электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель Общероссийская общественная организация "Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова"
ISSN 2307-0609

 # 03, сентябрь 2019

УДК: 62-843.8

Синтез системы автоматического управления энергетической газотурбинной установкой

Сейтенов Д., *магистрант*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Компьютерные системы автоматизации производства»
sds17@mail.ru

Научный руководитель: Арбузов Е.В., к.т.н, доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация: В данной статье решена задача синтеза системы автоматического управления (САУ) энергоустановкой. Проведен анализ математической модели синхронного генератора и на основе анализа разработана рациональная структура САУ. С применением современных вычислительных средств (MATLAB) проведено визуальное моделирование САУ и установлены оптимальные величины параметров, обеспечивающие требуемое качество и высокую надежность всей системы. Результаты моделирования подтвердили оптимальность реализации закона ПИД-регулирования.

Ключевые слова: энергетическая газотурбинная установка (gas turbine power plant), система автоматического управления (automatic control system), синхронный генератор (synchronous generator), визуальное моделирование (visual modeling), ПИД-регулирование (PID control).

Введение

Известно, что энергетическая газотурбинная установка (ЭГТУ) состоит из двух основных технических объектов (рисунок 1), функционирующих как единое целое [1]. Однако, рассмотрим задачу синтеза системы автоматического управления (САУ) конкретной энергоустановкой как единым техническим объектом, что требует разработки единого подхода к моделированию и каждого элемента, и всей энергоустановки в целом.

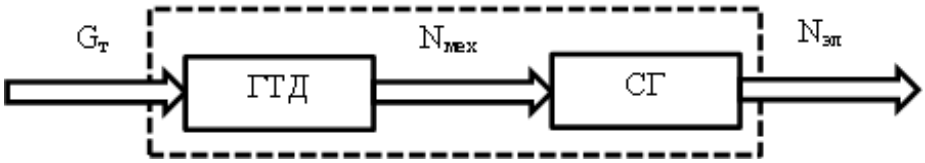


Рис. 1. Структурная схема энергоустановки

Для решения задачи синтеза САУ сложным объектом, как ЭГТУ, последовательно рассмотрим четыре основных этапа задач:

– формирование и выбор цели управления;

– анализ математической модели объекта управления;

математические модели каждого отдельного объекта ЭГТУ достаточно хорошо известны и описаны в литературе [1,2];

– разработка структуры системы автоматического управления;

– выбор динамических параметров системы.

В предыдущей статье была рассмотрена более подробно математическая модель газотурбинного двигателя (ГТД), как привода синхронного генератора (СГ) [3]. Поэтому, первая из вышеперечисленных задач частично решена.

В данной статье произведем анализ математической модели синхронного генератора и будем решать остальные задачи.

1. Исходные данные. Математическая модель синхронного генератора

Для синхронных генераторов, как и для газотурбинных двигателей, имеются универсальные характеристики, известные из литературы [4], с помощью которых генератор можно представить следующими уравнениями (1) (при условии постоянства частоты вращения):

$$\begin{cases} U = E - R * I - L\dfrac{dL}{dt} \\ T_e \dfrac{dE}{dt} + E = k_1 e \\ e = k_2 i_в \\ L_в \dfrac{di_в}{dt} + r_в i_в = U_в \end{cases},$$

где U – выходное напряжение статора;

E – электродвижущая сила (э.д.с.) генератора;

I – ток статора;

R – суммарное активное сопротивление статора;

L – суммарное индуктивное сопротивление статора;

e – э.д.с. генератора, полученная по статической характеристике;

$i_в$ – ток возбуждения генератора;

$U_в$ – напряжение на обмотках возбуждения генератора;

$L_в$, $r_в$ – суммарное активное и индуктивное сопротивление обмоток возбуждения;

k_1 – коэффициент, учитывающий разницу между теоретической и фактической э.д.с, наводимой в обмотке статора (определяется экспериментально);

k_2 – коэффициент пропорциональности между э.д.с. генератора и током возбуждения в линейной части характеристики;

T_e – постоянная времени, учитывающая инерционность насыщения магнитного поля.

