

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ МИНИ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

А.И. Полулях, И.Г. Лисовин (ОАО "Авиадвигатель")

Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов

(ГОУВПО "Пермский государственный технический университет")

Обосновано применение методов математического моделирования электроэнергетических систем для автоматизации настройки регуляторов систем управления газотурбинных электростанций, создаваемых на базе конвертированных авиационных двигателей. Разработана методика настройки регуляторов при компьютерных испытаниях, использующая динамическое моделирование электрической нагрузки. Показана необходимость учета произвольного характера электрической нагрузки.

Ключевые слова: автоматизация настройки регуляторов, компьютерная поддержка, система автоматического управления, газотурбинная установка, синхронный генератор, мини-электростанция, электроэнергетическая система.

Введение

Газотурбинная электростанция (ГТЭС) как объект управления представляет собой совокупность нескольких сложных подсистем, различных по своей физической природе. Например, электростанция на базе конвертированной авиационной газотурбинной установки (ГТУ) ГТЭС-4 МВт (разработки ОАО "Авиадвигатель") состоит из газотурбинного двигателя со свободной турбиной и блока управления, синхронного генератора со своими встроенными средствами управления и ряда других подсистем. Каждая из этих подсистем является сложным многомерным нелинейным объектом, причем для анализа и синтеза алгоритмов управления каждой из подсистем и всей ГТЭС в целом требуются свои специфические подходы.

Для исследования взаимодействия нелинейных объектов управления в принципе допустимо использовать средства автоматизированного проектирования в виде известных компьютерных пакетов (MathCad,

Matlab и др.). Однако эти средства обладают с одной стороны излишней универсальностью, затрудняющей их использование при решении конкретных проблемно-ориентированных задач, а с другой — обладают недостаточной гибкостью для реализации многовариантных расчетов. Поэтому коллективом авторов ГОУВПО "Пермский государственный технический университет" и ОАО "Авиадвигатель" разработан программный моделирующий комплекс КМЭС для решения задач анализа и синтеза регуляторов газотурбинных мини-электростанций мощностью до 25 МВт. Рассмотрим использование разработанного комплекса для автоматизированной настройки регуляторов ГТУ при компьютерных испытаниях.

Методика настройки регуляторов при компьютерных испытаниях

Испытания можно классифицировать по назначению, месту проведения, типу производства. Научно-исследовательские испытания (эксперимент) являются первыми при создании новой САУ [1]. Далее следуют полунатурные испытания (натурный агрегат регулятора испытывается на математической модели объекта управления) и натурные испытания на различных стендах.

Научно-исследовательские испытания являются компьютерными испытаниями. При их проведении необходимо как можно более полно представить объект управления. В случае испытания алгоритмов регулирования ГТЭС следует использовать компьютерную модель электрической нагрузки. Эта модель позволяет выполнить предварительную настройку регуляторов в таких режимах, которые невозможно реализовать на современных натурных испытательных стендах: различного рода короткие замыкания и другие аварийные режимы, переход с автономного режима работы на режим работы параллельно с сетью электроснабжения, испытания при параллельной работе энергоагрегатов и др.

В связи с этим для автоматизированной настройки регуляторов ГТЭС целесообразно создание систем компьютерной поддержки таких испытаний. Один из вариантов подобной системы (комплекс КМЭС) реа-

