

УДК 621.438

А.И. ТАРАСЕНКО*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина***ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГТД СО СВОБОДНОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ**

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) со свободной силовой турбиной, работающей на генератор в условиях электростанции. Регулирование газотурбинного двигателя осуществляет двухимпульсный регулятор на основе управляющей ЭВМ. Такой регулятор наряду с измерением скоростей вращения контуров газотурбинного двигателя осуществляет измерения активной мощности, вырабатываемой генератором. Предложена упрощенная математическая модель газотурбинного двигателя, позволяющая разработать алгоритм регулирования и смоделировать переходные процессы в газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, регулятор, пропорционально-интегральный, пропорциональный алгоритм, управляющая ЭВМ, двухимпульсный регулятор.

Введение

Рассматривается газотурбинный двигатель (ГТД) содержащий свободную силовую турбину и газогенератор (одно или двухкаскадный турбокомпрессор).

Система регулирования ГТД имеет датчики скорости вращения силовой турбины, скорости вращения контуров турбокомпрессора и датчик активной мощности генератора. Считается, что система регулирования обрабатывает сигналы этих датчиков корректно и с достаточной скоростью.

1. Формулирование проблемы

Требуется получить дифференциальное уравнение движения газотурбинного двигателя с учетом применяемых алгоритмов регулирования.

Решая и анализируя полученные уравнения, необходимо сформировать алгоритм регулирования газотурбинного двигателя, который использует информацию, как от датчиков скорости вращения, так и от датчика активной мощности генератора (двухимпульсный регулятор). Полученный алгоритм должен использоваться в регуляторе на основе управляющей ЭВМ, т.е. алгебраические и арифметические вычисления средней сложности допустимы.

1.1 Общие соображения

Известно, что мощность газотурбинного двигателя пропорциональна скорости вращения газогенератора (в случае двухкаскадного турбокомпрессора это скорость вращения контура высокого давления).

Это означает, что при известной мощности, вы-

рабатываемой генератором (она измеряется), можно указать требуемую скорость вращения турбокомпрессора, при которой двигатель будет в равновесии.

Уравнение движения турбокомпрессора может быть записано в следующем виде [1 – 3].

$$\dot{n}_{ТК} \cdot T_{ТК} = \mu_T - \mu_K, \quad (1)$$

где $n_{ТК} = \frac{\omega_{ТК}}{\omega_H}$ – нормированная скорость вращения турбокомпрессора;

$$T_{ТК} = J \frac{\omega_H}{M_H} - \text{постоянная времени турбокомпрессора};$$

ω_H – номинальная угловая скорость вращения турбокомпрессора;

$$\mu_T = \frac{M_T}{M_H} - \text{нормированный момент турбины};$$

$$\mu_K = \frac{M_K}{M_H} - \text{нормированный момент компрессора};$$

M_H – момент, соответствующий номинальному режиму.

Если момент, потребляемый компрессором, пропорционален квадрату угловой скорости то [4]

$$\mu_K = n_{ТК}^2.$$

Момент, развиваемый турбиной, можно аппроксимировать параболой с максимумом на номинальной скорости вращения

$$\mu_T = g_T \cdot \bar{\eta} [1 - (1 - n_{ТК})^2],$$

где $g_T = \frac{G_T}{G_{ТН}}$ – относительный расход топлива;

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_n} \text{ -- относительный КПД.}$$

После несложных преобразований запишем

$$\mu_T = g_T \cdot \bar{\eta} (2n_{TK} - n_{TK}^2).$$

Подставив полученные крутящие моменты для компрессора и турбины в (1), получим относительный расход топлива для равновесного (статического) режима

$$g_C = \frac{n_{TK}}{\bar{\eta} (2 - n_{TK})}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что для требуемой относительной скорости турбокомпрессора, можно вычислить относительный расход топлива, при котором эта скорость стабилизируется.

Уравнение движения турбины генератора может быть записано в следующем виде [1-3].

$$\dot{n}_Г \cdot T_Г = \mu_{ТГ} - \mu_Г, \quad (3)$$

где $\mu_{ТГ} = \frac{M_{ТГ}}{M_{НГ}}$ -- нормированный момент турбины генератора;

$\mu_Г = \frac{M_Г}{M_{НГ}}$ -- нормированный момент генератора;

$M_{НГ}$ -- момент генератора, соответствующий номинальному режиму.

