

УДК 621.314

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТУРБИНЫ И РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ
ВРАЩЕНИЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ
MATHEMATICAL MODELS OF TURBINE AND SPEED REGULATOR OF
SYNCHRONOUS MACHINE**

Д.В. Басик

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
volkau@bntu.by

D. Basik

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** представлены и исследуются математические модели турбины и регулятора частоты вращения синхронной машины, которые являются ключевыми элементами в системах энергетической генерации.*

***Abstract:** Mathematical models of turbine and synchronous machine speed regulator, which are key elements in power generation systems, are presented and investigated.*

***Ключевые слова:** математическая модель, численное моделирование, нелинейные модели.*

***Keywords:** mathematical model, numerical modeling, nonlinear models.*

Введение

В контексте повышения эффективности и надежности работы энергетических систем особую роль играет разработка математических моделей турбины и регулятора частоты вращения синхронной машины. Эти модели позволяют глубоко анализировать динамику работы ключевых компонентов генерации электроэнергии и вносить значимые улучшения в процессы являются:

– методы динамического моделирования, позволяющие оценивать поведение системы при различных условиях эксплуатации;

– численные методы, способствующие решению нелинейных уравнений, возникающих в процессах моделирования.

Суть данных подходов заключается в использовании комплексных математических уравнений для описания физических процессов в турбине и регуляторе, что позволяет точно предсказывать реакцию системы на внешние и внутренние возмущения. В частности, моделирование регулятора частоты вращения занимает ключевое место в обеспечении устойчивости частоты электроэнергии, что критически важно для поддержания баланса в энергосистеме.

Основная часть

Исходный режим всех агрегатов в условиях, в которых не учитывается изменение частоты при расчетах установившегося режима, определяется состоянием энергосистемы после отработки вторичных регуляторов частоты на регулирующих агрегатах. При этом частота практически будет соответствовать номинальной, а активная мощность – соответствовать мощности, заданной в гене-

раторных узлах. Таким образом, в исходном режиме статическая характеристика каждого агрегата будет представлять собой прямую, которая проходит через точку P_r и $f_0(\omega_0)$. Пример данной статической характеристики изображен на рисунке 1.

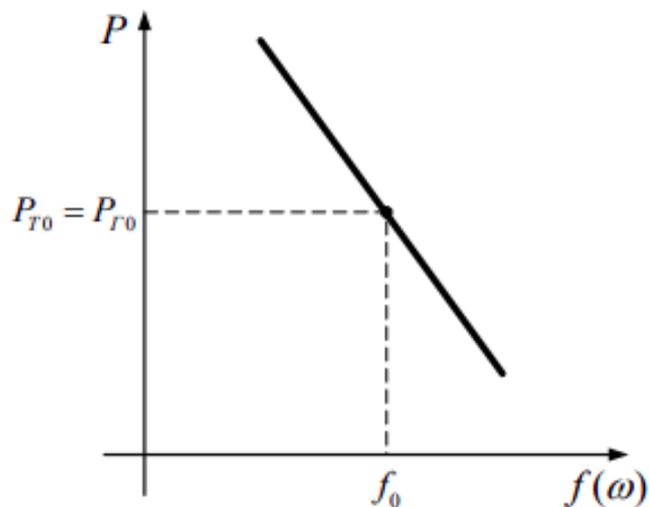


Рисунок 1 – Статическая характеристика агрегата

Первичным параметром, управляемым в системе автоматического регулирования, является частота вращения вала первичного двигателя. На валу двигателя действуют два момента: момент потерь и момент генератора с одной стороны, и вращающий момент с другой.

Регулирующее воздействие двигателя осуществляется через специальный механизм, который изменяет количество энергоносителя (топлива, пара, газа), от которого непосредственно зависит вращающий момент первичного двигателя. Для паровой турбины таковым механизмом является паровой клапан, для гидротурбины – направляющий аппарат, а для дизеля – рейка топливных насосов.

Дифференциальное уравнение первичного двигателя выводится из уравнения равновесия моментов на валу:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_э = M_д, \tag{1}$$

где ω – угловая скорость вращения вала двигателя;

J – момент инерции всего агрегата, приведенный к валу двигателя;

$M_э$ – электромагнитный момент генератора;

$M_д$ – вращающий момент.