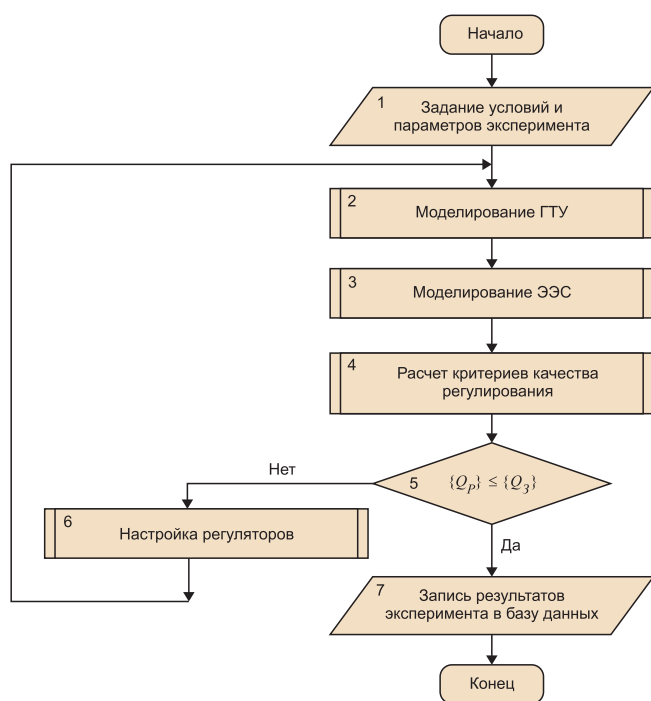


Рис. 1. Алгоритм настройки регуляторов САУ

лизован и внедрен на ОАО "Авиадвигатель" и в настоящее время применяется для испытания и настройки алгоритмов регуляторов ГТЭС, создаваемых на базе отечественных авиационных двигателей (ПС-90).

Кратко рассмотрим суть разработанной методики (рис. 1).

Этап 1. Экспериментатором задаются исходные данные и параметры вычислительного эксперимента.

Этап 2. Производится моделирование ГТУ, при этом возможно использование моделей различного уровня сложности: поэлементные, нелинейные, линеаризованные, быстросчетные и др. [2].

Этап 3. Моделируется электроэнергетическая система (ЭЭС) сложной структуры. Необходимость такой модели возникает, так как воспроизвести всю гамму характерных и критических режимов ЭЭС в реальных натуральных условиях крайне затруднительно, а по существу и невозможно. Тем не менее, аппаратура управления САУ и ее алгоритмы должны пройти проверку в наиболее характерных, а также в наиболее опасных режимах работы. При этом следует использовать физические принципы построения модели, то есть строить модель, основываясь на физике рассматриваемых процессов, используя балансовые соотношения. Формальные принципы, основанные на обработке экспериментальных данных, здесь не годятся по причине все той же сложности получения экспериментальных данных. Модель ЭЭС содержит 10 основных типов структурных элементов (синхронные генераторы, асинхронные двигатели, статические нагрузки и т.п.), каждый из которых представлен системой дифференциальных уравнений до восьмого порядка включительно. Как состав элементов, так и сложность моделей элементов может свободно варьироваться.

Модели всех структурных элементов ЭЭС записываются в единой обобщенной векторно-матричной форме записи:

$$pI = \pm AU - BI - H, \quad (1)$$

где p – символ дифференцирования, I и U – вектора токов и напряжений соответственно, A и B – вектора параметров, H – вектор внешних воздействий на элемент со стороны, например, средств регулирования. Размерность матриц определяется порядком соответствующих дифференциальных уравнений. Знак "–" соответствует случаю, когда элемент является источником тока. В общем случае исходные уравнения элемента нелинейные, при этом представление (1) есть линеаризованное уравнение для малого промежутка времени, соответствующего шагу интегрирования системы дифференциальных уравнений. В этом случае уравнение взаимодействия элементов рассчитывается по методу узловых потенциалов по векторно-матричному уравнению:

$$M G M^T U = -MW - pMI, \quad (2)$$

где M – матрица структуры, G – матрица проводимостей элементов, W – матрица, составленная из пра-

вых частей уравнений (1) и содержащая эквивалентные источники ЭДС и источники тока, действующие на i -м шаге расчета динамики, pM – матрица, полученная дифференцированием матрицы M . Ее необходимость обусловлена тем, что все элементы моделируются во вращающейся системе координат, связанной с роторами синхронных генераторов.

На основании уравнений (1) и (2) может быть произведен компьютерный эксперимент для получения динамических характеристик произвольного режима работы ЭЭС. Для увеличения устойчивости алгоритма использованы специально разработанные методы [3].

Этап 4. По переходной характеристике рассчитываются значения вектора показателей качества Q_p .

Этап 5. Осуществляется поэлементное сравнение значений векторов показателей качества электроэнергии, рассчитанных при моделировании с нормами, заданными экспериментатором:

$$\Omega = f(Q_3, Q_p), \quad \text{где } \Omega = \begin{cases} 1, \{Q_p\} \leq \{Q_3\} \\ 0, \{Q_p\} > \{Q_3\} \end{cases}. \quad (3)$$

Этап 6. Если не все рассчитанные показатели качества Q_p входят в область допустимых значений Q_3 , экспериментатор производит коррекцию параметров и структуры регуляторов. Этот этап автоматизирован за счет автоматического поиска настройки регуляторов с помощью поисковых или градиентных методов оптимизации.

