

А.М. Белослудцев, Б.В. Кавалеров

Пермский государственный технический университет

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ
ВОЗБУЖДЕНИЯ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ
ПРОГРАММНО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА**

Рассматривается математическое моделирование систем возбуждения и регулирования синхронного генератора. Математические модели разработаны для использования в составе программно-моделирующего комплекса, предназначенного для настройки и тестирования алгоритмов управления САУ газотурбинных мини-электростанций.

Газотурбинные установки (ГТУ) для привода электрогенераторов в составе мини-электростанций разрабатываются на предприятии ОАО «Авиадвигатель». Они создаются на базе авиационных ГТУ, которые конвертируются для работы в наземных условиях. При этом турбина низкого давления ГТУ через редуктор вращает синхронный генератор, который вырабатывает электроэнергию. Мини-электростанция может состоять из различного числа синхронных генераторов (обычно от 2 до 6) различной мощности (от 2,5 до 25 МВт.) В целом вместе с линиями связи и распределенной комплексной электрической нагрузкой образуется единая взаимосвязанная динамическая система, предназначенная для электроснабжения потребителей. Жесткие требования к качеству вырабатываемой электроэнергии (по напряжению и частоте), к устойчивости и надежности системы электроснабжения обуславливают применение методов математического моделирования при исследовании и разработке систем управления мини-электростанциями. С этой целью на кафедре микропроцессорных средств автоматизации по заданию ОАО «Авиадвигатель» разработан программно-моделирующий комплекс, который позволяет одновременно производить расчет переходных процессов в ГТУ и ге-

нераторах, объединенных в электроэнергетическую систему. Для настройки алгоритмов управления ГТУ необходимо учитывать переходные процессы в генераторах и нагрузке. С этой целью в статье рассматривается математическое моделирование системы возбуждения синхронного генератора и регулятора возбуждения.

Генерирующий агрегат можно рассматривать как структуру из пяти элементов: генератора, источника энергии возбуждения с системой управления (системы возбуждения), автоматического регулятора возбуждения (АРВ), первичного двигателя (турбины) и автоматического регулятора скорости. На рис. 1. агрегат разделён на структурные элементы пунктирными линиями, элементы связаны между собой входными и выходными величинами [1].

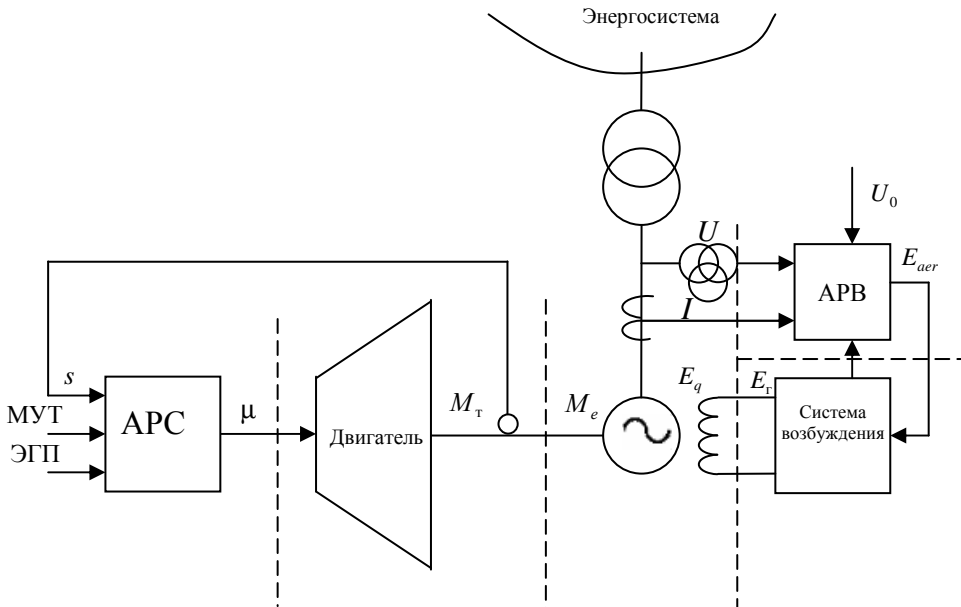


Рис. 1. Структурная схема агрегата турбина-генератор

На рисунке обозначено: U – напряжение, I – ток, M_e – момент нагрузки, АРВ – автоматический регулятор возбуждения, АРС – автоматический регулятор скорости, МУТ – механизм управления турбиной, ЭГП – вход в систему регулирования от электрогидравлической приставки для экстренного изменения мощности турбины (для паровой турбины), s – сигнал относительного отклонения частоты, μ – относительное перемещение регулирующего органа, M_T – момент

турбины, M_e – момент генератора, E_q – поперечная ЭДС генератора, отнесенная к номинальному напряжению статора, E_r – ЭДС генератора, равная напряжению возбуждения и отнесенному к базисному напряжению контура возбуждения (в относительных единицах $E_q = E_r$).

