

УДК 621.438 : 622.691.4.052

В.П. ГЕРАСИМЕНКО^{*}, д-р техн. наук, Н.В. КУЧЕРУК^{**}, А.С. МАНДРА^{**},
Н.Б. НАЛЕСНЫЙ^{**}, канд. техн. наук, Т.М. НУРМУХАМЕТОВ^{**}, канд. техн. наук

** Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»,
г. Харьков, Украина*

*** Управление магистральных газопроводов «Черкасытрансгаз», г. Черкасы, Украина*

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Розглянуто основні проблеми застосування експлуатації газоперекачувальних агрегатів за технічним станом. Запропоновані алгоритми визначення витрати повітря через газотурбінний двигун, його потужності та коефіцієнта корисної дії за відсутності їхніх прямих вимірювань в експлуатаційних умовах. Ці алгоритми побудовані на використанні рівнянь матеріальних балансів та посередніх вимірювань параметрів течії в проточній частині двигуна. Вони також дозволяють здійснювати діагностування вузлів двигуна.

Fundamental problems of gas pumping aggregates exploitation by technical condition have been considered. Algorithms definition gas turbine engine's power, efficiency and mass air flow without their measurements in exploiting condition are proposed. These algorithms are built on equations material balance and indirect measurements of parameters flow of running part engine. They also allow realize engine units diagnostic.

Эксплуатация газотурбинной техники по техническому состоянию (ТС) является одним из прогрессивных направлений в ее развитии. Особое внимание такой эксплуатации уделяется в авиации ввиду необходимости высокой надежности работы двигателей для обеспечения безопасности полетов. Газотурбинные двигатели (ГТД) в наземных энергоустановках и в качестве приводов газоперекачивающих агрегатов (ГПА) хотя и в меньшей мере, чем в авиации, являются источником возможных аварийных ситуаций. Наземные условия, имея определенную отличительную специфику, накладывают дополнительные требования к реализации эксплуатации по ТС. Эта специфика заключается в следующем: более высокая запыленность воздуха у Земли, что приводит к эрозионному износу лопаточных венцов и отложениям пыли в проточной части двигателя; длительная непрерывная работа ГТД; часто нерасчетные режимы работы; недостаточная оснащенность средствами контроля и автоматического управления; сравнительно ниже квалификация эксплуатационного персонала и др.

В этой связи для реализации эксплуатации по ТС и обеспечения надежности ГПА согласно инструкциям и регламентам осуществляется непрерывный контроль за режимами работы ГПА и всех его систем: топливного, технологического и импульсного газа; систем смазки и уплотнения нагнетателя; пневмогазопроводов; систем охлаждения и вентиляции; контрольно-измерительных приборов и виброконтроля; автоматизации, управления, сигнализации неисправностей, защиты и противопожарной. Кроме того, контролируются механические соединения, центровка муфт и герметичность трубопроводов. Проверяются состав топливного, технологического газа и пробы масла. Периодически промывается проточная часть ГТД. Перечисленные проверки проводятся на соответствие нормальному состоянию и допустимым границам.

Для эксплуатации ГПА по ТС внедряются новые автоматизированные системы диагностирования (АСД) как составляющие автоматизированных систем контроля за техническим состоянием (АСК ТС) и автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). Основное назначение АСД – по результатам наблюдения и контроля параметров ГПА выполнять их анализ и интерпретацию о техническом состоянии, для чего дополнительно требуются математические модели процессов, протекающих в ГПА. Однако количество и перечень контролируемых параметров часто ограничен. Даже основные параметры ГПА не измеряются. Отсутствуют также измерения, которые предупреждали бы о всех возможных аварийных ситуациях. Анализ аварийных ситуаций на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов показывает, что основными их причинами являются: разрушения элементов ГПА, отказы и неисправности вспомогательных систем, ошибки обслуживающего персонала и диспетчерских служб и др. Если в первые 50 лет Мирового Газового Конгресса (WGC) аварии по субъективным причинам составляли почти $\frac{3}{4}$ случаев, то за последние 25 лет эта составляющая случаев значительно сократилась. Повреждения агрегатов, связанных с вынужденными остановками происходят по причинам дефектов, включая ошибки проектирования, дефектов изготовления, сборки, монтажа, материалов.

Внедрение современных систем автоматизированного управления (САУ) ГПА или их модернизация [1] позволяют существенно сократить количество аварийных ситуаций уменьшением или исключением влияния двух последних из названных причин. Однако уровень САУ ГПА зависит от систем контроля, методов и средств диагностирования ТС [2, 3], наличия и совершенства математических моделей узлов [4–6], методологической и материальной базы для их создания. Наряду с перечисленными факторами эксплуатационная надежность ГПА в значительной мере определяется также индивидуальными их характеристиками, сроком и условиями эксплуатации, качеством обслуживания и ремонтов и др.