Этап 7. Цикл испытаний завершается с положительным результатом при достижении требуемых показателей качества. Этот результат фиксируется в БД как допустимый.

Пример настройки регулятора

Покажем не только алгоритм настройки параметров регуляторов, но и подтвердим необходимость учета характера нагрузки при настройке регуляторов ГТУ в ходе компьютерных испытаний.

ГОСТ Р 53178-2008 устанавливает требования к испытаниям газотурбинных энергетических установок. Например, испытания ГТЭС при пуске короткозамкнутого асинхронного двигателя производятся в обязательном порядке при предварительных, приемочных и квалификационных испытаниях. Требования к показателям поддержания параметров электроэнергии в переходных режимах устанавливаются ГОСТ Р 53178-2008, ГОСТ Р 50783-95. В частности, ГОСТ Р 50783-95 устанавливает значения переходного отклонения частоты при сбросе/набросе 100% симметричной нагрузки не более 10%. Время восстановления – 5 с. Время восстановления напряжения и частоты напряжения определяют по осциллограмме переходного процесса от момента сброса (наброса) нагрузки до момента вхождения в зону допустимых значений установившихся напряжения и частоты напряжения.

Ведомственные руководящие документы, как правило, диктуют еще более жесткие требования к поддержанию режимных параметров. Так, РАО "Газпром"

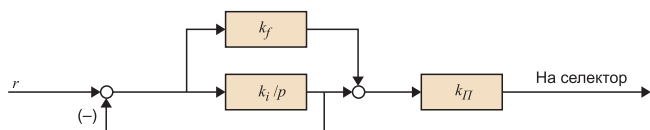


Рис. 2. Структурная схема регулятора

в РД 51-015 86 23-07-95 устанавливает, что газотурбинная электростанция, используемая на предприятиях РАО "Газпром", должна при мгновенных сбросах/набросах нагрузки, равной 100% от номинальной, допускать отклонение частоты вращения не более $\pm 7,5\%$ от номинальной.

В то же время большинство существующих испытательных стендов не позволяет выполнить пуск асинхронного двигателя. Кроме того, обычно нагрузка задается только по активной мощности введением активных сопротивлений. В связи с этим целесообразно оценить влияние пуска асинхронного двигателя на настройку параметров регуляторов ГТУ.

В связи с этим рассмотрим моделирование пуска соизмеримого по мощности асинхронного двигателя и его влияние на отклонения частоты свободной турбины ГТУ во время переходного процесса. При моделировании использовались номинальные данные и параметры синхронного генератора ТК-4-2УХЛ (ООО "Лысьвенский завод тяжелого машиностроения "Привод", г. Лысьва). Номинальные данные и параметры асинхронного двигателя: $P_H = 2040$ кВт, $U_H = 6000$ В, $n_H = 2840$ об/мин., $\eta_H = 88,5\%$, $\cos\varphi = 0,81$, $r_1 = 0,063$, $r_2 = 0,076$, $x_1 = x_2 = 0,08$, $x_m = 2,78$.

ГТУ мощностью 4 МВт моделируется упрощенной быстросчетной моделью, учитывающей инерционности свободной турбины и турбокомпрессора и использующей статические характеристики для восстановления параметров [2].

Регулятор частоты вращения свободной турбины, используемый в современных блоках управления двигателем (БУД, МСКУ), выполнен по схеме инерционного ПД-регулятора. Линеаризованная структура такого регулятора может упрощенно представлена на рис. 2.

Апериодический член формируется за счет охвата интегратора отрицательной обратной связью, а форсирующее звено – за счет параллельных цепей интегратора и цепи с коэффициентом форсировки k_f .

Передаточная функция регулятора частоты вращения имеет вид:

$$W_p(p) = k_{\Pi} \frac{1 + \frac{k_f}{k_i} p}{1 + \frac{1}{k_i} p}, \quad (4)$$

где k_i – коэффициент усиления интегратора, k_f – коэффициент форсировки, k_{Π} – нормирующий коэффициент.