2. Расчетная часть. Определение передаточных функций системы

Генератор. Так как при фиксированном возбуждении генератор имеет две степени свободы, то необходимо иметь для него два исходных дифференциальных уравнения:

$$\begin{cases} U = E - R*I - L\dfrac{dI}{dt} \Rightarrow \\ T_e\dfrac{dE}{dt} + E = k_1 e \end{cases}$$

$$L\frac{dI}{dt} + R*I + U = k_1 e - T_e\frac{dE}{dt}$$

$$L\frac{dI}{dt} + R*I + U + T_e\frac{dE}{dt} = k_1 e \Rightarrow \frac{d}{dt} = p$$

$$LpI + R*I + U + T_e p\,E = k_1 e$$

$$R + I\left(\frac{L}{R}p + 2 + T_e p\right) = k_1 e$$

$$G_1(p) = \frac{k_1}{\frac{L}{R}p + 2 + T_e p} \Rightarrow \frac{L}{R} = T_L$$

$$G_1(p) = \frac{k_1}{p\,(T_L + T_e) + 2} \Rightarrow T_L + T_e = T$$

$$G_1(p) = \frac{k_1}{T_p + 2}.$$

Будем считать, что э.д.с генератора (e) при сравнительно не больших напряжениях якоря (примерно до половины номинального) связана с током возбуждения (i_B) линейно:

$$e = k_2 i_B,$$

отсюда получаем передаточную функцию:

$$G_2(p) = k_2.$$

Обмотка возбуждения генератора. Дифференциальное уравнение можно записать на основе второго закона Кирхгофа:

$$L_B\frac{di_B}{dt} + r_B i_B = U_B.$$

Приведем это уравнение к стандартному виду:

$$\frac{L_B}{r_B}\frac{di_B}{dt}+i_B=\frac{U_B}{r_B}\Rightarrow\frac{d}{dt}=p\ ,\frac{L_B}{r_B}=T_B$$

$$T_B p i_B+i_B=\frac{U_B}{r_B}$$

$$i_B(T_B p+1)=\frac{U_B}{r_B}$$

$$G_3(p)=T_B p+1=\frac{U_B}{i_B r_B}=k_3$$

$$G_3(p)=\frac{k_3}{T_B p+1}\ .$$

Чувствительный элемент. Напряжение на выходе потенциометров (обратная связь) будет описываться следующей передаточной функцией:

$$G_4(p)=k_4\ .$$

Ниже в таблице 1 приведены числовые значения параметров всех передаточных функций, которые были определены сверху.

Таблица 1

Численные значения параметров передаточных функций

k_1	k_2	k_3	k_4	T	T_B
2	2,6	30	3,6	0,5	0,8

Таким образом, на основе математических моделей технических объектов (ГТД, СГ) мы плавно перешли на передаточные функции [5], которые свою очередь можем использовать для разработки структуры САУ ЭГТУ.

2.1. Разработка структуры системы автоматического управления энергетической газотурбинной установкой

В наши дни широкое применение получили современные вычислительные средства в исследовании динамических систем, основанные на использовании хорошо разработанных пакетов прикладных программ, реализующих известные методы анализа, синтеза и оптимизации САУ. Среди таких программных средств, наиболее известна система Matlab, в которой реализован язык программирования высокого уровня для технических вычислений [6].

Составляем в интерактивной системе MATLAB (Simulink) структурную схему системы автоматического управления ЭГТУ при использовании трех типов цифровых регуляторов:

1. Пропорционально-интегрирующий (ПИ) (рисунок 2).

2. Пропорционально-дифференцирующий (ПД) (рисунок 3 и 4).

3. Традиционный пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор (рисунок 6).

Для цифровых регуляторов выбраны начальные произвольные коэффициенты: K=0,9605; K_i=0,0437; K_d=0,8175, которые были определены в литературе [7]. Однако, с целью улучшения качества переходного процесса, функция автоматического подбора коэффициентов Tuner определит наиболее правильные коэффициенты [8], которые введены в настройках регулятора.

