

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Зверьков В.П., Кузищин В.Ф., Сабанин В.Р.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Россия г. Москва, ул. Красноказарменная д.17

Zverkovvp@mpei.ru, Kuzishchinvf@mpei.ru, Sabaninvr@mpei.ru

Аннотация: Рассматривается задача создания численной имитационной модели двухконтурной автоматической системы регулирования давления пара в главном паровом коллекторе энергоблока с ВВЭР - 440 с учетом нелинейности характеристик объекта и реальных свойств технических средств регулирования. Приведена процедура динамической настройки системы с использованием разработанного эволюционного алгоритма многопараметрической оптимизации и предложенного критерия оптимальности, учитывающего специфические требования, предъявляемые к системе.

Ключевые слова: имитационная модель, система регулирования, многопараметрическая оптимизация, динамическая настройка, критерий оптимальности.

Одним из прогрессивных методов решения проблем оптимизации структуры и параметров крупномасштабных систем является имитационное моделирование как объектов управления, так и действий автоматических систем регулирования (АСР). Однако, при использовании этого необходимо иметь в распоряжении достаточно точные примитивы линейных и нелинейных математических моделей управляемого объекта и средств автоматизации (регуляторов, средств защит, измерительных преобразователей, исполнительных механизмов и т.д.).

Имитационное моделирование – это способ представления сложных объектов и систем управления ими, основанный на воспроизведении функций элементов системы и связей между и

отображающий развитие во времени переменных системы в целом и составляющих ее элементов при действии входных сигналов.

В настоящее время для управления крупномасштабными системами разрабатываются сложные гибридные алгоритмы с одновременным воздействием на несколько регулирующих органов, системы с переключаемой структурой, адаптивные и нейросетевые алгоритмы, анализ и настройка которых возможна только методами имитационного моделирования.

Степень достоверности математического представления динамических характеристик элементов оборудования и регуляторов является компромиссом между несколькими, как правило, противоречивыми требованиями, составляющими суть системного подхода к созданию оптимальной систем управления. Проверка работоспособности системы управления должна осуществляться при различных ситуациях.

Концепция создания математических моделей рассматривается на примере изменения давления пара перед турбиной энергоблока АЭС с ВВЭР-440. В состав рассматриваемого объекта управления входят парогенераторы и паропроводы с установленной на них регулирующей и запорной арматурой [1]. Участок регулирования от управляющего воздействия на турбину до места измерения давления в информационном плане представляет собой некоторую емкость, в которой в стационарном режиме давление одинаковое во всех точках объема. Однако в процессе транспорта пара от ГРП до турбины в точках паропровода возникают градиенты давления пара. При этом появляются емкостное и транспортное запаздывания, которые следует учитывать при настройке АСР.

Подробное исследование процесса транспорта пара требует использования системы дифференциальных уравнений в частных производных для балансов энергии, массы и импульса давления пара и привлечения волновой теории для их решения [2]. Эта задача трудоемкая и требует значительных затрат времени. Поэтому в работе для поставленной задачи разработана имитационная модель минимальной сложности с возможностью оперативной ее уточнения по данным испытаний в процессе пуско-наладочных работ. К ним, например, относятся: выход из строя одного и более главных циркуляционных насосов или турбины, переход АЭС в режим собственных нужд, отключение подогревателя высокого давления, повреждения системы управления и т.д.

При решении вопроса выбора вида математического описания, необходимо учитывать влияние режима работы энергоблока на его динамические и статические характеристики. Как правило, здесь проявляются нелинейные свойства моделируемого объекта, что характеризуется чувствительностью разных параметров модели к изменению технологических величин. Диапазон изменения технологических величин при вышеуказанных аномальных режимах является, как правило, базой для принятия решения о возможности использования линейной, квазилинейной или нелинейной системы уравнений. Необходимо принимать во внимание также нелинейность характеристик клапанов и реальные свойства технических средств регулирования

Аппроксимация аналитических закономерностей упрощенными математическими моделями приводит, как правило, к неприемлемым ошибкам в результатах синтеза системы управления. При использовании современных вычислительных средств нет необходимости в упрощении полученных нелинейных математических моделей. Объем и форма представления математической модели определяет время счета модели, которое может быть сокращено с помощью использования эффективных алгоритмов расчета.

Предполагается, что полученные при пуско-наладочных испытаниях графики переходных процессов будут использованы для уточнения имитационной модели АСР с установленными параметрами регуляторов. При этом программой алгоритма численной многопараметрической оптимизации будут уточнены параметры модели объекта регулирования, для которой переходные процессы будут совпадать с процессами, полученными при испытаниях. Затем, для новых значений параметров объекта регулирования будут найдены новые значения параметров регулятора, которые будут удовлетворять поставленным требованиям качества работы АСР.

Численная имитационная модель двухконтурной автоматической системы регулирования давления пара в главном паровом коллекторе с ПИ-регулятором основного параметра и динамической обратной связью по давлению в регулирующей ступени турбины с применением дифференциатора разработана в виде рекуррентных соотношений, полученных на основе уравнений математической физики. Для программной среды MATHCAD в НИУ МЭИ разработан блочно-модульный комплекс модельно-ориентированного проектирования. В комплекс входят два набора программных модулей имитационных моделей линейных динамических элементов (звеньев) и нелинейных аналоговых и дискретных элементов [3].

