



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

Институт двигателей и энергетических установок
Кафедра теории двигателей летательных аппаратов

Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок (АД и ЭУ)

Глава 13. Неустановившиеся режимы работы ГТД

§ 13.1. Особенности совместной работы узлов на неустановившихся режимах

§ 13.2. Обобщенные динамические характеристики одновального ТРД

§ 13.3. Обобщенная кривая разгона и время приемистости

§ 13.4. Пути улучшения приемистости

§ 13.5. Зависимость времени приемистости от высоты и скорости полета

Режимы называются **установившимися**, если параметры двигателя в процессе работы на них с течением времени практически не изменяются. **На неуставившихся режимах** параметры двигателя изменяются достаточно быстро. Они необходимы и широко применяются в эксплуатации прежде всего для запуска двигателя, а также для перехода с режима на режим.

Неустановившийся режим называется **разгоном**, если в процессе его реализации тяга увеличивается, если тяга уменьшается, то его называют **сбросом** (газа).

Способность двигателя быстро переходить на повышенный режим называют **приемистостью**, а время перехода с малого газа на максимальный – **временем приемистости**.

§ 12.1. Особенности совместной работы узлов на неустановившихся режимах

В процессе неустановившихся режимов не обеспечивается уравнение баланса мощности, может нарушиться уравнение неразрывности потока, так как расход рабочего тела через различные сечения двигателя может изменяться неодинаково вследствие неодинакового изменения параметров рабочего тела в этих сечениях.

Чтобы упростить анализ изменения параметров двигателя на неустановившихся режимах принимают допущение о квазистационарности. Квазистационарным называют неустановившийся процесс, состоящий из бесконечно большого множества мгновенных установившихся процессов.

Для квазистационарных процессов сохраняются справедливыми уравнения совместной работы узлов, за исключением уравнения баланса мощности. для одновального газогенератора (одновального ТРД) оно преобразится в **уравнение движения ротора**

$$N_T \cdot \eta_m - N_K = \Delta N = \frac{dE}{dt},$$

где ΔN – избыточная мощность турбины;

$E = I \frac{\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия вращающихся масс ротора;

I – полярный момент инерции ротора относительно оси вращения;

$\omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения.

Величина избыточной мощности ΔN определяет величину ускорения вращающихся масс ротора dn/dt :

$$\Delta N = 4\pi^2 \cdot I \cdot n \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Если величина ΔN положительна, то происходит раскрутка ротора, если она отрицательна – замедление.

Выполнив преобразования, аналогичные тем, которые были сделаны при выводе уравнения баланса мощности компрессора и турбины ВД, получим:

$$\frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{H}}^*} \cdot l_{\text{T}} \cdot B - l_{\text{K}} = \frac{4 \pi^2 \cdot I \cdot n}{c_{p\text{в}} \cdot T_{\text{H}}^* \cdot G_{\text{В}}} \frac{dn}{dt}.$$

Чтобы представить уравнение движения ротора в обобщенном виде, введем понятия приведенного времени $t_{\text{пр}}$ и приведенного ускорения вращения ротора $\left(\frac{dn}{dt}\right)_{\text{пр}}$:

$$t_{\text{пр}} = t \cdot \frac{p_{\text{H}}^*}{101325} \cdot \sqrt{\frac{288}{T_{\text{H}}^*}}; \quad \left(\frac{dn}{dt}\right)_{\text{пр}} = \left(\frac{dn}{dt}\right) \cdot \frac{101325}{p_{\text{H}}^*}.$$

Следовательно:

$$\Delta N_{\text{пр}} = 4 \pi^2 \cdot I \cdot n_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{dn}{dt}\right)_{\text{пр}};$$

$$\frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{H}}^*} \cdot l_{\text{T}} \cdot B - l_{\text{K}} = \frac{4 \pi^2 \cdot I \cdot n_{\text{пр}}}{c_{p\text{в}} \cdot 288 \cdot G_{\text{В.пр}}} \left(\frac{dn}{dt}\right)_{\text{пр}}.$$

