

## Развитие технологии моделирования динамических процессов на тепловых электростанциях

Рубашкин А.С., канд. техн. наук, Рубашкин В.А., инж

ЗАО «Тренажеры для электростанций»<sup>1</sup>

**Рассматриваются различные технологии создания моделей энергоблоков тепловых электростанций, применяемые разработчиками тренажеров. Описываются основные черты тренажеров различных поколений.**

В процессе производства электроэнергии участвуют работники многих специальностей. Всех их необходимо учить, причем разных специалистов надо обучать по-разному и разными средствами.

Профессиональное мастерство операторов котлов и турбин базируется на двух основных составляющих: теоретические знания и практические навыки управления оборудованием.

В предлагаемой статье рассматриваются учебные средства для получения практических навыков – тренажеры.

Операторам необходимы практические навыки, в том числе моторные, для работы с установленной на блоке системой управления (традиционная АСУ с блочным щитом, либо современная компьютерная АСУ). При этом, как бы полно ни охватывала АСУ режимы работы оборудования, и как бы ни был высок ее коэффициент использования, в реальной эксплуатации многократно создаются ситуации, когда оператору приходится в условиях жесткого лимита времени диагностировать технологическую ситуацию и осознанно принимать решения по управлению оборудованием.

Навыки такого рода являются прежде всего интеллектуальными. Их надо тренировать. Успех этого тренинга зависит прежде всего от качества модели процессов, положенной в основу тренажера.

На основе используемого подхода к созданию модели объекта можно определить три поколения тренажеров.

В тренажерах первого поколения (Т1П) модели строятся на основе известных статических и динамических характеристик объекта. В большинстве случаев источником этих характеристик являются опытные данные, полученные непосредственно на работающем объекте. Иногда для получения каких-то характеристик могут использоваться расчетные методы.

Модель в целом строится как программная система, которая воспроизводит известные режимы и процессы объекта. При этом структура модели преимущественно воспроизводит структуру каналов, связывающих входные воздействия с выходными переменными. Технологическая структура объекта, его конструктивные характеристики, физические законы, лежащие в основе про-

текающих в нем процессов, остаются вне пределов модели. Динамические характеристики, на воспроизведении которых основывается модель, чаще всего рассматриваются как линейные (не зависящие от величины и знака изменения входных воздействий). В некоторых случаях коэффициенты аппроксимирующих их передаточных функций ставятся в зависимость от какого-то параметра, который рассматривался как определяющий, например, от нагрузки. Для получения реакций на комбинацию входных воздействий естественно используется принцип суперпозиции, который применим к любой линейной системе. Промежуточные режимы и процессы, для которых нет опытных (или расчетных) данных, реализуются путем интерполяции того, или иного вида. Режимы и процессы вне области известных данных получаются с использованием экстраполяции.

Подобные модели имеют следующие достоинства:

- отсутствие проблемы обеспечения устойчивости решения, поскольку количество обратных связей минимально; это позволяет осуществлять решения при относительно больших шагах по времени, т.е. с малыми затратами машинного времени (что значительно снижает требования к вычислительной мощности используемых для моделирования компьютеров);
  - возможность четко разделить работу по созданию моделей между специалистами различных специальностей: одни определяют характеристики и строят схему каналов, другие - воспроизводят в компьютере эту схему и характеристики; причем этим последним (математикам и программистам) не обязательно понимать технологию и физику процессов.
- Однако этим моделям свойственны и существенные недостатки:
- низкая точность, что является следствием того, что существенно нелинейный объект (каким является энергоблок) воспроизводится как линейный, и того, что любые исходные характеристики, полученные экспериментально на действующем объекте, заведомо имеют невысокую точность;
  - низкая достоверность процессов, которые могут быть воспроизведены на такой модели для промежуточных (интерполяция) и особенно выходящих за

<sup>1</sup> 105023, Москва, Семеновский пер., д. 15. ЗАО «Тренажеры для электростанций».

рамки опытных данных (экстраполяция) режимов, в частности, для пусков различного вида;

- невозможность построения такой модели для объекта, у которого еще не определены опытные характеристики (находящегося в стадии проектирования, строительства или монтажа).

Модели Т1П до сих пор используются разработчиками, для которых создание тренажеров не является основной профессиональной деятельностью. Эти модели могут быть использованы для начального обучения будущих операторов, которым еще рано осваивать сложные режимы и которые не могут оценивать адекватность модели тренажера.

Существенным шагом вперед в сфере построения моделей энергоблоков стало признание того факта, что модели должны напрямую строиться на основе физических законов, которыми определяется функционирование реального объекта, прежде всего, законов сохранения энергии (тепла), массы и количества движения, которые записываются, как дифференциальные уравнения баланса.

В США применение для построения моделей законов сохранения (баланса) получило название применения «основных принципов».