Тенденции повышения экономичности ГТД – приводов ГПА за счет увеличения термодинамических параметров и газодинамического совершенства требуют параллельно значительного изменения в конструкции, применяемых материалах и технологии изготовления для сохранения или увеличения устанавливаемых ресурсов. Одновременно должна повышаться культура обслуживания, разрабатываться новые методики диагностирования ТС, системы контроля, мониторинга и управления.

Одной из проблем в модернизации систем эксплуатируемых ГПА является их чрезвычайно большое разнообразие [1], что приводит к значительным затратам на индивидуальную разработку таких систем. Вместе с тем можно выделить основные параметры ГПА, которые необходимо определять прямым или косвенным путем для теплотехнического и вибрационного диагностирования.

Снижение мощности и эффективного КПД ГТД в процессе эксплуатации служит интегральным критерием ухудшения его ТС. Одним из основных признаков ухудшения ТС проточной части двигателя является увеличение гидравлических потерь – снижение КПД узла, т.е. удаления показателя процесса от изоэнтропы. Однако оценивание ТС проточных частей турбомашин ГПА по изменениям показателей политроп процессов, предлагаемое в ряде работ [7], имеет два недостатка:

- зависимость этих показателей не только от ТС, но и от режима работы ГПА, который не всегда можно задавать в эксплуатационных испытаниях;
- необходимость большой точности при определении показателя политропы процесса, ввиду того, что этот показатель существенно влияет на степень политропы.

Для преодоления этих недостатков при оценивании ТС ГПА в разрабатываемых критериях необходимо исключить влияние режимных параметров, для чего требуется отслеживать изменение не отдельных параметров двигателя и его узлов, а их характеристик. Одним из направлений развития теплотехнического диагностирования ТС ГТД является создание математических моделей.

Целью данной статьи является разработка алгоритмов для определения действительных основных параметров ГТД в эксплуатационных условиях ГПА на основе математического моделирования и уравнений материальных балансов с использованием косвенных измерений.

Ограниченное количество измеряемых параметров ГПА в эксплуатационных условиях затрудняет параметрическое диагностирование ГТД. Как правило отсутствует прямое измерение мощности, расхода воздуха, температуры газа перед турбиной и др. В то же время расход воздуха легко определить по измерениям статического давления p_i , температуры T_i^* и давления p_i^* заторможенного потока на входе в компрессор или в любом его сечении проточной части

$$G = A \frac{p_i^*}{\sqrt{T_i^*}} \left(\frac{p_i}{p_i^*} \right)^{2/3} \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_i^*} \right)^{1/3} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где коэффициент A вычисляют в заводских или специальных испытаниях.

Расход воздуха можно также определить по формуле, вытекающей из энергетического баланса, посредством контролируемых параметров: расходу топлива G_T и температур на входе в двигатель T_B^* и перед силовой турбиной T_{TK}^*

$$G_B = G_T \left(\frac{H_u \eta_\Gamma \eta_{mTK} \eta_{охл} \eta_{отб}}{C_{pT} T_{TK}^* - C_p T_B^*} - 1 \right), \quad (2)$$

где H_u , η_Γ – теплота сгорания топлива и коэффициент полноты его сгорания; η_{mTK} , $\eta_{охл}$, $\eta_{отб}$ – коэффициенты, учитывающие механические потери на роторе турбокомпрессора и отборы воздуха на охлаждение горячих частей двигателя и внешние нужды; C_p , C_{pT} – теплоемкости воздуха и газа.

Большой информативностью для диагностирования ТС состояния ГТД до узла обладают уравнения совместной работы турбокомпрессоров. Эти уравнения представляют собой решение системы уравнений как математической модели ГТД, состоящей из 15-ти уравнений в случае ГТД с одновальным газогенератором и свободной силовой турбиной, или 23-х уравнений при двухвальном газогенераторе [4]. В случае ГТД с одновальным газогенератором и свободной силовой турбиной уравнение совместной работы имеет вид [6]:

$$\frac{\pi_k^* \sqrt{\eta_k^*}}{\sqrt{(\pi_k^*)^{\frac{k-1}{k}} - 1}} = \frac{m_B F_B q(\lambda_B)}{m_T F_{ca} \sigma_{kc} \sigma_{ca} q(\lambda_{ca})} \sqrt{\frac{C_p (1 + q_T) (1 - \Delta \bar{G}_{отб})}{C_{pT} \left(1 - (\pi_{TK}^*)^{\frac{1-k_T}{k_T}} \right) \eta_{TK}^* \eta_{mTK}}}, \quad (3)$$