Нормированный момент, потребляемый генератором, считается известным (он измеряется). Момент, вырабатываемый турбиной, определяется из выражения

$$\mu_{ТГ} = n_{TK} \cdot (2n_{TK} - n_{TK}^2), \quad (4)$$

тогда необходимую скорость турбокомпрессора можно определить из выражения

$$n_{TK} = \frac{\mu_{ТГ}}{2n_{TK} - n_{TK}^2},$$

а с помощью выражения (2) определяют требуемый расход топлива.

Такой алгоритм будем называть статическим. Переходный процесс, полученный по изложенному выше алгоритму, показан на графике рис. 1. График получен путем решения уравнений (1) и (3) численным методом на ЭВМ [6]. Из графика видно, что скорость вращения поддерживается не удовлетворительно. Система находится в состоянии типа безразличное равновесие.

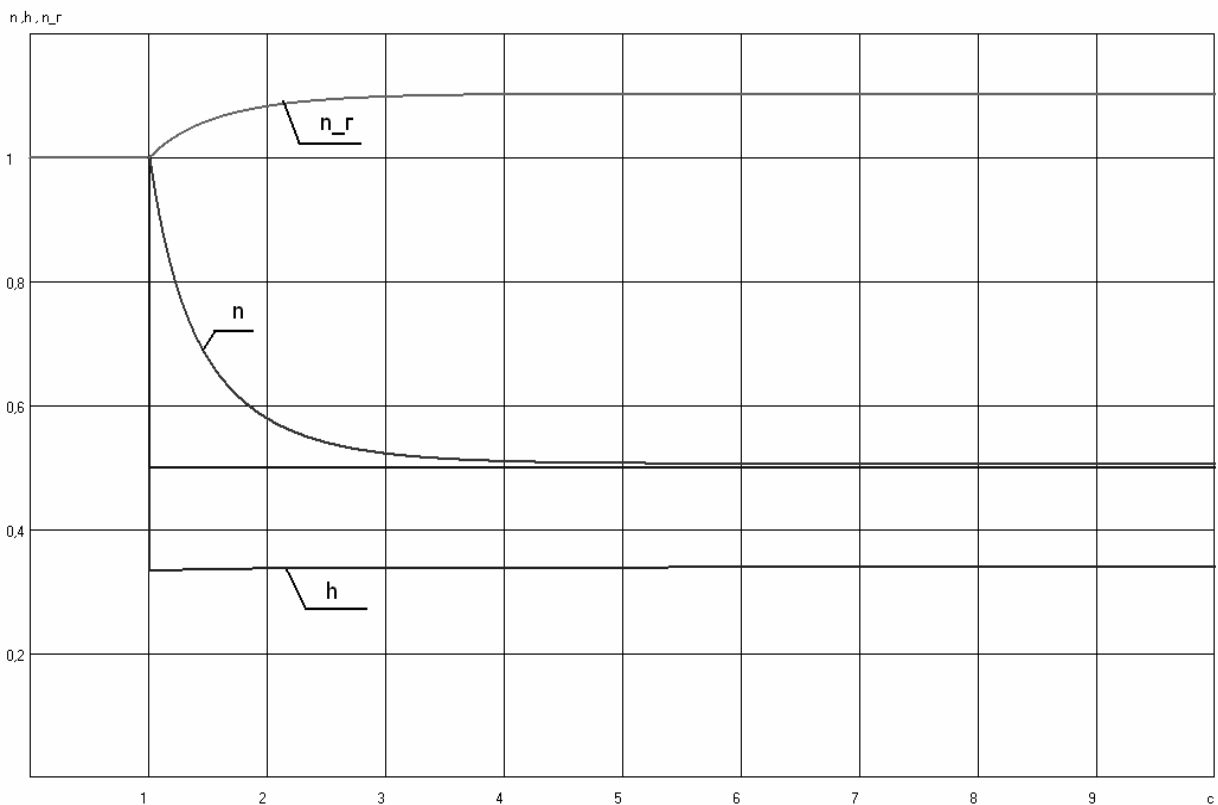


Рис. 1. Переходные процессы при работе по статическому алгоритму.

n -- скорость вращения турбокомпрессора; $n_Г$ -- скорость вращения генератора; h -- расход топлива.

Для устранения этого недостатка можно дополнить алгоритм пропорциональным регулированием.

Относительный расход топлива можно вычислить с помощью следующего выражения

$$h = g_C + k \cdot g_R. \quad (5)$$

Рассмотрим пропорциональный алгоритм регулирования [1]

$$\xi_R = \begin{cases} 1 & \text{при } n_\Gamma \leq 1 - \Delta; \\ \frac{1 - n_\Gamma}{\Delta} & \text{при } 1 + \Delta > n_\Gamma > 1 - \Delta; \\ -1 & \text{при } n_\Gamma > 1 + \Delta. \end{cases}$$

Это выражение получено из условия, что заданная скорость вращения генератора равна единице, т.е. частота, вырабатываемая генератором номинальная.