Баланс тепла описывается уравнением, в котором производная по времени для температуры (или энтальпии) пропорциональна разности расходов подведенного и отведенного от рабочего тела тепла. Сама температура (или энтальпия) вычисляются интегрированием этой разности (небаланса).

Уравнения баланса тепла записываются для всех рассматриваемых компонентов и рабочих тел, например, для пара, текущего через пароперегреватель, для дымовых газов, отдающих ему тепло, для металла труб пакета и т. д.

Баланс массы может описываться уравнением, в котором производная давления по времени пропорциональна небалансу расходов подведенного и отведенного рабочего тела (пара и/или воды, дымовых газов, и так далее). Само давление вычисляется интегрированием этого небаланса.

В модели, основанной на системе дифференциальных уравнений баланса, объект уже не является черным ящиком. Структура уравнений баланса и их взаимосвязи отображают структуру компонентов объекта. Принципиальным является вопрос, как определяются расходы тепла или рабочего тела (пара, воды, газов), входящие в уравнения баланса, и что представляют собой коэффициенты при производных, от которых зависит динамика процессов на тренажере.

В качестве примера рассмотрим уравнение баланса тепла для металла труб пакета ширмового пароперегревателя котлоагрегата (без учета распределенности металла по длине и толщине стенки):

$$M \cdot c_m \cdot \frac{dt_m}{dt} = \alpha_{нар} \cdot S_{нар} \cdot (T_r - t_m) - \alpha_{вн} \cdot S_{вн} \cdot (t_m - t),$$

где  $M$  – масса металла труб пакета,  $c_m$  – удельная теплоемкость металла,  $\alpha_{нар}$  – коэффициент теплоотдачи снаружи (от газов к металлу),  $S_{нар}$  – поверхность нагрева со стороны газов,  $\alpha_{вн}$  – коэффициент теплоотдачи внутри (от металла к пару),  $S_{вн}$  – поверхность нагрева со стороны пара,  $T_r$ ,  $t_m$ ,  $t$  – средние температуры дымовых газов, металла и пара,  $\tau$  – время.

В правой части уравнения записана разность между расходом тепла от газов к металлу снаружи (обычно это

- подведенное к металлу тепло) и расходом тепла от металла к пару внутри (обычно это – отведенное от металла тепло). Эти расходы связывают данное уравнение с другими уравнениями баланса. Их вычисление при моделировании связано с определенными трудностями. Прежде всего это относится к определению коэффициентов теплоотдачи, особенно к коэффициенту теплоотдачи от газов к металлу, и объясняется тем, что в районе ширм происходит радиационный (вследствие высокой температуры газов) и конвективный (из-за скорости движения газов) теплообмен. Коэффициент теплоотдачи для каждому из этих видов теплообмена зависит от состава дымовых газов, их температуры, геометрических характеристик самих ширм и газохода, и т.п.

Точный расчет расходов тепла для всех режимов работы котла можно было бы выполнить на основе<sup>2</sup>.

Однако значительно проще определять эти расходы по опытным данным, полученным на работающем объекте. Известно, что в установившихся режимах работы энергоблока эти два расхода тепла к металлу (подведенный и отведенный) равны. Подвод тепла к пару в установившемся режиме на реальном блоке сравнительно просто вычислить в том случае, если известны расход и давление пара, а также температура пара, до и после ширм. На действующем энергоблоке эти параметры обычно измеряются. Если имеется информация по нескольким установившимся режимам работы, то можно попытаться построить аппроксимирующую функцию для вычисления расходов тепла от газов к металлу и от металла к пару в зависимости от каких-то других реально измеряемых на энергоблоке параметров. Например, можно построить аппроксимирующую функцию для вычисления расхода тепла от газов к металлу в зависимости от температуры газов в какой-либо точке газового тракта, где эта температура на реальном энергоблоке измеряется. При этом необязательно, чтобы этой температурой газов была бы температура газов в районе самих ширм, потому что между температурами газов в разных точках газового тракта котла существует корреляция. Наконец, можно аппроксимировать не сами расходы тепла, а коэффициенты теплоотдачи от газа к металлу и от металла к пару. Тогда модель тренажера должна предусматривать вычисление расхода тепла умножением предполагаемого значения коэффициента теплоотдачи, полученного путем аппроксимации, на поверхность теплообмена и на разность температур.

Этот же подход можно применить и для других компонентов котла и блока.

Особое внимание следует обратить на коэффициент при производной, от которого в рассматриваемом примере будут зависеть реализуемые на модели динамические свойства объекта. Физический смысл этого коэффициента - общая теплоемкость металла ширм, которая может быть определена на основе детального анализа конструктивных данных пакета.