В реальных регуляторах все параметры $K = (k_i, k_{\Pi}, k_f)^T$ являются функциями режима работы ГТУ, чтобы учитывать нелинейность объекта управления. В пер-

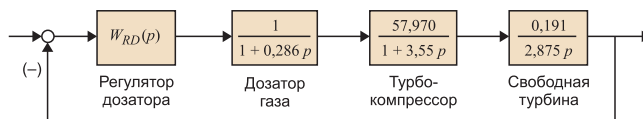


Рис. 3. Линеаризованная модель ГТУ

вом приближении в окрестности номинальной частоты вращения свободной турбины параметры могут быть приняты постоянными и предварительно рассчитаны по какой-либо методике (например, Зиглера-Никольса, СНР и др.) [4] При наличии априорной информации о структуре и параметрах объекта может использоваться аналитический метод расчета начального значения коэффициентов регулятора. Покажем этот расчет для упрощенной модели двухвального ГТУ при условии линеаризации всех характеристик в окрестностях номинального режима (рис. 3).

Передаточная функция замкнутого контура дозирующей иглы:

$$W_{ди}(p) = \frac{Ad(p)}{Adz(p)} = \frac{1}{1 + 0,286 p}, \quad (5)$$

где Ad – угол поворота дозатора газа, Adz – задание на поворот дозатора газа.

Передаточная функция турбокомпрессора:

$$W_{ТК}(p) = \frac{n_{ТК}(p)}{Ad(p)} = \frac{57,970}{1 + 3,551 p}, \quad (6)$$

где $n_{ТК}$ – частота вращения турбокомпрессора.

Передаточная функция свободной турбины:

$$W_{СТ}(p) = \frac{n_{СТ}(p)}{n_{ТК}(p)} = \frac{1}{28,995 p}, \quad (7)$$

где $n_{СТ}$ – частота вращения свободной турбины.

При заданной структуре выбираем передаточную функцию регулятора дозатора газа для компенсации постоянной времени турбокомпрессора в следующем виде:

$$W_{RD} = \frac{1 + 3,551 p}{p} 0,282. \quad (8)$$

Используя заданную структуру регулятора свободной турбины (4), включаемого перед регулятором дозатора на схеме рис. 3, и выбирая желаемую настройку контура регулирования близкой к так называемому "симметричному оптимуму" [5]

$$W_{\text{зс}}(p) = \frac{4T_{\mu} p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu} p + 1)}, \quad (9)$$

где принято $T_{\mu} = 0,286$, получаем передаточную функцию разомкнутого контура регулирования частоты вращения в следующем виде:

$$W_{\text{зс}}(p) = \frac{4T_{\mu} p + 1}{8T_{\mu}^2 p^2 (T_{\mu} p + 1) (1 + \frac{1}{k_{\Pi}} p)}, \quad (10)$$

Здесь аperiодическая составляющая $(1 + (1/k_{\Pi})p)$ искажает настройку (9), но выбрав достаточно боль-

шую величину k_{II} , влияние этой инерционности можно сделать незначительным.

Исходя из указанных соображений, в качестве первого приближения рассчитаны следующие значения настроечных параметров регулятора свободной турбины: $K = (k_i, k_{II}, k_f)T = (100,0; 2,726; 114,4)T$.

Преимущество настройки на "симметричный оптимум" – хорошая отработка возмущающих воздействий [5]. Переходный процесс в синтезированной системе при набросе 10% ступенчатого задания по частоте показан на рис. 4а. (перерегулирование – 44,7%). При набросе возмущения 10% максимальное отклонение составляет 0,418%.

Произведем настройку параметров регулятора при пуске асинхронного двигателя по следующим показателям качества Q_3 :

- время восстановления частоты с точностью $\pm 0,5\%$ должно составлять ≤ 5 с;

- допустимое максимальное отклонение частоты при набросе и сбросе 100% номинальной нагрузки – 7% от номинальной.