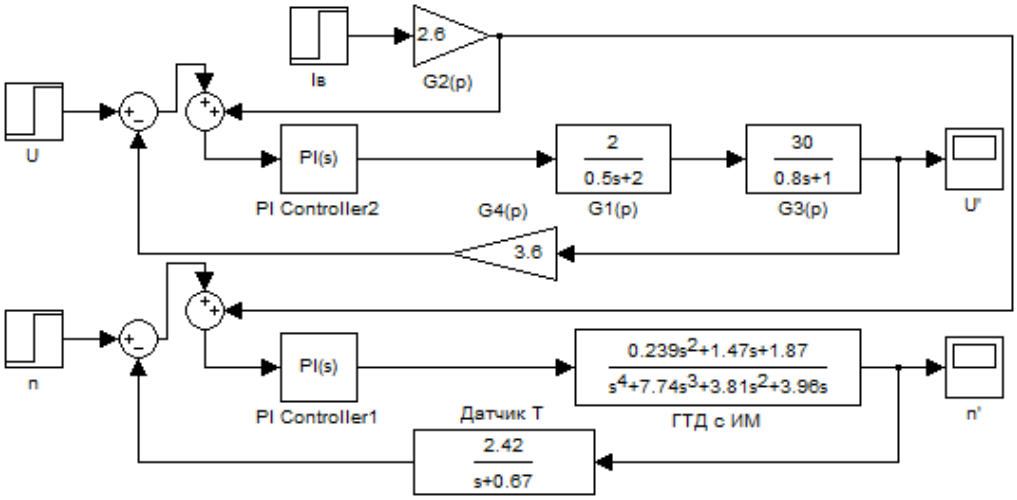
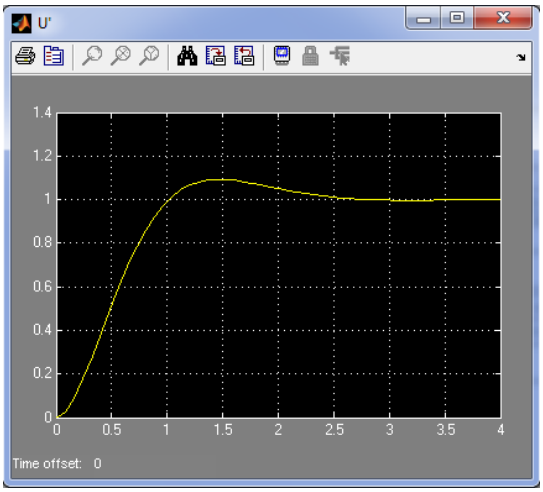


Рис. 2. Структура САУ с ПИ-регулятором

Запустив систему, мы можем увидеть в осциллограмме следующую картину (рисунок 3а, б):



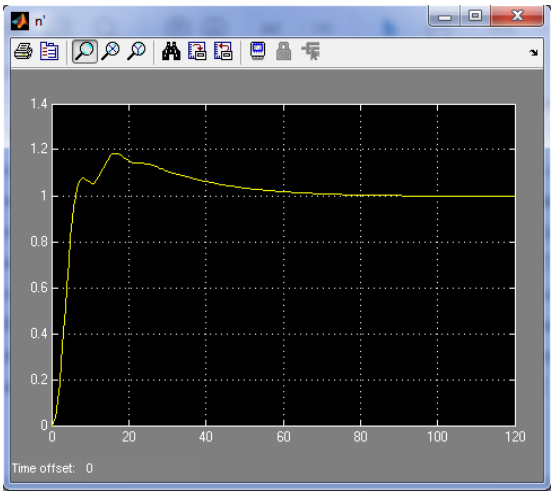


Рис. 3. Графики переходных процессов с ПИ-регулятором в САУ ЭГТУ в режиме совместного управления: а) по каналу управления напряжением СГ; б) по каналу управления оборотами ГТД

После автоматического подбора коэффициентов мы можем увидеть из рис. 3а, б, что система с ПИ-регулятором отвечает требованию устойчивости. Однако, время регулирования:

– по каналу управления напряжением СГ $t_р$=3,4 с и перерегулирование $\sigma = \frac{1,09-1}{1} * 100\% = 9\%$;

– по каналу управления оборотами ГТД $t_р$=87 с и перерегулирование $\sigma = \frac{1,18-1}{1} * 100\% = 18\%$.