Уравнение движения ротора решим совместно с уравнением совместной работы компрессора, КС и турбины, которое для одновального ТРД имеет вид

$$q(\lambda_B) = \frac{\pi_K^*}{\sqrt{T_{\Gamma}^*/T_H^*}} \cdot A.$$

После преобразования получим:

Уравнение совместной работы узлов газогенератора на неустановившихся режимах:

$$q(\lambda_B) = \frac{\pi_K^*}{\sqrt{l_K + \frac{4 \pi^2 \cdot I \cdot n_{\text{пр}}}{c_{pв} \cdot 288 \cdot G_{\text{В. пр}}} \left(\frac{dn}{dt} \right)_{\text{пр}}}} \cdot A \cdot \sqrt{l_T \cdot B}.$$

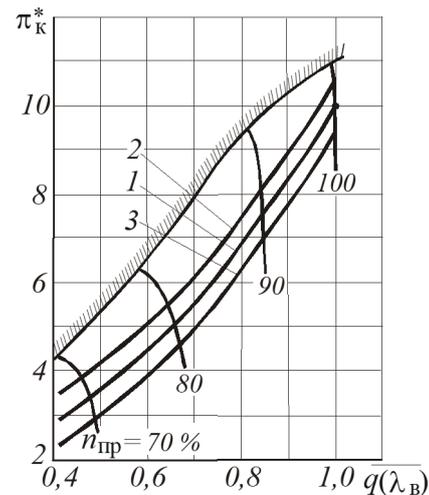
При $(dn/dt)_{\text{пр}} = 0$ данное уравнение не отличается от уравнения совместной работы узлов газогенератора на установившихся режимах [8] и выражается линией совместной работы, соответствующей установившимся режимам работы.

При раскрутке ротора ($(dn/dt)_{пр} > 0$) линия совместной работы на характеристике компрессора смещается вверх, а при замедлении ротора ($(dn/dt)_{пр} < 0$) – вниз.

Смещение линии совместной работы вверх при увеличении $(dn/dt)_{пр}$ объясняется тем, что прирост избыточной мощности обеспечивается за счет подачи дополнительного топлива. Это ведет к увеличению $T_{Г}^*$, снижению пропускной способности камеры сгорания $q(\lambda_K)$ и уменьшению запасов устойчивой работы компрессора ΔK_y .

Смещение линии совместной работы вниз при замедлении ротора объясняется увеличением пропускной способности камеры сгорания вследствие снижения $T_{Г}^*$.

Линии совместной работы на характеристике компрессора для установившихся и неуставившихся режимов:
 1 – $(dn/dt)_{пр} = 0$); 2 – $(dn/dt)_{пр} > 0$; 3 – $(dn/dt)_{пр} < 0$.



§ 12.2. Обобщенные динамические характеристики одновального ТРД

Линией совместной работы при $\lambda_{C.KP}=1$ однозначно определяются все приведенные параметры газогенератора – его обобщенные характеристики.