Имитационная модель АСР давления пара в ГПК содержит линейную модель объекта регулирования с зависящими от нагрузки параметрами и нелинейную модель регулирующего устройства, состоящую из функционального регулирующего блока, широтно-импульсного модулятора и сервопривода постоянной скорости (исполнительного механизма).

В настоящее время существуют аналитические методы динамической настройки линейных каскадных АСР с дифференциатором в частотной области. В основном они базируются на итерационной процедуре настройки внешних и внутренних контуров. В качестве условия оптимальности обычно используется линейный интегральный критерий с ограничением на частотный показатель устойчивости $M = 1,55$ [4].

Для АСР давления пара в ГПК постановка задачи отличается от классической по следующим моментам.

1. Малая инерционность динамики объекта управления обостряет влияние нелинейностей в технических средствах регулирования и требует, кроме параметров динамической настройки регулятора и дифференциатора kp^* , Ti^* , kd^* и Td^* , настраивать параметры нелинейных элементов, таких как зона нечувствительности Δ и минимальная длительность импульсов ШИМ t_i .

2. В АСР давления в ГПК не допускаются колебательные процессы. При этом задача осложняется тем, что требуется найти такие параметры, при которых не будет колебательности в широком диапазоне изменения нагрузки энергоблока: от 10 до 100 % мощности.

3. Исполнительным механизмом в схеме регулирования является главный сервомотор турбины, который относится к классу нелинейных исполнительных механизмов с постоянной скоростью перемещения регулирующего органа и ограничениями его положения.

В соответствии с поставленной задачей АСР настраивалась на минимум показателя качества (меры ошибки) при ступенчатом возмущении по каналу регулирующего органа. Предложен комплексный показатель качества работы системы, а именно: оптимальные значения параметров настройки регулирующего устройства определяются из условия минимума суммы интеграла по модулю отклонения регулируемой переменной и числа включений ГСМ (с весовым коэффициентом "а") на интервале времени переходного процесса.

Предложенный критерий оптимальности учитывает специфические требования, предъявляемые к системе (минимум интегрального модульного показателя при отсутствии колебаний) и обеспечивает минимальное число включений сервомотора на интервале времени переходного процесса.

Задача поиска минимума комплексного показателя качества работы системы (целевой функции) является задачей нелинейного программирования при наличии ограничений. При оптимизации динамики системы регулирования, т.е. поиске оптимальных значений параметров настройки регулятора и дифференциатора учитывались следующие ограничения:

- значения параметров настройки регулирующего устройства должны быть положительными;
- степень затухания ψ колебаний переходного процесса должна быть близкой к единице: $\psi > 0,995$;
- интеграл отклонения регулируемой переменной $I_{\text{лин}}$ и интеграл по модулю отклонения регулируемой переменной $I_{\text{мод}}$ должны быть близки: $|I_{\text{лин}} - I_{\text{мод}}| < 0,005$.

Перечисленные факторы ограничили возможности классических частотных методов настройки линейных АСР [4] и потребовали использования перспективных технологий и методов анализа и оптимизации АСР численными алгоритмами.

Для поиска минимума использовался численный модифицированный генетический алгоритм многопараметрической оптимизации, реализующий поиск минимума целевой функции эволюционным методом. Целевая функция, содержит несколько экстремумов, появляющихся, в частности, из-за импульсного режима управления сервомотором постоянной скорости. Оптимизация АСР проведена с использованием алгоритма многопараметрической оптимизации одноэкстремальных функций цели (программа Opt), известного в литературе как метод деформируемого многогранника и разработанного в НИУ МЭИ модифицированного генетического алгоритма оптимизации многоэкстремальных функций цели (программа MGA) [5]. Метод поиска минимума целевой функции программы MGA - эволюционный с элементами статистики и генетического отбора. По сравнению с методом деформируемого многогранника он работает достаточно долго, но с большей вероятностью позволяет находить глобальный экстремум. Этот метод и используется для первичного анализа топологии оптимизируемых многопараметрических функций. В настоящее время формализованных методик настройки АСР с учетом нелинейностей нет. Используя алгоритм многопараметрической оптимизации, были найдены значения параметров ПИ-регулятора и нелинейностей.

Полученные значения параметров настройки регуляторов были использованы в системе регулирования давления пара в ГПК на 4 энергоблоке Кольской АЭС при проведении пуско-наладочных испытаниях в связи с модернизацией систем управления. Полученные графики переходных процессов показали достаточно хорошее качество регулирования, соответствующее требуемым условиям эксплуатации. Анализ переходных процессов полученных при испытаниях и процессов, полученных в имитационной модели, содержащей нелинейные элементы, позволил сделать вывод о пригодности имитационной модели АСР, эффективности принятого критерия оптимальности и методики поиска его минимума.

Литература

1. *Зорин В.М.* Атомные электростанции / Учебное пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2012. — 672 с.: ил.
2. *Плютинский В.И., Погорелов В.И.* Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС // Учебник для техникумов -М.: Энергоатомиздат, 1983, – 296 с., ил.
3. *Бочкарева Е.Ю. Кузицин В.Ф.* Настройка длительности импульсов регуляторов с исполнительным механизмом постоянной скорости. / Электронный журнал «Новое в Российской электроэнергетике», Инф. Агентство «Энергопресс», 2009 №9, с 35-47.
4. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: Учебник для вузов. // М.: 1985. – 296 с., ил.
5. *Сабанин В.Р.* Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» / В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862, 2004.