где π_k^* , $\pi_{тк}^*$ – степени повышения полного давления в компрессоре и понижения его в турбине компрессора; η_k^* , $\eta_{тк}^*$, $\eta_{мтк}$ – КПД компрессора, его турбины и их механического соединения; m_b , m_r , k , k_r – постоянные воздуха, газа и их показатели изобары; F_b , F_{ca} – площади входа в компрессор и горла в сопловом аппарате первой ступени турбины; $q(\lambda_b)$, $q(\lambda_{ca})$ – газодинамические функции расхода воздуха через компрессор и газа через турбину; σ_{kc} , σ_{ca} – коэффициенты потерь полного давления в камере сгорания и сопловом аппарате турбины; $q_T = G_T/G_B(1 - \Delta\bar{G}_{отб})$ – относительный расход топлива; $\Delta\bar{G}_{отб}$ – относительный расход отбираемого воздуха из двигателя за компрессором. При двухвальном газогенераторе подобные уравнения записываются для каждого турбокомпрессора.

Это выражение в сочетании с характеристиками компрессора и его турбины при их одинаковых частотах вращения представляют собой математическую модель газогенератора. Контролируемые параметры потока в проточной части турбины и компрессора на каком-либо режиме работы ГТД, задаваемого частотой вращения турбокомпрессора $n_{тк}$, в сочетании с выражением (3) и характеристиками компрессора и турбины позволяют балансировать переменные при диагностировании турбокомпрессора. А именно, на заданной частоте вращения $n_{тк}$ увязываются параметры: π_k^* , η_k^* , $q(\lambda_b)$, $\pi_{тк}^*$, $\eta_{тк}^*$, $q(\lambda_{ca})$. При этом относительный расход топлива легко определяется по уравнению (2) или по формуле $q_T = 1/\alpha L_0$, где α – коэффициент избытка воздуха, измеряемый в эксплуатационных испытаниях на выходе из двигателя; L_0 – стехиометрический коэффициент.

Наличие измеряемых температур T_b^* , T_k^* , $T_{тк}^*$ и q_T позволяет вычислить температуру газа перед турбиной

$$T_r^* = T_{тк}^* + \frac{C_p(T_k^* - T_b^*)}{C_{pг}(1 + q_T)(1 - \Delta\bar{G}_{отб})\eta_{мтк}} \quad (4)$$

и оценить степень понижения давления в турбине компрессора

$$\pi_{тк}^* = \frac{1}{\left[1 - (1 - T_{тк}^*/T_r^*)/\eta_{тк}^*\right]^{\frac{k_r}{k_r - 1}}} \quad (5)$$

Работа силовой турбины при этом может быть рассчитана по формуле

$$L_{тс} = C_{pг} T_{тк}^* \left[1 - \left(\frac{\pi_{тк}^*}{\sigma_{вх} \sigma_{kc} \pi_k^*} \right)^{\frac{k_r - 1}{k_r}} \right] \eta_{тс} \quad (6)$$

где $\sigma_{\text{вх}} = p_{\text{в}}^*/p_{\text{н}}$ – коэффициент потерь полного давления во входных системах ГТД ГПА; $p_{\text{н}}$ – атмосферное давление; $p_{\text{в}}^*$ – полное давление на входе в компрессор ГТД; $\eta_{\text{тс}}$ – КПД силовой турбины с учетом потерь в выхлопной системе двигателя.

При использовании КПД собственно силовой турбины по заторможенным параметрам $\eta_{\text{тс}}^*$ располагаемая степень понижения давления в силовой турбине $\pi_{\text{тср}} = p_{\text{тк}}^*/p_{\text{н}} = \sigma_{\text{вх}} \sigma_{\text{кк}} \pi_{\text{к}}^*/\pi_{\text{тк}}^*$ в этой формуле должна быть заменена на степень понижения полного давления в силовой турбине $\pi_{\text{тс}}^* = p_{\text{тк}}^*/p_{\text{т}}^*$, которая может быть определена в эксплуатационных испытаниях по непосредственным измерениям давлений $p_{\text{тк}}^*$, $p_{\text{т}}^*$ на ее входе и выходе. При измерении скорости потока на выходе выхлопной системы $C_{\text{вых}}$ и полной температуры $T_{\text{вых}}^*$ давление за силовой турбиной можно также рассчитать по формуле

$$p_{\text{т}}^* = p_{\text{н}}/\sigma_{\text{вых}} \cdot p(\lambda_{\text{вых}}), \quad (7)$$

где $\sigma_{\text{вых}}$ – коэффициент потерь полного давления в выхлопной системе; $p(\lambda_{\text{вых}}) = p_{\text{н}}/p_{\text{вых}}^*$ – газодинамическая функция давления на выходе ГТУ; $\lambda_{\text{вых}} = C_{\text{вых}}/\sqrt{\frac{2\kappa_{\text{г}}}{\kappa_{\text{г}}+1} R_{\text{г}} T_{\text{вых}}^*}$ – безразмерная скорость на выходе; $R_{\text{г}}$ – газовая постоянная.