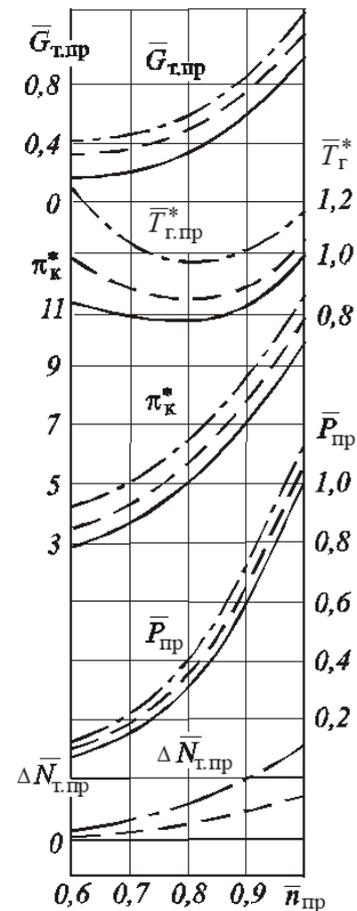
По значениям π_k^* , $q(\lambda_B)$ в каждой рабочей точке на линии совместной работы вычисляются все приведенные параметры газогенератора, а именно: температура $T_{i.пр}^*$ и давление $p_{i.пр}^*$ рабочего тела в различных сечениях двигателя, работа компрессора $L_{к.пр}$ и турбины $L_{т.пр}$, расходы воздуха $G_{В.пр}$ и топлива $G_{т.пр}$, степень повышения давления в турбокомпрессоре π_{TK}^* . При принятом значении M_{II} определяются параметры сопла $\pi_{ср}$, $c_{с.пр}$, а также удельные параметры и основные данные двигателя $P_{уд.пр}$, $C_{уд.пр}$ и $P_{пр}$.

Для неустановившихся режимов определяются потребная мощность компрессора $N_{к.пр}$, располагаемая мощность турбины $N_{т.пр}$ и их разность – избыточная мощность турбины $\Delta N_{пр}$, необходимая для последующего расчета времени перехода с одного режима на другой.

Зависимости всех приведенных параметров двигателя от частоты вращения ротора $n_{\text{пр}}$ (или от любого другого приведенного параметра, например от температуры $T_{\Gamma.\text{пр}}^*$), построенные для различных значений приведенного ускорения $(dn/dt)_{\text{пр}}$ и постоянного числа $M_{\text{п}}$, называются **обобщенными динамическими характеристиками двигателя**.

Обобщенные динамические характеристики одновального ТРД при $M_{\text{п}} = \text{const}$:

(Сплошная линия соответствует установившимся режимам $(dn/dt)_{\text{пр}} = 0$,
 пунктирная — $(dn/dt)_{\text{пр}} = \text{const} > 0$,
 штрихпунктирная — $(dn/dt)_{\text{пр}} = \text{const} < (dn/dt)'_{\text{пр}}$)



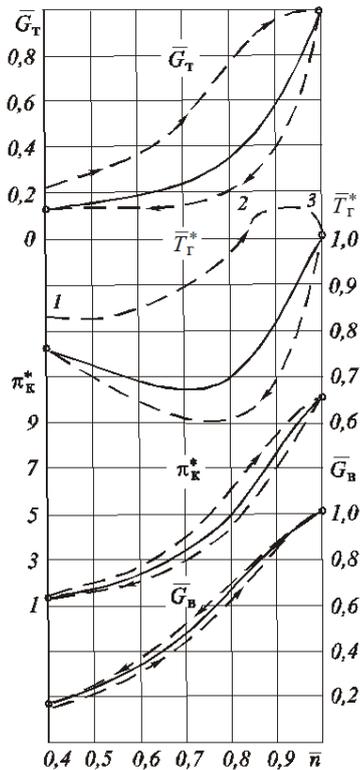
Обобщенные характеристики двигателя на установившихся режимах являются только частным случаем динамических характеристик при $(dn/dt)_{пр} = 0$. С помощью собственно динамических характеристик легко проанализировать изменение параметров двигателя и его тяги в процессе перехода с одного режима работы на другой при различных законах подачи топлива. Такой анализ и соответственно выбор оптимального закона управления двигателем на неустановившихся режимах работы – главное назначение обобщенных динамических характеристик двигателя.

