



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 аппа

Глава 8. Анализ основных характеристик ТРДД

§ 8.2. Анализ дроссельных характеристик

Последовательность анализа характеристик

- Задание
- Определение
- Схема двигателя
- Допущения
- Анализ
- Графики
- Выводы

Задание

Проанализируйте дроссельные характеристики двухвального ТРДД.

Определение

Дроссельными характеристиками ТРДД называют зависимости тяги, удельного расхода топлива, расхода воздуха, температуры и давления рабочего тела в различных сечениях и других параметров двигателя от режима его работы при неизменных внешних условиях.

Допущения

Поле параметров на выходе из вентилятора равномерно, то есть степени повышения давлений во внутреннем и наружном контурах вентилятора, а также их КПД и относительные работы, одинаковы:

$$\pi_{\text{кнд}}^* = \pi_{\text{кп}}^* ;$$

$$\eta_{\text{кнд}}^* = \eta_{\text{кп}}^* ;$$

$$l_{\text{кнд}} = l_{\text{кп}} .$$

Площади характерных сечений не изменяются:

$$F_i = \text{const} .$$

Отборы мощности отсутствуют:

$$N_{\text{отб. в.д}} = 0 ;$$

$$N_{\text{отб. н.д}} = 0 .$$

Режим истечения газа из сопел и первых сопловых аппаратов турбин — сверхкритический:

$$\lambda_{C.KP} = 1 ;$$

$$\lambda_{C.KPII} = 1 ;$$

$$\lambda_{CA.HD} = 1 ;$$

$$\lambda_{CA.BD} = 1 .$$

В диапазоне сверхкритических режимов истечения пропускные способности сопел и турбин постоянны:

$$\mu_c q(\lambda_{C.KP}) = \text{const} ;$$

$$\mu_{cII} q(\lambda_{C.KPII}) = \text{const} ;$$

$$\mu_{ca.hd} q(\lambda_{CA.HD}) = \text{const} ;$$

$$\mu_{ca.bd} q(\lambda_{CA.BD}) = \text{const} .$$

Следствия из допущений

Из уравнения совместной работы турбины НД и сопла внутреннего контура

$$\pi_{\text{ТНД}}^* \cdot \sqrt{1 - l_{\text{ТНД}}} \cdot v_{(\text{CA.НД} - \text{C.КР})} = \frac{\mu_{\text{C.КР}} q(\lambda_{\text{C.КР}}) \cdot F_{\text{C.КР}}}{\mu_{\text{CA.НД}} q(\lambda_{\text{CA.НД}}) \cdot F_{\text{CA.НД}}}$$

следует постоянство степени понижения давления, КПД, относительной работы, отношения полных температур на выходе и входе турбины НД:

$$\pi_{\text{ТНД}}^* = \text{const} ;$$

$$\eta_{\text{ТНД}}^* = f(\pi_{\text{ТНД}}^*) = \text{const} ;$$

$$l_{\text{ТНД}} = \left(1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{k_2} \pi_{\text{ТНД}}^*} \right) \cdot \eta_{\text{ТНД}}^* = \text{const} ;$$

$$T_{\text{T}}^* / T_{\text{ГНД}}^* = 1 - l_{\text{ТНД}} = \text{const} .$$

Из уравнения совместной работы турбин ВД и НД

$$\pi_{\text{ТВД}}^* \cdot \sqrt{1 - l_{\text{ТВД}}} \cdot v_{(\text{CA.ВД} - \text{CA.НД})} = \frac{\mu_{\text{ca.нд}} q(\lambda_{\text{CA.НД}}) \cdot F_{\text{CA.НД}}}{\mu_{\text{ca.вд}} q(\lambda_{\text{CA.ВД}}) \cdot F_{\text{CA.ВД}}}$$

следует постоянство степени понижения давления, КПД, относительной работы, отношения полных температур на выходе и входе турбины ВД:

$$\pi_{\text{ТВД}}^* = \text{const} ;$$

$$\eta_{\text{ТВД}}^* = f(\pi_{\text{ТВД}}^*) = \text{const} ;$$

$$l_{\text{ТВД}} = \left(1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{k_2} \pi_{\text{ТВД}}^*} \right) \cdot \eta_{\text{ТВД}}^* = \text{const} ;$$

$$T_{\text{ГНД}}^* / T_{\text{Г}}^* = 1 - l_{\text{ТВД}} = \text{const} .$$

По уравнению совместной работы узлов газогенератора

$$q(\lambda_{\text{ВВД}}) = \frac{\pi_{\text{КВД}}^*}{\sqrt{I_{\text{КВД}}}} \cdot A \cdot \sqrt{I_{\text{ТВД}} \cdot B_{\text{ВД}}},$$

где

$$A = \frac{\mu_{\text{са.ВД}} q(\lambda_{\text{СА.ВД}}) \cdot F_{\text{СА.ВД}}}{F_{\text{ВВД}}} \cdot \frac{\sigma_{\text{КС}}}{v_{(\text{ВВД}-\text{СА.ВД})}} \cdot \frac{m_2}{m_6},$$

$$B_{\text{ВД}} = \frac{c_{\text{рз}}}{c_{\text{рв}}} \cdot \eta_{\text{т.ВД}} \cdot \eta_{\text{отб.ВД}} \cdot v_{(\text{ВВД}-\text{СА.ВД})},$$

однозначно определяется положение линии совместной работы узлов на характеристике компрессора ВД.