Кроме того, коэффициенты при производных в уравнениях баланса (различных физических величин) можно использовать как настроечные. Для любого переходного процесса (разгрузки, останова, холодного пуска и т.д.) путем подбора и подстройки этих коэффициентов внутри модели, можно реализовать динамические свойства энергоблока, которые отвечают представлениям Заказчика, полученным на основе опыта эксплуатации энергоблока.

<sup>2</sup> **Тепловой** расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Госэнергоиздат, 1973

Подбирать динамические коэффициенты для приближения к реальным процессам можно и в том случае, если статические параметры (коэффициенты теплоотдачи, разности температур, сами тепловые потоки) рассчитывается достаточно точно. Иногда это называется разделением статической и динамической задач.

Тренажеры, использующие модели такого типа, можно назвать тренажерами второго поколения (Т2П). Они имеют существенные преимущества перед Т1П, в первую очередь потому, что детальнее воспроизводят структуру объекта и физику процессов. В таких моделях всегда есть баланс тепла и массы во всех компонентах и в модели в целом. Исходную информацию от действующего объекта, которой оперирует разработчик Т2П, получить легче, чем для модели Т1П, поскольку для Т2П высокая точность исходной информации не требуется. Имеется в виду информация о статических (установившихся) и динамических режимах работы оборудования, которая в ряде случаев может быть получена без специальных испытаний на оборудовании - методом пассивного эксперимента.

Вместе с тем моделям Т2П присущи те же недостатки, что и моделям Т1П: недостаточная точность и достоверность воспроизведения режимов, для которых нет опытных данных (для пусков, аварийных ситуаций, и т.п.) и просто промежуточных статических режимов; трудности построения такой модели для объекта, у которого нет работающего прототипа и т.д.

Необходимо обратить особое внимание на то, что приведенное выше уравнение баланса тепла для металла ширмового пакета перегревателя рассматривает его как пространственно сосредоточенный элемент. На самом деле практически все теплообменники в составе энергоблока, являются пространственно распределенными, как минимум по одной пространственной координате. Распределенность оказывает решающее влияние на статические и динамические свойства объекта. И уже поэтому уравнения, описывающие ширмовый пакет как сосредоточенную тепловую емкость, приводят к заметному снижению точности моделирования. Точность можно улучшить, например, разделив пакет на четыре последовательные части, для каждой из которых следует записать свои уравнения. Однако, в рамках подхода Т2П этого нельзя сделать, потому что на реальном котле в промежуточных точках ширмового пакета нет измерений температуры пара и металла.

По этой же причине (отсутствие измерений) для моделей Т2П не могут быть получены необходимые данные по необогреваемым теплообменникам (коллекторам, перепускным трубам и т.п.), на которые обычно приходится не менее трети металлоемкости котла, и которые соответственно существенно влияют на его динамические свойства. Для разработчиков моделей Т2П необогреваемые элементы просто выпадают из рассмотрения, и никакие данные по ним их не используются.

Эти недостатки являются следствием того, что при построении таких моделей, как и моделей Т1П, разработчики идут от процессов, так или иначе зафиксированных на реальном объекте, к процессам, которые выдает модель. Для разработчиков тренажеров такие модели удобны тем, что они отвечают не за адекватность модели любым процессам и режимам работ объекта, а за адекватность её только тем режимам, данные по которым были получены от Заказчика. Видимо, это одна из главных причин, почему большинство ведущих разработчиков тренажеров для тепловых электростанций

не только в России, но и за рубежом, до сих пор разрабатывают модели типа Т2П.

Тренажеры третьего поколения (Т3П) включают объективную модель, основанную на уравнениях баланса с коэффициентами, полученными на основе конструктивных данных.

Статические и динамические характеристики реального энергоблока определяются множеством факторов, которые можно условно разделить на следующие группы:

- основные конструктивные параметры оборудования, которые поддаются точной оценке (выбираются на этапе проектирования):

- значения площадей поверхностей нагрева в различных зонах котла, а также сечения для прохода газов в различных зонах котла;

- количество и конструктивные параметры ПВД и ПНД;

- масса металла отдельных компонентов оборудования и т.д.

- параметры, обобщающие некоторые совокупности принятых конструктивных решений, которые на стадии проекта не поддаются точному расчету для конкретного оборудования, однако исходя из конструктивных и проектных решений значения таких параметров могут быть предварительно оценены на основе статистического обобщения данных по аналогичному оборудованию; после завершения монтажа и ввода оборудования в эксплуатацию предварительные оценки могут быть уточнены; к таким параметрам относятся, например:

- степени эффективности использования различных поверхностей нагрева;

- термическое сопротивление изоляции;

- положение ядра факела в топке и т.д.