Работа силовой турбины в этом случае вместо (6) может быть определена по формуле

$$L_{\text{тс}} = C_{\text{пг}} T_{\text{тк}}^* \left[1 - \left(\frac{\pi_{\text{тк}}^*}{\sigma_{\text{вх}} \pi_{\text{к}}^* \sigma_{\text{кк}} \sigma_{\text{вых}} p(\lambda_{\text{вых}})} \right)^{\frac{\kappa_{\text{г}}-1}{\kappa_{\text{г}}}} \right] \eta_{\text{тс}}^* \quad (8)$$

или по разности измерения температур на этой турбине

$$L_{\text{тс}} = C_{\text{пг}} (T_{\text{тк}}^* - T_{\text{т}}^*), \quad (9)$$

где $T_{\text{т}}^* = T_{\text{вых}}^*$ при отсутствии эжектируемого воздуха на выхлопе. При наличии эжектирования необходимо уточнить связь $T_{\text{т}}^* = f(T_{\text{вых}}^*)$ на основе энергетического баланса смешения потоков выхлопного газа и эжектируемого воздуха.

По работе силовой турбины $L_{\text{тс}}$, расходу газа $G_{\text{г}} = G_{\text{в}}(1+q_{\text{т}})(1-\Delta\bar{G}_{\text{отб}})$ и механическому КПД $\eta_{\text{м}}$ определяется мощность на валу двигателя

$$N_{\text{е}} = G_{\text{г}} L_{\text{тс}} \eta_{\text{м}} \quad (10)$$

и его эффективный КПД

$$\eta_e = \frac{N_e}{G_T H_u}, \quad (11)$$

где кроме теплоты сгорания топлива H_u иногда учитывают также его энтальпию.

Изложенный алгоритм позволяет по измерениям косвенных параметров в эксплуатационных испытаниях ГПА определять мощность ГТД и его КПД, а также оценивать по существующим методикам общее техническое состояние двигателя. Этот алгоритм в сочетании с диагностическими признаками дефектов элементов ГТД [8] может быть использован для их выявления.

Литература

1. *Налісний М.Б.* Аналіз стану газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях УМГ «Черкаситрансгаз» // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – № 3. – С. 47-49.
2. Стационарна система моніторингу і діагностики газоперекачувальних агрегатів / В.Є. Петренко, О.О. Чердинцев, С.В. Лозня, М.І. Торхов, А.С. Мандра, М.Б. Налісний, Г.І. Чорний // Інформаційний огляд ДК «Укртрансгаз». – 2005. – № 2(32). – С. 16-17.
3. *Максименко С.В.* Методы и средства технической диагностики оборудования компрессорной станции / С.В. Максименко, Г.Н. Поляков, А.Н. Труфанов // Обзорная информация. Сер.: Транспорт и подземное хранение газа. – М.: ВНИИЭгазпром, 1990. – 66 с.
4. К математическому моделированию газотурбинных приводов газоперекачивающих агрегатов / В.П. Герасименко, А.И. Дутчак, А.С. Мандра, Н.Б. Налесный, Т.М. Нурмухаметов // Питання розвитку газової промисловості України: Зб. наук. пр. «УкрНДІгаз». – Харків. – 2006. – Вип. XXXIV. – С. 232-237.
5. Математическая модель газотурбинного привода авиационного типа блочно-комплектного турбокомпрессорного агрегата / С.В. Епифанов, В.П. Парафейник, А.М. Попуга, И.И. Лобода // Проблемы машиностроения. – Харьков: ИПМаш НАНУ. – 2000. – Т. 3, № 3–4. – С. 29-35.
6. Адаптивное математическое моделирование газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата / В.П. Герасименко, А.С. Мандра, Н.Б. Налесный, Т.М. Нурмухаметов // Авиаци.-косм. техника и технология. – Харьков: ХАИ. – 2005. – № 2(18). – С. 49-53.
7. *Микаэлян Э.А.* Диагностика энерготехнологического оборудования ГПА на базе различных диагностических признаков // Газовая промышленность. – 2000. – № 2. – С. 59-63.
8. *Сараванамутто.* Термодинамические модели для диагностики газовых турбин, установленных на газопроводах / Сараванамутто, Макисаак // Тр. америк. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1983. – Т. 105, № 4. – С. 128-139.

© Герасименко В.П., Кучерук Н.В., Мандра А.С., Налесный Н.Б., Нурмухаметов Т.М., 2009