Регулирование возбуждения генераторов оказывает существенное влияние на переходные процессы в энергосистеме при малых и больших возмущениях, поэтому необходимо адекватное моделирование систем автоматического регулирования возбуждения.

Структурная схема бесщеточного возбудителя представлена на рис 2 [3].

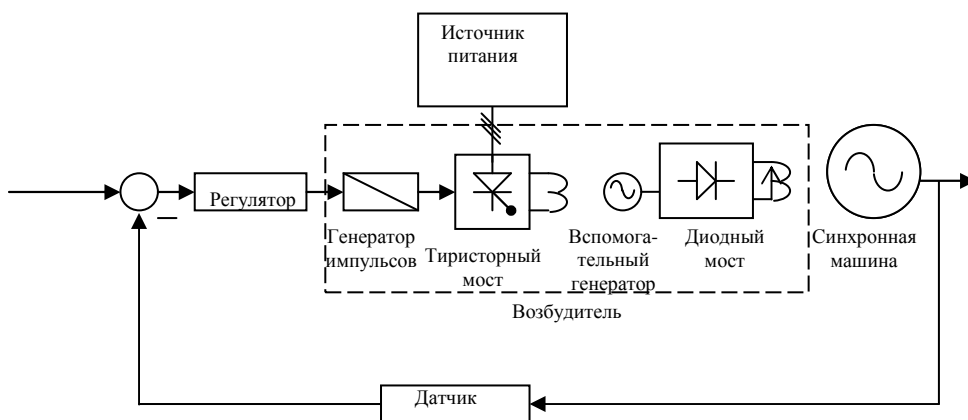


Рис. 2. Структурная схема бесщеточного возбудителя

Полная модель бесщёточной системы возбуждения включает в себя модель возбудителя, записанную по уравнениям Парка-Горева, и учитывает изменения угла коммутации вентилей в переходных режимах генератора, поэтому является весьма громоздкой и неудобной для использования. По этой причине рассмотрим два варианта упрощенной математической модели системы возбуждения синхронного генератора.

1. В [2] предложена достаточно точная модель, что подтверждается сопоставлением экспериментальных и расчётных частотных характеристик для реальной системы и её модели, и дана методика расчёта её параметров. Эта модель пригодна для расчётов электромеханических переходных процессов в энергосистемах, её структурная схема представлена на рис. 3.

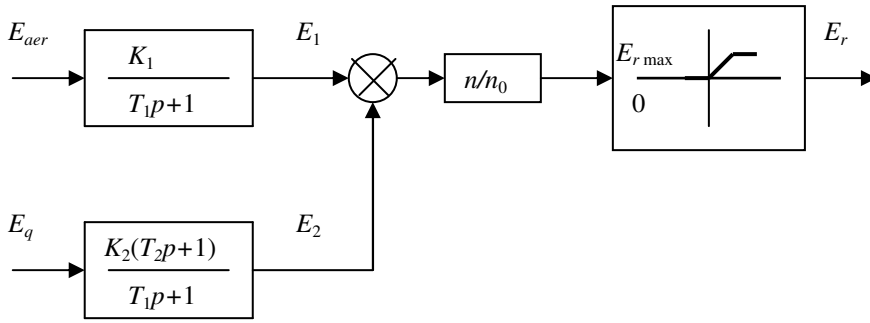


Рис. 3. Структурная модель бесщёточной системы возбуждения

Уравнения контура возбуждения и системы возбуждения в относительных единицах оказываются согласованными.

Параметры модели находятся по следующим уравнениям:

$$T_1 = \frac{1 - (X'_{db} - X_\gamma)F(\alpha_B, \gamma, \psi)}{1 - (X_{db} - X_\gamma)F(\alpha_B, \gamma, \psi)} T_{d0B}; \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{1 - (X'_{db} - X_\gamma)G(\alpha_B, \gamma, \psi)}{1 - (X_{db} - X_\gamma)G(\alpha_B, \gamma, \psi)} T_{d0B}; \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{1 - (X_{db} - X_\gamma)G(\alpha_B, \gamma, \psi)}{1 - (X_{db} - X_\gamma)F(\alpha_B, \gamma, \psi)} k; \quad (3)$$

$$k_1 = 1 + k_2. \quad (4)$$

Подробное вычисление параметров данной математической модели системы возбуждения представлено в [2].

2. Упрощенная математическая модель системы возбуждения со стандартными параметрами [3].

