

УДК 621.438:51.001.57

Т.М. НУРМУХАМЕТОВ*Управление магистральных газопроводов «Черкасытрансгаз», Украина***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РЕГУЛИРУЕМОЙ СИЛОВОЙ ТУРБИНОЙ**

Предложена математическая модель газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата с регулируемой силовой турбиной в виде аппроксимационных зависимостей относительных величин мощности и КПД от режимных параметров.

газотурбинный двигатель, газоперекачивающий агрегат, математическое моделирование, характеристика, силовая турбина, регулируемый сопловой аппарат

Введение

Применение регулируемых турбин известно как эффективное средство в создании перспективных схем двигателей с изменяемым рабочим процессом [1] для многорежимных самолетов. В газотурбинных двигателях (ГТД) наземных транспортных средств [2] и приводах газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [3] также широко применяют регулируемые сопловые аппараты силовых турбин. Использование математического моделирования таких ГТД позволяет повысить эффективность их эксплуатации, проводить оценку технического состояния и др. Однако количество публикаций по таким моделям ограничено [4, 5].

1. Формулирование проблемы

Применение математического моделирования позволяет осуществлять эксплуатацию ГТД по техническому состоянию, определять уровни загрузки оборудования, обеспечивать оптимальное управление приводами ГПА и др.

Опубликованные математические модели ГТД с регулируемой силовой турбиной [4 – 6] отличаются сложной формой и требуют большого количества информации, что при ограниченной номенклатуре параметров, измеряемых штатной системой затрудняет их идентификацию и применение в эксплуата-

ционных условиях в газотранспортной отрасли. Следовательно, достаточно актуальным является создание математических моделей газотурбинных приводов приемлемых для применения в эксплуатационных условиях.

Целью данной статьи является разработка математической модели ГТД – привода ГПА с регулируемой силовой турбиной для применения в эксплуатации.

2. Решение проблемы

В работе [7] характеристика привода ГПА в относительных координатах:

$$\tilde{N}_e = N_e / N_{e \max}; \quad \tilde{\eta}_e = \eta_e / \eta_{e \max};$$

$$\tilde{n}_{mc} = n_{mc} / n_{mc \max}$$

представляется параболическими зависимостями:

$$\tilde{N}_e = 2\tilde{n}_{mc} - \tilde{n}_{mc}^2; \quad (1)$$

$$\tilde{\eta}_e = 2\tilde{n}_{mc} - \tilde{n}_{mc}^2, \quad (2)$$

где максимальная мощность $N_{e \max}$, КПД $\eta_{e \max}$ и соответствующие им частоты вращения силовой турбины $n_{mc \max}$ определяются текущими режимами работы газогенератора (n_{mc}) и положениями регулируемого соплового аппарата (α_1) силовой турбины.

Газотурбинные установки ГПА типа ГТК-10И, ГТК-25И с регулируемым сопловым аппаратом имеют перекрестную программу регулирования, при

которой частота вращения турбокомпрессора ($\bar{n}_{mk} = 1,0 = const$) обеспечивается путем поворота соплового аппарата силовой турбины, а требуемая мощность на ее валу для задаваемого оператором режима работы по частоте вращения ($n_{mc} = const$) поддерживается регулированием подачи топливного газа, в результате чего изменяются температуры газа перед обеими турбинами. Поворот соплового аппарата приводит к перераспределению работ между турбинами, сохраняя неизменной работу турбины компрессора. Внешняя характеристика привода представляется зависимостями от частоты вращения и температуры газов за силовой турбиной $N_e = f(n_{mc}, T_m^*)$ при $n_{mk} = const$ и разных внешних условиях. Поэтому необходима замена переменной α_1 в вышеизложенной математической модели на температуру T_m^* . Такая замена целесообразна также потому, что этот параметр является контролируемым наряду с n_{mc} и n_{mk} .

Таким образом, применение специальной программы регулирования соплового аппарата в указанных ГТУ уменьшает число независимых переменных до двух, исключая частоту вращения турбокомпрессора n_{mk} , которая не изменяется, благодаря перераспределению работ между турбинами при соответствующем изменении расхода топливного газа. Переход от переменной α_1 к T_m^* очевидно должен видоизменить уравнения (1), (2), описывающие характеристики двигателей, что требует пояснений.

Семейство парабол (1), (2) получено для разных фиксированных значений углов $\alpha_1 = const$ и $n_{mk} = const$, при которых оставалась неизменной температура газов перед силовой турбиной T_m^* для определенного режима работы газогенератора. При этом располагаемый теплоперепад на силовой турбине также не менялся, а параболическая форма

характеристик двигателя по частоте вращения силовой турбины вытекает из уравнения Эйлера для этой турбины. Добавим, что полная температура за силовой турбиной T_m^* с уменьшением ее частоты вращения до нуля возрастает до температуры T_{mk}^* для оговоренных условий.