Коэффициент k в выражении (5) нужно подобрать так, чтобы не было колебательного процесса.

Переходный процесс газотурбинного двигателя

при резком сбросе 50% нагрузки показан на графике рис 2. Из графика видно вполне удовлетворительный характер переходного процесса. На графике видно, что двигатель склонен к колебаниям даже при пропорциональном регулировании. Исходя из этого, пропорционально-интегральный алгоритм регулирования следует применять осторожно. Очевидным способом повышения устойчивости двигателя с регулятором может быть зона нечувствительности в пропорциональной части регулятора.

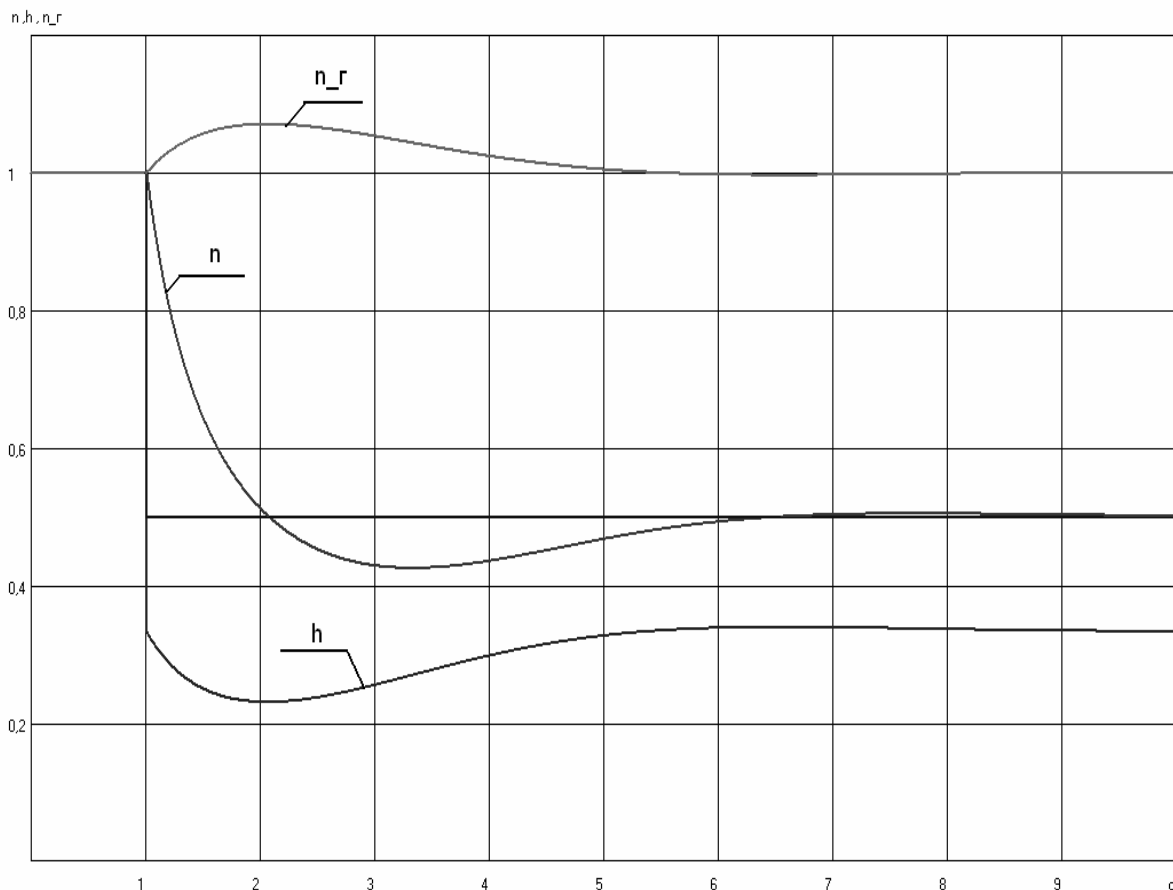


Рис. 2. Переходные процессы при работе по статическому и пропорциональному алгоритму n – скорость вращения турбокомпрессора; n_Γ – скорость вращения генератора; h – расход топлива

Причиной потери устойчивости двигателя со свободной силовой турбиной является запаздывание связанное с турбокомпрессором.