§ 12.3. Обобщенная кривая разгона и время приемистости

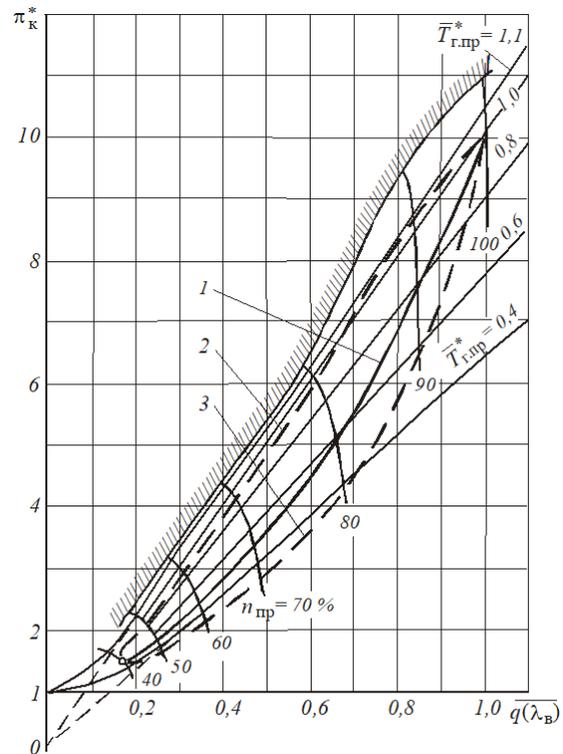
Если задаться изменением расхода топлива по частоте вращения ротора $G_{m.пр} = f(n_{пр})$, то по обобщенным динамическим характеристикам можно получить изменение всех приведенных параметров двигателя в процессе неустановившегося режима.

Повышенным расходам топлива $G_{m.пр}$ по сравнению с их значениями на установившихся режимах соответствуют и повышенные значения температуры газа перед турбиной $T_{Г.пр}^*$, степени повышения давления π_k^* , избыточные мощности турбины $\Delta N_{пр}$, положительные ускорения ротора $(dn/dt)_{пр}$. В этом случае осуществляется процесс разгона двигателя. При сбросе газа, наоборот, величины $G_{m.пр}$, $T_{Г.пр}^*$, π_k^* ниже их значений на установившихся режимах.

Изменением указанных параметров определяется положение линии совместной работы на характеристике компрессора. И наоборот, задаваясь положением линии совместной работы, можно определить соответствующее этой линии изменение всех приведенных параметров в процессе неустановившегося режима (разгона или сброса).

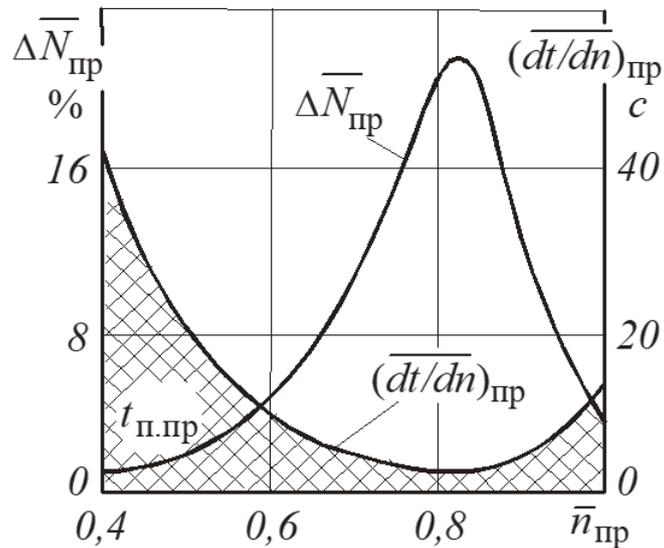


Относительное изменение параметров
одновального ТРД
на установившихся (сплошная линия)
и переходных (- - -) режимах