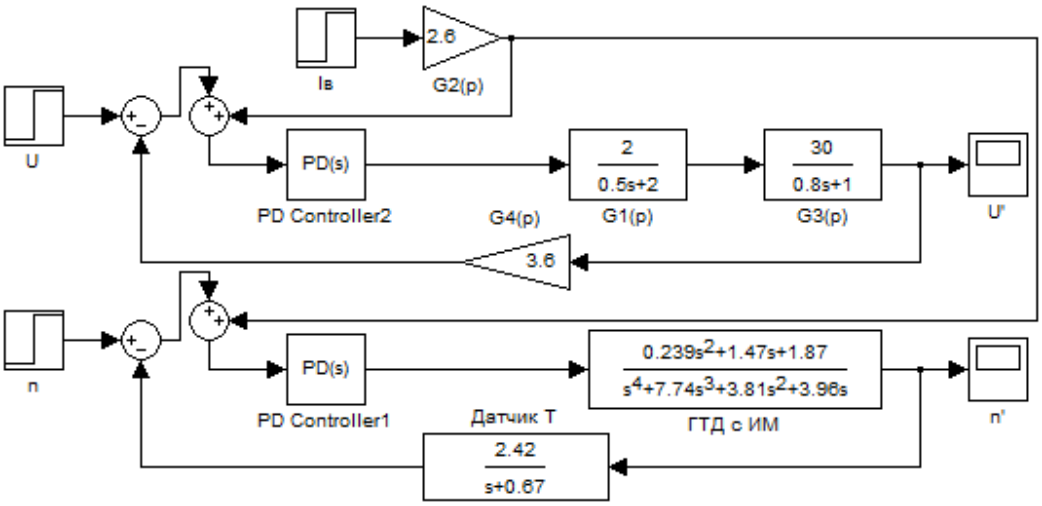


Рис. 4. Структура САУ с ПД-регулятором

Также запустив систему, мы можем увидеть в осциллограмме следующую картину (рисунок. 5а, б):