Согласно [3], при моделировании системы возбуждения тиристорный мост может быть представлен в виде передаточной функции (5) с задержкой по времени $T_{Т.М}$, равной $1/6$ периода частоты сети и постоянной времени T_M , равной 3–4 мс:

$$W_{Т.М}(p) = \frac{e^{-pT_{Т.М}}}{1 + pT_M}, \quad (5)$$

где

$$T_{Т.М} = \frac{1}{6} \cdot T = \frac{1}{6 \cdot \nu} = \frac{1}{6 \cdot 50} = 0,0033 \text{ с};$$

$$T_M = 0,003 \text{ с}.$$

В бесщёточной системе возбуждения передаточную функцию тиристорного моста необходимо умножить еще на две передаточные функции, одна из которых аппроксимирует возбудитель (синхронный генератор), а вторая – диодный мост. Синхронный генератор моделируется с постоянной времени 0,5–1 с, инерционность диодного моста учитывается постоянной времени 3–4 мс. Коэффициент усиления K учитывает усилительные свойства цепи. Упрощённая модель системы бесщёточного возбуждения представлена на рис. 4.

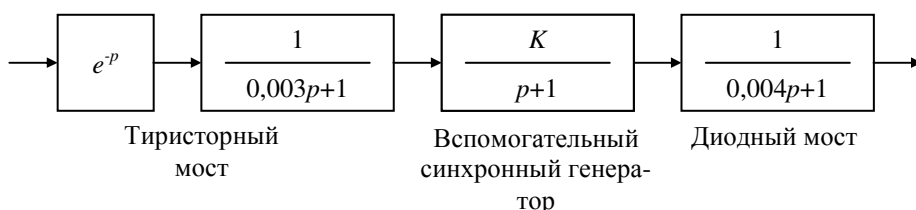


Рис. 4. Упрощенная модель системы бесщёточного возбуждения

Сравнительный анализ представленных математических моделей заставляет сделать выбор в пользу второго варианта. Основная причина следующая: для использования первого варианта требуется получить обширную информацию о большом числе параметров, что не всегда удобно и возможно. По этой причине второй вариант модели системы возбуждения был запрограммирован в составе программного комплекса.

Кроме того, в составе программного комплекса был реализован модуль, обеспечивающий расчет регуляторов. Пользователь программного комплекса имеет возможность самостоятельно запрограммировать регулятор произвольной структуры. В качестве иллюстрации на рис. 5. представлена система управления, в которую входят: ПИД-регулятор, система возбуждения и синхронный генератор, представленный апериодическим звеном.

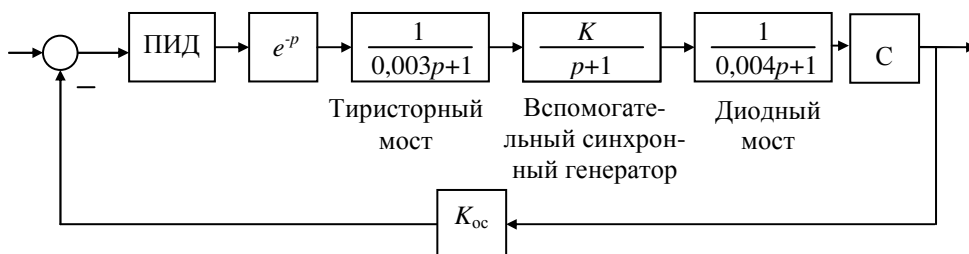


Рис. 5. Система с регулятором, системой возбуждения и синхронным генератором

Передаточная функция ПИД-регулятора выбирается настроенной на технический оптимум [4]:

$$W_p(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{2T_\mu K_1 K_2 K_3 K_\Gamma K_{oc} p}, \quad (6)$$

где T_1, T_2 – большие постоянные времени; T_μ – желаемая постоянная времени (сумма некомпенсированных малых постоянных времени); K_{oc} – коэффициент обратной связи.

Следует еще раз подчеркнуть, что структурная схема на рис. 5 имеет исключительно иллюстративный смысл. Системы автоматического регулирования возбуждения, применяемые на практике, имеют значительно более сложную структуру (сильного действия, с компаундированием, нелинейные, с самонастройкой и др.). Разработанный модуль программного комплекса как раз для этой цели и предназначен – пользователь сможет тестировать различные законы управления при различных возмущениях и режимах работы системы электропитания.

Библиографический список

1. Меркурьев Г.В., Шаргин Ю.М. Устойчивость энергосистем. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 350 с.
2. Юрганов А.А., Кожевников В.А., Регулирование возбуждения синхронного генератора. – М.: Наука, 1996. – 138 с.
3. Fusco G., Russo M. Adaptive Voltage Control in Power systems. – Italy: Springer, 2006. – 169 с.
4. Лукас В.А. Теория управления техническими системами. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. – 675 с.

Получено 08.07.2009