Если выразить все переменные в виде относительных отклонений от состояния, когда агрегат находится на холостом ходу при полной скорости вращения, то уравнение агрегата можно записать следующим образом:

$$T_a r\phi + \beta\phi = \mu_p - M_э, \tag{2}$$

где $T_a = J \frac{\omega_n}{M_n}$ – постоянная времени разгона агрегата;

$\phi = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$ – относительное отклонение скорости вращения от скорости холостого хода;

μ_p – относительное отклонение координаты регулирующего органа от положения на холостом ходу;

M_β – относительная безразмерная величина электромагнитного момента генератора;

β – так называемый коэффициент самовыравнивания.

При положительном значении β двигатель функционирует как устойчивое апериодическое звено. В таком случае двигатель всегда сходится к установившемуся состоянию даже без применения регулятора скорости. При отрицательном значении β двигатель неспособен работать стабильно без использования регулятора скорости. При $\beta = 0$ двигатель представляет собой чисто интегрирующее звено.

Задержка в изменении мощности турбины происходит из-за того, что изменение положения регулирующих клапанов опережает изменение энергии в паровых объемах из-за их энергетической инерции.

Инерционность в изменении мощности паровой турбины без промежуточного перегрева пара определяется паровым объемом, заключенным между регулируемыми клапанами и первым рядом сопел турбины.

В данном случае турбина моделируется с использованием инерционного звена первого порядка (рисунок 2), где параметр μ отражает положение регулирующих клапанов.

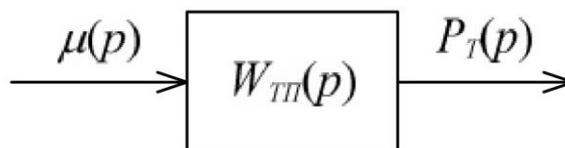


Рисунок 2 – Модель паровой турбины без промежуточного перегрева пара.

Тогда

$$W_{TP}(p) = \frac{1}{T_{II}p+1}, \tag{3}$$

где T_{II} – постоянная времени парового объема в ЦВД.

При анализе турбины с промежуточным перегревом пара влияние промежуточного перегрева объясняется тем, что во всех компонентах промежуточного перегрева содержится значительный объем пара. Это приводит к существенной задержке в изменении мощности цилиндров высокого и низкого давления (ЦВД и ЦНД) по сравнению с изменением положения регулирующих клапанов. Эта задержка значительно превышает задержку, обусловленную паровым объемом в цилиндре высокого давления (ЦВД).

Запаздывание в тракте промежуточного перегрева также моделируется с использованием инерционного звена первого порядка, представленного следующей передаточной функцией:

$$W_{III}(p) = \frac{1}{T_{III}p+1}, \tag{4}$$

где T_{III} – постоянная времени парового объема в промперегреве.

Суммарная мощность, которую вырабатывают турбины, некоторым образом распределяется между ЦВД (до промперегрева), ЦСД и ЦНД (после промперегрева). Доля мощности ЦВД (обозначим её C) составляет в установившемся режиме $C = 0,15 - 0,3$ от полной мощности турбины. В программе «MUSTANG» используется параметр $D_{П0} = 1 - C$.

На рисунке 3 показано примерное соотношение между мощностью турбины и положением клапанов, где значение $\mu = 1$ соответствует открытию клапанов, соответствующему номинальной мощности.

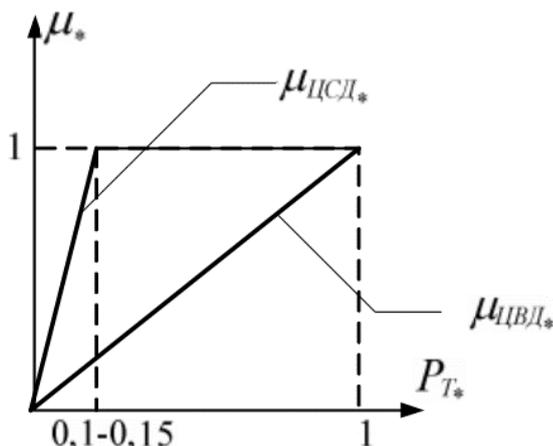


Рисунок 3 – Зависимость положения клапанов ЦВД и ЦСД от мощности турбины

Задержка в изменении мощности в цилиндре высокого давления (ЦВД) моделируется так же, как и в турбине без промежуточного перегрева пара. Учитывая это обстоятельство, структурная схема модели турбины с промежуточным перегревом пара представлена на рисунке 4.