Легко доказать, что линии, соответствующие $T_m^* = const$, при отсутствии регулирования силовой турбины, на внешней характеристике двигателя, сводятся к выражениям:

$$\tilde{N}_e = 1 - 2(1 - \tilde{n}_{mc})^2; \quad (3)$$

$$\tilde{\eta}_e = 1 - 2(1 - \tilde{n}_{mc})^2 \quad (4)$$

с соответствующим изменением режима работы газогенератора, т.е. n_{mk} . Здесь понижение мощности N_e и КПД η_e с уменьшением частоты вращения n_{mc} , начиная с номинальной, происходит как за счет понижения КПД силовой турбины, так и за счет уменьшения теплоперепада на ней и расхода газа в соответствии с изменением режима работы газогенератора (уменьшением n_{mk}) по линии рабочих режимов турбокомпрессора при ухудшении его экономичности и уменьшении расхода топливного газа. В случае ж ГТД с регулируемой силовой турбиной условие $T_m^* = const$ при уменьшении n_{mc} , в координатах которых представлены внешние характеристики двигателей ГТК-10И и ГТК-25И, достигается при неизменном режиме работы газогенератора, а также при условии постоянства расхода воздуха и степени повышения полного давления в компрессоре, но с понижением температур T_c^* и T_{mk}^* из-за уменьшения подачи топливного газа. Очевидно, что в данном случае внешние характеристики ГТД представляют собой менее крутые параболы, чем вышеуказанные, из-за неизменности экономичности газогенератора и сравнительного снижения потерь в регулируемой силовой турбине при повороте лопаток ее соплового аппарата. Так, внешняя характери-

стика ГТК-10И при стандартных атмосферных условиях ($t_n = +15^\circ\text{C}$ и $P_n = 101,32$ кПа) описывается системой уравнений:

$$\bar{N}_e = \bar{N}_{\max} - 1,15(\bar{n}_{mc} N_{\max} - \bar{n}_{mc})^2; \quad (5)$$

$$\bar{N}_{\max} = \bar{T}_m^*(8,045 - 6,045\bar{T}_m^*); \quad (6)$$

$$\bar{n}_{mc} N_{\max} = 1,08\bar{T}_m^{*0,8}, \quad (7)$$

где $\bar{N}_e = N_e / N_{e\text{ном}}$;

$$\bar{N}_{\max} = N_{\max} / N_{e\text{ном}};$$

$$\bar{n}_{mc} = n_{mc} / n_{mc\text{ном}};$$

$$\bar{n}_{mc} N_{\max} = n_{mc} N_{\max} / n_{mc\text{ном}};$$

$$\bar{T}_m^* = T_m^* / T_{m\text{ном}}^*;$$

max – максимальный режим;

ном – номинальный режим.

Коэффициент $1,08 = n_{mc} N_{\max\text{ном}} / n_{mc\text{ном}}$ в уравнении (7) указывает на смещение выбранного номинального значения частоты вращения силовой турбины относительно положения максимума мощности $N_{e\text{max}}$ при $T_{m\text{ном}}^*$.

Сравнение полученной аппроксимационной модели двигателя с его паспортной характеристикой свидетельствует об удовлетворительном их согласовании с точностью до 1%.

Обращает на себя внимание коэффициент – 1,15, характеризующий крутизну парабол, который существенно меньше его значения – 2,0 в предыдущих зависимостях, соответствующих линиям $T_m^* = \text{const}$ на внешних характеристиках ГТД без регулирования соплового аппарата, что говорит о значительном эффекте регулирования на улучшение характеристик двигателя и его экономичность на нерасчетных режимах работы.

Заключение

Полученная математическая модель привода ГПА с регулируемой силовой турбиной позволяет

контролировать его характеристики в эксплуатационных условиях и осуществлять оценку его технического состояния.

Литература

1. Нечаев Ю.Н., Кобельков В.Н., Полев А.С. Авиационные турбореактивные двигатели с изменяемым рабочим процессом для многорежимных самолетов. – М.: Машиностроение, 1988. – 176 с.
2. Попов Н.С., Изотов С.П., Антонов В.В. Транспортные машины с газотурбинными двигателями / Под общ. ред. Н.С. Попова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1987. – 259 с.
3. Ревзин Б.С. Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. – М.: Недра, 1986. – 216 с.
4. Кобельков В.Н., Литвяк А.Н. Методика расчета характеристик регулируемой газовой турбины в широком диапазоне режимов работы // Научн.-метод. материалы по процессам и характеристикам авиационных двигателей / Под ред. Ю.Н. Нечаева. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1985. – С. 50-61.
5. Ревзин Б.С., Федорченко М.Ю., Новиков С.В. Об эффективности регулируемого соплового аппарата силовой турбины в приводных двухвальных ГТУ простого цикла // Энергетика. – № 8. – С. 95-98.
6. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 609 с.
7. Герасименко В.П., Нурмухаметов Т.М. Математическая модель газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата с регулируемой силовой турбиной // Питання розвитку газової промисловості України: Зб. наук. праць. – Х.: Укрндігаз, 2002. – Вип. 30. – С. 196-201.

Поступила в редакцию 29.05.2007

Рецензент: канд. физ.-мат. наук М.В. Бойко, Украинский научно-исследовательский институт природных газов, Харьков.