В результате автоматической настройки (блок 6, рис. 1) методом покоординатного спуска за пять шагов достигается выполнение граничных условий при следующих значениях параметров: $K^* = (k_i, k_{II}, k_f)T = (96,852; 21,408; 117,381)T$. Переходный процесс при пуске двигателя показан на рис. 4 б. Максимальное отклонение частоты – 4,47%, время восстановления частоты с точностью 0,5% – 2,2 с. Таким образом, переходный процесс укладывается в заданные лимиты.

Произведем настройку при набросе/сбросе активной нагрузки, аппроксимирующей изменение активной мощности при пуске соизмеримого по мощности асинхронного двигателя (наброс нагрузки, затем через 3 с сброс на уровень нагруженного асинхронного двигателя). На существующих стендах нельзя провести пуск асинхронного двигателя, и этот пуск приходится имитировать набросом активной нагрузки.

Поиск оптимальной настройки дает следующие значения параметров: $K^{**} = (k_i, k_{II}, k_f)T = (99,9361; 3,5374; 114,4577)T$.

Проверим рассчитанные параметры регулятора при пуске асинхронного двигателя при тех же условиях, что и для предыдущего примера (рис. 4 в). Максимальное отклонение частоты – 18,22%, время восстановления частоты с точностью 0,5% – 5,1 с. Таким образом, переходный процесс не укладывается в заданные лимиты ни по времени, ни по отклонению. И это при условии, что настройка проверялась по линеаризованной модели, когда влиянием нелинейностей статических характеристик ГТУ пренебрегали.

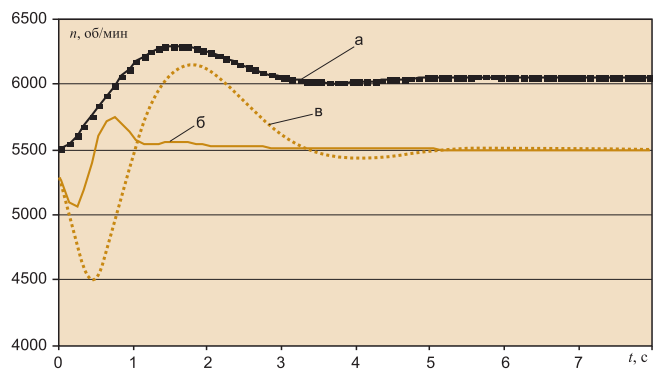


Рис. 4. Переходный процесс частоты вращения свободной турбины: а) при набросе сигнала задания 10%; б) при пуске асинхронного двигателя и автоматической настройке регулятора; в) при пуске асинхронного двигателя и настройке регулятора по набросу нагрузки

Выводы

Целесообразно при научно-исследовательских экспериментах использовать моделирование динамики ЭЭС с целью выбора настроек регуляторов САУ ГТЭС.

Разработанная методика настройки регуляторов ГТЭС позволяет автоматизировать процесс получения настроечных параметров регуляторов САУ и при необходимости выбор их структуры. В последнем случае структура регулятора (4) рассматривается как одна из перечня возможных.

Компьютерный расчет на примере пуска асинхронного двигателя подтверждает необходимость более строгого учета нагрузки при выборе настроек регуляторов ГТУ. Практикующийся в настоящее время при стендовых испытаниях упрощенный учет пуска асинхронного двигателя может привести к ошибке в определении настроечных параметров и, как следствие, к значительным отклонениям показателей ГТЭС от требований ГОСТ и ВРД.

Список литературы

1. Испытания авиационных двигателей / Под ред. Григорьева В.А. и Гишварова А.С. М.: Машиностроение, 2009.
2. Шевяков А.А., Мартыанова Т.С., Рутковский В.Ю. и др. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / Под ред. Шевякова А.А. и Мартыановой Т.С. М.: Машиностроение, 1989.
3. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций // Электричество. 2007. № 3.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия-Телеком, 2009.
5. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отделение, 1982.

Полулях Антон Иванович – канд. техн. наук, зам. начальника,

Лисовин Игорь Георгиевич – инженер отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования САУ ОАО "Авиадвигатель".

Контактный телефон (342) 281-35-30. E-mail: polulah@avid.ru lisovin@avid.ru

Кавалеров Борис Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Шигапов Артур Азгарович – инженер кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского государственного технического университета.

Контактный телефон (342) 239-18-21. E-mail: kbv@pstu.ru shigapov-art@mail.ru