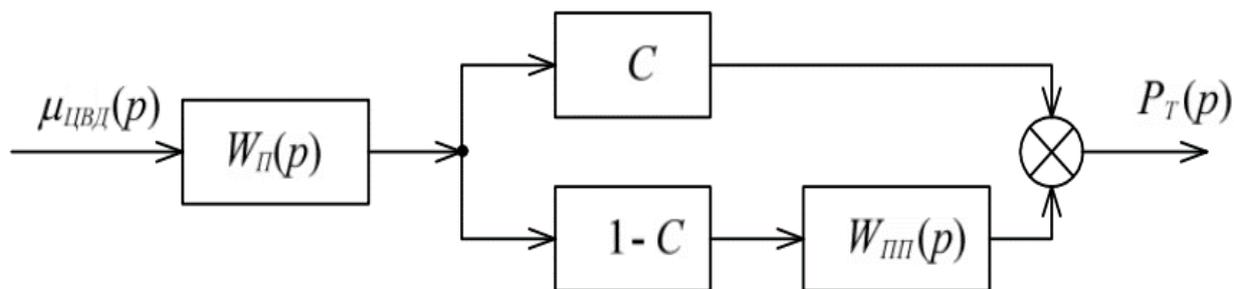


Рисунок 4 – Структурная схема модели турбины с промежуточным перегревом пара

Практически значение $T_{П}$ много меньше, чем $T_{ПП}$, поэтому часто величиной $T_{П}$ пренебрегают и учитывают только $T_{ПП}$. Большая задержка в изменении мощности турбины из-за промежуточного перегрева пара ухудшает качество регулирования, поэтому требуются специальные меры для компенсации этого эффекта. Одним из распространенных методов решения этой проблемы является ускорение открытия клапанов ЦВД в переходном режиме. Этот метод известен как начальная коррекция неравномерности (НКН) регулирования турбины. Сигнал для введения компенсации формируется в соответствии с отношением:

$$\mu_{\text{НКН}} = k_{\text{НКН}}(P_{\Gamma^*} - k\pi_2), \quad (5)$$

где $k_{\text{НКН}}$ – коэффициент пропорциональности;

k – коэффициент, который выбирается коэффициент таким образом, чтобы обе составляющие сигнала $\mu_{\text{НКН}}$ в установившемся режиме взаимно компенсировались, то есть в установившемся режиме $\mu_{\text{НКН}} = 0$. В установившемся режиме давление за промежуточным перегревателем π_2 пропорционально расходу пара через турбину и, следовательно, мощности генератора P_{Γ} .

Заключение

Рассмотрены модели, позволяющие анализировать динамические характеристики турбин и регуляторов частоты, их взаимодействие и поведение при различных режимах эксплуатации. Модели учитывают важнейшие параметры, такие как инерционность турбины, характеристики регулирующих клапанов, электромагнитные свойства генераторов и реакцию системы на внешние возмущения.

Математическая модель турбины и регулятора частоты вращения составляется индивидуально для каждого типа первичного двигателя и зависит от его исполнения. Для паровой турбины регулирующим органом является паровой клапан, для гидротурбины – направляющий аппарат, для дизеля – рейка топливных насосов.

Например, для паровой турбины может быть два варианта математической модели в зависимости от её исполнения: модель турбины без промежуточного перегрева пара и модель турбины с промежуточным перегревом пара. Модели будут значительно отличаться. Если для турбины без промежуточного перегрева пара моделируется простым инерционным звеном 1-го порядка, то для турбины с промежуточным перегревом пара это будет суммарная мощность, которая распределена некоторым образом между ЦВД, ЦСД и ЦНД. При этом необходимо учитывать запаздывание в тракте промперегрева, который также моделируется инерционным звеном 1-го порядка.

Реализация такого подхода в промышленности может привести к сокращению времени отклика на возмущения, повышению точности поддержания заданных режимов работы и улучшению общих показателей стабильности и качества выработки электроэнергии.

Литература

1. Калентионок, Е.В. Устойчивость электроэнергетических систем / Е. В. Калентионок. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 376 с.
2. Вайнтешин, Р.А. Программные комплексы в учебном проектировании электрической части электростанций: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, В.В. Шестакова, Н.В. Коломиец. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 123 с.
3. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: учебник для электроэнергетических специальностей вузов / В.А. Веников. – Изд. 4-е. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.