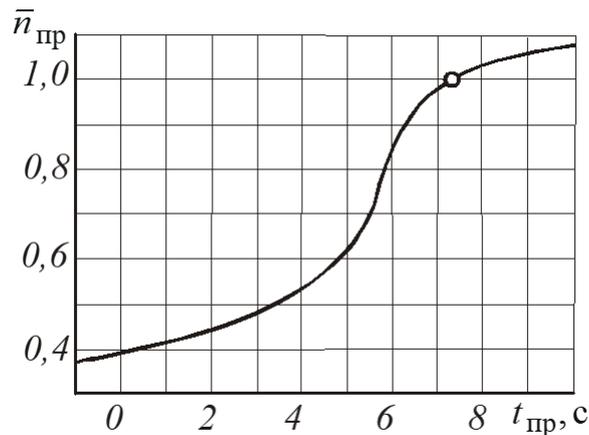
Линии совместной работы на установившихся (1)
и переходных (2 – разгон, 3 – сброс) режимах

Величинами ускорения $(dn/dt)_{\text{пр}}$ определяется приведенное время реализации неустановившегося режима. Приведенное время разгона (приемистости) $t_{\text{п.пр}}$, например, можно найти как площадь под кривой $(dt/dn)_{\text{пр}} = f(n_{\text{пр}})$, обратной ускорению.



Таким образом, задаваясь функцией $G_{m.\text{пр}} = f(n_{\text{пр}})$ или положением линии совместной работы, характеризующей процесс разгона, можно определить зависимость всех приведенных параметров, включая время разгона, от частоты вращения ротора $n_{\text{пр}}$.

Зависимость приведенной частоты вращения от приведенного времени разгона называют обобщенной кривой разгона. Обобщенная кривая разгона наглядно демонстрирует динамику процесса и весьма информативна, поскольку ею однозначно определяются зависимости всех других приведенных параметров двигателя, включая тягу, от приведенного времени.



Обобщенная кривая разгона ТРД

Получим обобщенную формулу для приведенной времени приемистости $t_{п.пр}$ для этого уравнение движения ротора в приведенных параметрах представим в следующем виде:

$$dt_{пр} = \frac{4\pi^2 \cdot I \cdot n_{пр}}{\Delta N_{пр}} \cdot dn_{пр}.$$

Интегрируя данное уравнение в диапазоне частот вращения ротора от малого газа до максимального режима, получим приведенное время приемистости $t_{п.пр}$:

$$t_{п.пр} = 4\pi^2 \cdot I \cdot \int_{n_{мг.пр}}^{n_{макс.пр}} \frac{n_{пр}}{\Delta N_{пр}} \cdot dn_{пр}$$

Из формулы следует, что время приемистости $t_{п.пр}$ пропорционально моменту инерции ротора I , зависит от диапазона интегрирования (от $n_{мг.пр}$ и $n_{макс.пр}$) и от избыточной мощности $\Delta N_{пр}$.

Мощность турбины равна произведению работы турбины $L_{т.пр}$ и расхода газа $G_{Г.пр}$, а работа турбины определяется величинами $T_{Г.пр}^*$ и π_T^* .

На величины $T_{Г.пр}^*$, π_T^* и $G_{Г.пр}$ в процессе разгона, а следовательно и на время приемистости $t_{п.пр}$, можно влиять путем регулирования соответственно расхода топлива, площади минимального сечения сопла и компрессора.

Действительное время приемистости

$$t_{п} = t_{п.пр} \cdot \frac{101325}{p_H^*} \cdot \sqrt{\frac{T_H^*}{288}}.$$

зависит еще и от p_H^* , T_H^* , а следовательно от атмосферных условий (p_H , T_H), высоты $H_{п}$ и скорости полета $M_{п}$. Если обеспечивается подобие режимов разгона при различных внешних условиях, то время переходного процесса зависит от p_H^* и T_H^* противоположно тому, как от них зависит расход воздуха G_B .

§ 12.4. Пути улучшения приемистости

Самостоятельно

В.В. Кулагин и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД. - М.: Машиностроение, 2005. - 464 с.

Подраздел 26.2.2.

§ 12.5. Зависимость времени приемистости от высоты и скорости полета

Самостоятельно

В.В. Кулагин и др. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. Кн. 3. Основные проблемы: Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД. - М.: Машиностроение, 2005. - 464 с.

Подраздел 26.2.3.