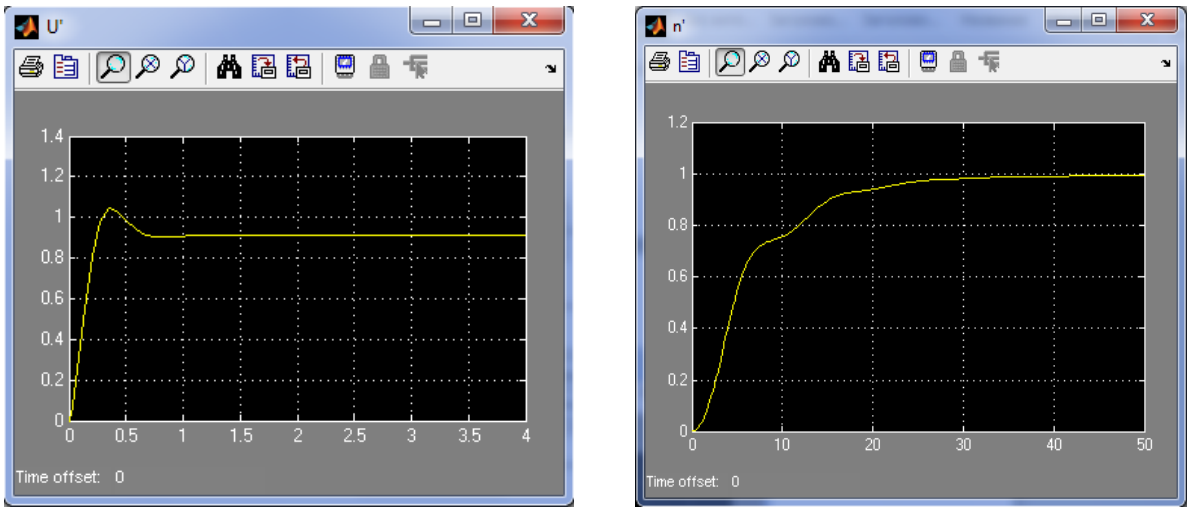


Рис. 5. Графики переходных процессов с ПД-регулятором в САУ ЭГТУ в режиме совместного управления: а) по каналу управления напряжением СГ; б) по каналу управления оборотами ГТД

После автоматического подбора коэффициентов мы можем увидеть из рисунка 5, что система с ПД-регулятором отвечает требованию устойчивости. Однако, сигнал:

– по каналу управления напряжением СГ не достигает заданного значения (при единичном ступенчатом сигнале), что является категорически недопустимым;

– по каналу управления оборотами ГТД t_p=42 с и перерегулирование $\sigma = \frac{1-1}{1} * 100\% = 0\%$.

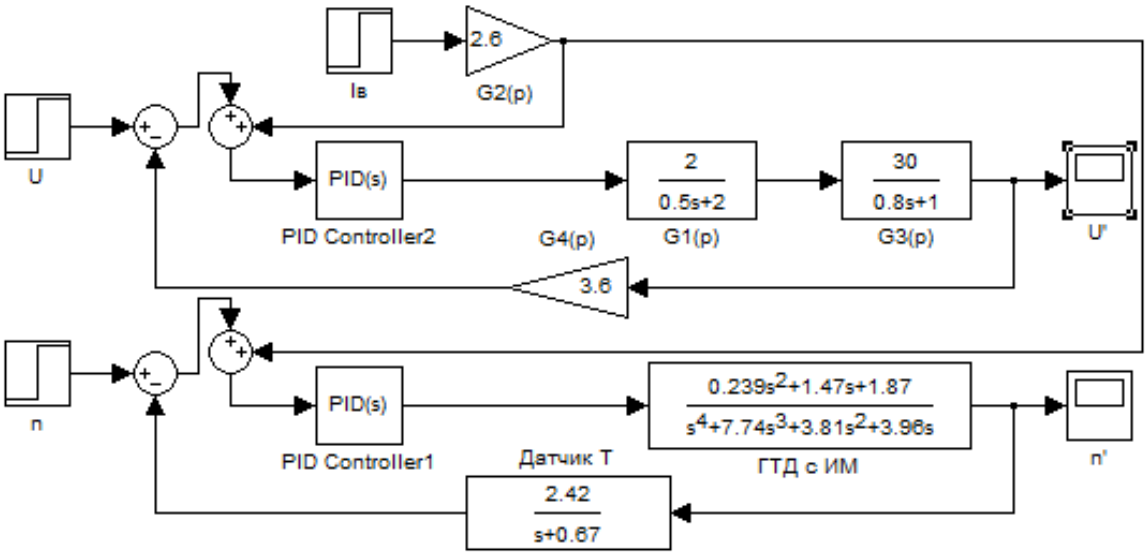


Рис. 6. Структура САУ с ПИД-регулятором

Также запустив систему, мы можем увидеть в осциллограмме следующую картину (рисунок 7а, б):