- внешние факторы, не зависящие от конструктивных параметров энергоблока, такие как:

- состав поступающего в данный момент топлива (например, в какой-то момент времени топливо может иметь повышенную влажность или котел может работать на смеси разных видов топлива);

- температура окружающего воздуха;

- температура охлаждающей воды.

- факторы, зависящие от особенностей эксплуатации энергоблока:

- степень загрязнения поверхностей нагрева в котле, трубках в конденсаторе и т.д.;

- значение присосов воздуха в различных элементах котла и в конденсаторе турбины и т.д.

Основные положения технологии моделирования Т3П следующие:

1. Моделирование базируется на законах баланса тепла, массы и количества движения, уравнениях термодинамики для воды, пара и газовых смесей, критерияльных уравнениях теплообмена

2. Для объекта моделирования строится единая система дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающая его поведение во всех режимах работы, начиная от исходного состояния для холодного пуска и заканчивая номинальным состоянием работы блока с полной нагрузкой. При этом разбиение объекта на элементы, учитывающее его пространственную распределенность, осуществляется по условиям обеспечения точности, а не соответствия реализованным на блоке измерениям. При этом естественно в систему включаются и уравнения, описывающие процессы в необогреваемых элементах.

3. Все коэффициенты этой системы уравнений прямо или косвенно определяются на основе конструктивных данных моделируемого объекта

4. Значения большинства коэффициентов в этих уравнениях (не менее 95% из них), которые зависят от поддающихся точной оценке конструктивных параметров оборудования, могут быть точно вычислены. Они определяются на начальной стадии разработки тренажера и являются окончательными (не меняются в процессе отладки и тестирования тренажера). Исключением является случай, когда при определении какого-либо коэффициента была допущена ошибка.

5. Находятся значения статистически оцениваемых обобщенных параметров, по которым вычисляются те коэффициенты в уравнениях, которые от них зависят. Для котлов такие оценки приведены в [1] (например, существуют статистические оценки потерь тепла в окружающую среду, перетоков воздуха в уходящие газы в регенеративных воздухоподогревателях, коэффициентов эффективности использования поверхностей нагрева в газоходах котлов разных типов, и т.д.)

6. Для факторов, зависящих от особенностей эксплуатации энергоблока, также применяется метод статистической оценки. В случае необходимости значения статистически выбираемых параметров в дальнейшем корректируются.

7. Внешние факторы являются для моделей ТЗП граничными условиями, которые могут оперативно меняться в процессе работы.

Модели тренажеров третьего поколения имеют важные преимущества перед моделями тренажеров второго поколения. В частности:

вычисления расходов тепла, воды и пара во всех режимах работы моделируемого оборудования производятся на основе точных формул (аппроксимация не применяется)

теплоемкости и внутренние объемы всех элементов энергоблока учитываются правильно (при этом их значения не используются в качестве настроечных коэффициентов, чтобы добиться нужных динамических характеристик); в модели объекта используются заранее вычисленные характеристики всех элементов энергоблока

Благодаря перечисленным преимуществам ТЗП обладают следующими важными потребительскими свойствами:

любой статический режим работы оборудования воспроизводится достаточно точно, например, специальное тестирование нескольких ТЗП, установленных в тренажерном центре ТЭЦ-26 Мосэнерго, показало, что отличие значений основных статических параметров работы блока на модели и в аналогичных режимах на реальном оборудовании в подавляющем большинстве случаев укладывается в погрешность измерений;

динамические режимы работы оборудования воспроизводятся достаточно точно.

Таким образом, можно сказать, что ТЗП идут не от «процессов к процессам», как это делают Т1П и Т2П, а от конструктивных данных к процессам. Задача разработчика ТЗП состоит в том, чтобы на основе конструктивных данных правильно смоделировать статические и динамические свойства отдельных элементов, из которых состоит энергоблок (топочной камеры, ширмового перегревателя, трубопроводов, клапанов турбины, конденсатора, ПВД, ПНД и т.д.), увязать их между собой, и тогда на тренажере любой вариант пуска (правильный или неправильный), из любого теплового состояния мо-

жет быть воспроизведен без дополнительных подстроек тренажера.

Разработчик ТЗП если и запрашивает у Заказчика информацию о статических и динамических свойствах объекта, то в ограниченном объеме, только на завершающей стадии разработки и только для целей контроля. Специалисты Заказчика привлекаются только для тестирования моделей после завершения основного этапа разработки.

Модели ТЗП оперируют значительно большим объемом исходных данных и выполняют значительно больший объем вычислений, чем модели Т2П (и тем более Т1П). В течение многих лет это было основным затруднением при их реализации. Вычислительная мощность доступных компьютеров не позволяла без значительных упрощений (а значит и потерь точности) осуществлять моделирование в реальном масштабе времени, что является обязательным условием для тренажеров. Развитие компьютерной техники в последнее десятилетие устранило эти ограничения.