дымовых газов и массового расхода воздуха поступающего в компрессор ГТУ. Реализована математическая модель в универсальной среде имитационного моделирования Vis\_Sim (рис. 1).

Оценка меры адекватности математической модели (полимодельного комплекса) выполнена по следующей методике [8,9]:

- 1) оценка адекватности математической модели энергоблока по результатам тепло гидравлического расчета с использованием статическим данных, полученных по результатам тепло- гидравлических расчетов оборудования при нагрузке ГТУ 75 и 100%;

- 2) оценка адекватности математической модели энергоблока по экспериментальным характеристикам с использованием трендов испытательного и эксплуатационного режимов;
- 3) оценка адекватности математической модели энергоблока по режимной карте.

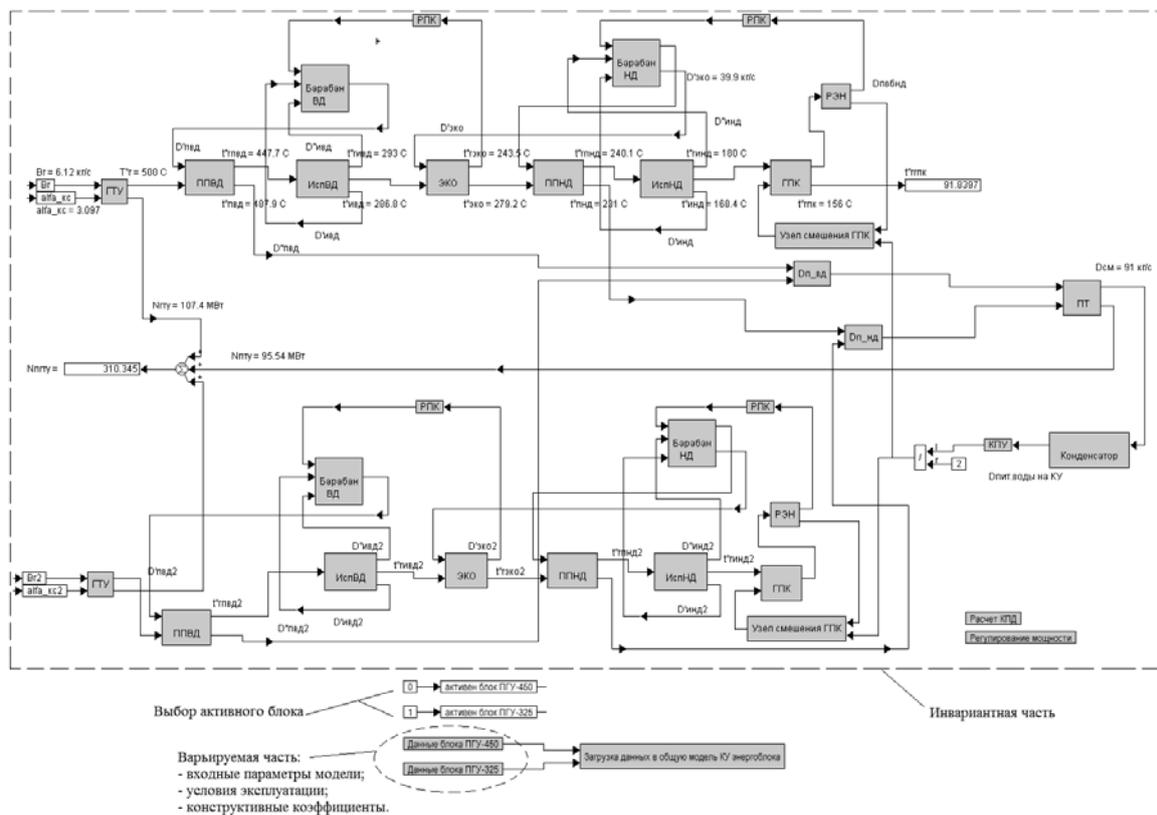


Рис. 1. Структура имитационной модели (комплекса) энергоблока ПГУ

### Выводы

1. Разработана методика настройки сложной многопараметрической модели (полимодельного комплекса) энергоблока с ПГУ при изменяющихся внешних и режимных условиях, отличающаяся тем, что в процессе настройки модели уточняются параметры изменяемой (варьируемой) части модели, а ее инвариантная часть остается без изменений, а именно: уточняются начальные условия и коэффициенты модели, подстраиваются входные параметры модели, уточняются перепады давлений в поверхностях нагрева, корректируются начальные условия интегрирования, проверяются результаты модели в режиме, соответствующему тепловому расчету (до и после изменяющихся внешних и режимных условиях), тестируются переходные процессы при изменении нагрузки.

2. Оценка меры адекватности математической модели энергоблока с ПГУ, работающего в широком диапазоне нагрузок, выполнена путем сравнения результатов вычислительных экспериментов с реальными трендами архива АСУТП энергоблока. Показано, что примененная методика позволяет получить интегрированную оценку меры адекватности полимодельного комплекса и использовать полученные результаты на ранних стадиях проектирования систем управления.

**Литература**

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн.1. Проблемы и задачи. Кн.2. Проектирование. Кн.3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн.1 – 260с. – Кн.2 – 436 с. – Кн.3 – 176 с.
2. Теория моделей в процессах управления. Информационный и термодинамический аспекты / Б.Н. Петров, Г.М. Уланов, И.И. Гольденблат, С.В. Ульянов. – М.: Наука. 1978. – 223 с.
3. Тверской, Ю.С. Об одном способе обеспечения расчетной эффективности энергоблоков ПГУ / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев // Вестник ИГЭУ. Вып.1. – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2015. – С. 30-36.
4. Рубашкин, А.С. Развитие технологии моделирования динамических процессов на тепловых электростанциях / А.С. Рубашкин, В.А. Рубашкин // Теплоэнергетика. – 2004. – №10. – С. 4-43.
5. Устройство регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок бинарных энергоблоков // Патент на полезную модель РФ МПК F01K 13/02 (Заявка №2015105485/06 от 17.02.2015) / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев // Решение о выдаче патента на полезную модель от 21.08.2015.
6. Советов, Б.Я. Моделирование систем: [учебник для вузов] / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2007. – 343 с: ил.
7. Муравьев, И.К. Создание математической модели и расчет характеристик энергоблока ПГУ / И.К. Муравьев, Ю.С. Тверской // Моделирование-2012: Сб. трудов IV Междунар. науч. конф. – Киев: Ин-т проблем моделирования в энергетике, 2012. – С. 297-303.
8. Соколов, Б.В. Концептуальные основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов / Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // ИММОД-2005: Материалы II Всероссийской научно-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика», 2005. – С. 65-70.
9. Тверской, Ю.С. Локальные системы управления // Ю.С. Тверской .ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011.- 128 с.