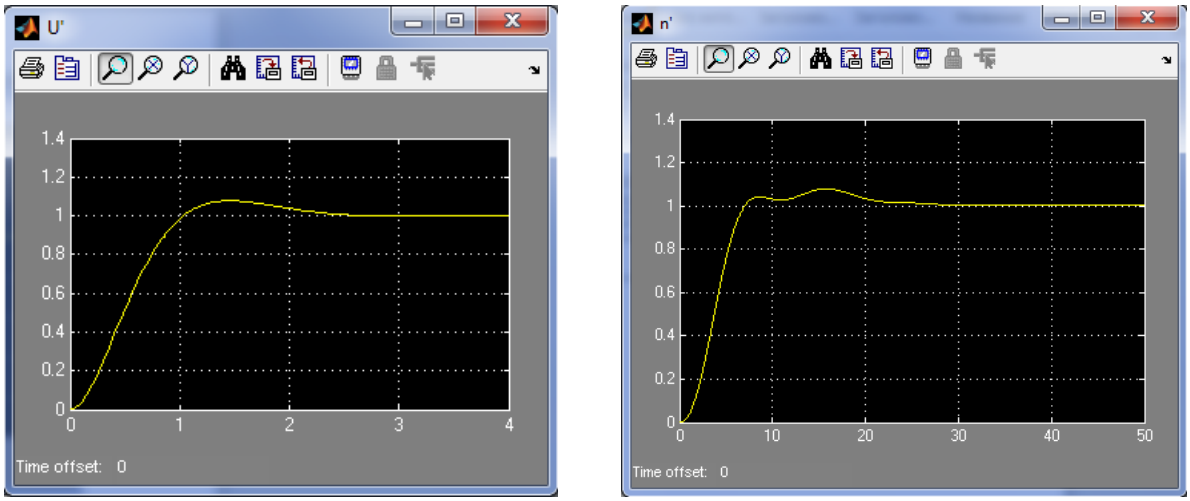


Рис. 7. Графики переходных процессов с ПИД-регулятором в САУ ЭГТУ в режиме совместного управления: **а)** по каналу управления напряжением СГ; **б)** по каналу управления оборотами ГТД

После автоматического подбора коэффициентов мы можем увидеть из рис. 7а, б, что система с ПИД-регулятором отвечает требованию устойчивости. Также минимальное время регулирования по сравнению с применением других регуляторов:

– по каналу управления напряжением СГ $t_р$=2,5 с и перерегулирование $\sigma = \frac{1,06-1}{1} * 100\% = 6\%$;

– по каналу управления оборотами ГТД $t_р$=28 с и перерегулирование $\sigma = \frac{1,08-1}{1} * 100\% = 8\%$, что соответствует допустимым пределам [9].

Заключение

Проведенные исследования синтеза САУ ЭГТУ показывают: на основе решения поставленных задач разработана рациональная структура САУ ЭГТУ и установлены оптимальные величины параметров, обеспечивающие требуемое качество и высокую надежность всей системы.

Поэтому можно заключить, что разрабатываемая система управления ЭГТУ на основе реализации закона ПИД-регулирования обладает хорошей робастностью [10], т.е. способностью сохранять требуемое качество несмотря на неточности модели или существенную неопределенность характеристик объекта управления.

Список литературы

[1]. Осыка А.С., Цанев С.В., Буров В.Д., Земцов А.С. Газотурбинные энергетические установки. Учеб. пособие. М.: МЭИ, 2012. 428 с.

[2]. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Машиностроение, 1980. 550 с.

[3]. Арбузов Е.В., Сейтенов Д. Оценка робастности системы автоматического управления газотурбинным двигателем при различных цифровых регуляторах // Инженерный вестник. 2015. №10. С. 557-565.

[4]. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. 752 с.

[5]. Бейсенби М.А. Методы повышения потенциала робастной устойчивости систем управления. Астана: ЕНУ, 2011. 352 с.

[6]. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. 592 с.

[7]. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: «Радіоаматор», 2008. 972 с.

[8]. Ротач В.Я., Кузищин В.Ф., Клюев А.С. Автоматизация настройки систем управления / под ред. В.Я. Ротача. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272 с.

[9]. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1989. 304 с.

[10]. K. Zhou, J.C. Doyle. Essentials of robust control. Prentice-Hall, 1998. 411 p. Режим доступа: https://www.academia.edu/8396558/Essentials_of_Robust_Control (дата обращения 20.03.2019).