Действительно, для того чтобы увеличить крутящий момент на валу силовой турбины (турбины генератора), нужно время необходимое для выхода на соответствующий режим турбокомпрессора. Поэтому важное значение имеет отношение постоянных времени контура генератора и турбокомпрессора.

Желательно, чтобы постоянная времени силовой турбины (вместе с генератором) была как ми-

нимум в три раза больше постоянной времени турбокомпрессора.

При работе на реальном ГТД надо учитывать возможность погасания камеры сгорания при резком сбросе топливоподачи. Если резко увеличить подачу топлива, то есть возможность возникновения помпажа, что недопустимо. Поэтому в зависимости от скорости вращения турбокомпрессора (или КВД) можно задать границы изменения топливоподачи. И, если сформированная регулятором топливоподача больше допустимой, то надо отработать топливоподачу, обусловленную ограничением [5].

2. Формирование алгоритма

Алгоритм должен быть статический с пропорциональной частью.

Коэффициент пропорциональной части алгоритма используемый в (5) может находиться в диапазоне 0,1–0,2, а выработанная пропорциональной частью топливоподача может быть отрицательной.

Заключение

Предложен алгоритм регулирования ГТД со свободной силовой турбиной для электростанции, который представляет собой комбинацию статического и пропорционального.

Желательно чтобы постоянная времени силовой турбины (вместе с генератором) была как минимум в три раза больше постоянной времени турбокомпрессора. Заброс скорости вращения турбины генератора при резком сбросе нагрузки обратно пропорционален отношению постоянной времени силовой турбины к постоянной времени турбокомпрессора. Это означает, что по сравнению с комплексом «свободная силовая турбина-генератор» турбокомпрессор должен быть легким.

Литература

1. Сорока Я.Х. Теория и проектирование судовых газотурбинных двигателей: Учебное пособие / Я.Х. Сорока. – Л.: Судостроение, 1982. – 112 с.
2. Кирилов И.И. Регулирование паровых и газовых турбин / И.И. Кирилов. – М.: Госэнергоиздат, 1952. – 226 с.
3. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1968. – 535 с.
4. Теория и расчет турбокомпрессоров: Учеб. пособие для студентов вузов машиностроительных специальностей / К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин, С.А. Анисимов и др.; Под общ. ред. К.П. Селезнева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 392 с.
5. Тарасенко А.И. Нелинейная динамическая модель судового газотурбинного двигателя / А.И. Тарасенко // *Авиационная техника и технология*. – 2006. – № 7 (33). – С. 172-176.
6. Мак-Кракен Д. Численные методы и программирование на Фортране / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. – М.: Мир, 1977. – 588 с.

Поступила в редакцию 2.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения, Николаев, Украина.

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ГТД З ВІЛЬНОЮ СИЛОВОЮ ТУРБІНОЮ ПРИ ДВОХІМПУЛЬСНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

О.І. Тарасенко

Розглядається газотурбінний двигун (ГТД) з вільною силовою турбіною, яка працює на генератор в умовах електростанції. Регулювання газотурбінного двигуна здійснюється за допомогою двохімпульсного регулятора на базі керуючої ЕОМ. Такий регулятор разом з виміром швидкостей обертання контурів газотурбінного двигуна здійснює вимір активної потужності яку, генератор надає користувачам. Запропоновано спрощену математичну модель газотурбінного двигуна, яка дозволяє розробити алгоритм регулювання та змоделювати перехідні процеси газотурбінного двигуна. Окрім того можливо надати рекомендації по проектуванню двигуна та формуванню алгоритму регулювання.

Ключові слова: газотурбінний двигун, регулятор, пропорційно-інтегральний, пропорційний алгоритм, керуюча ЕОМ, двохімпульсний регулятор.

TRANSITIONAL PROCESS IN THE GTE WITH FREE POWER TURBINE BY DOUBLE-PULSE REGULATION

A.I. Tarasenko

Gas-turbine engine (GTE) with free power turbine, working on generator in the condition of electric power station is viewed. Regulation of gas-turbine engine realized by double-pulse regulator based on computer. That regulator is measuring speeds of rotation of contours of gas-turbine engine and make measuring of active power that generator produce. We offer a reductive mathematical model of gas-turbine engine, that allow to create an algorithm of regulation and simulate transition process in gas-turbine engine.

Key words: Gas-turbine engine (GTE), regulator proportional-integral, proportional algorithm, computer, double-pulse regulator.

Тарасенко Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры механики и конструирования машин Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.