Для каждой рабочей точки на характеристике компрессора ВД по уравнениям:

- совместной работы вентилятора, компрессора ВД и сопла наружного контура

$$q(\lambda_B) = q(\lambda_{ВВД}) \cdot \frac{\pi_{кнд}^*}{\sqrt{1+l_{кнд}}} \cdot (1+m) \cdot \frac{F_{ВВД}}{F_B};$$

- совместной работы внутреннего и наружного контуров ТРДД

$$m = \frac{\mu_{сII} q(\lambda_{с.кРП}) \cdot F_{с.кРП}}{q(\lambda_{ВВД}) \cdot F_{ВВД}} \cdot \sigma_{II};$$

- баланса мощности вентилятора и турбины НД

$$\frac{l_{кнд}}{1+l_{кнд}} \cdot (1+m) = \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{ВВД}^*} \cdot (1-l_{твд}) \cdot l_{тнд} \cdot B_{нд}, \text{ где } B_{нд} = \frac{c_{p2}}{c_{pв}} \cdot \eta_{т.нд} \cdot \eta_{отб.нд} \cdot v_{(ВВД-сА.нд)};$$

определяется положение рабочей точки на характеристике компрессора НД.

Тем самым, положением линии совместной работы на характеристике компрессора ВД определяется положение соответствующей линии на характеристике компрессора НД.

На основании уравнения совместной работы компрессора ВД, КС и турбины ВД

$$q(\lambda_{\text{ВД}}) = \frac{\pi_{\text{квд}}^*}{\sqrt{T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВД}}^*}} \cdot A$$

на характеристику компрессора ВД наносятся линии постоянного отношения температур $T_{\Gamma}^*/T_{\text{ВД}}^*$.

На основании уравнения совместной работы компрессора ВД и камеры сгорания

$$q(\lambda_{\text{ВД}}) = q(\lambda_{\text{К}}) \cdot \frac{\pi_{\text{квд}}^*}{\sqrt{1+l_{\text{квд}}}} \cdot \frac{F_{\text{К}}}{F_{\text{ВД}}} \cdot \frac{1}{v_{(\text{ВД}-\text{К})}}$$

на характеристику компрессора ВД наносятся линии постоянной пропускной способности сети, расположенной за компрессором.

Анализ

Пусть режим работы двигателя увеличивается за счет увеличения расхода топлива при постоянных атмосферных условиях и скорости полета:

$$G_m \uparrow \text{ при } p_H = \text{const}, T_H = \text{const}, M_\Pi = \text{const}.$$

Степень повышения давления от скоростного напора набегающего потока и полные параметры набегающего потока рабочего тела перед двигателем постоянны:

$$\pi_V = \left(1 + \frac{k-1}{2} M_\Pi^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} = \text{const};$$

$$p_H^* = p_H \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} M_\Pi^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} = \text{const};$$

$$T_H^* = T_H \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} M_\Pi^2 \right) = \text{const}.$$

Повышаются температура газа перед турбиной, степень подогрева рабочего тела в камере сгорания и отношение температур $T_{\Gamma}^*/T_{\text{Н}}^*$:

$$T_{\Gamma}^* \uparrow, \left(T_{\Gamma}^*/T_{\text{К}}^*\right) \uparrow, \left(T_{\Gamma}^*/T_{\text{Н}}^*\right) \uparrow.$$

Уравнение баланса мощности компрессора и турбины ВД

$$l_{\text{КВД}} = \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{ВВД}}^*} \cdot l_{\text{ТВД}} \cdot B_{\text{ВД}}$$

можно записать в следующем виде:

$$\frac{l_{\text{КВД}}}{1+l_{\text{КВД}}} = \frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{К}}^*} \cdot l_{\text{ТВД}} \cdot B_{\text{ВД}}.$$

Относительная работа компрессора ВД и степень повышения давления в компрессоре ВД повышаются:

$$\left(\frac{l_{\text{КВД}}}{1+l_{\text{КВД}}} \right) \uparrow = \left(\frac{T_{\Gamma}^*}{T_{\text{К}}^*} \right) \uparrow \cdot l_{\text{ТВД}} \cdot B_{\text{ВД}} \Rightarrow l_{\text{КВД}} \uparrow \Rightarrow \pi_{\text{КВД}}^* \uparrow ,$$

так как величины этих параметров определяются степенью повышения давления и имеют одинаковый характер изменения

$$\pi_{\text{КВД}}^* \uparrow \uparrow l_{\text{КВД}} \uparrow \uparrow \frac{l_{\text{КВД}}}{1+l_{\text{КВД}}} \uparrow \uparrow \frac{\pi_{\text{КВД}}^*}{\sqrt{1+l_{\text{КВД}}}} \uparrow \uparrow \frac{\pi_{\text{КВД}}^*}{\sqrt{l_{\text{КВД}}}} .$$

Рабочая точка смещается вправо вверх по линии совместной работы на характеристике компрессора ВД:

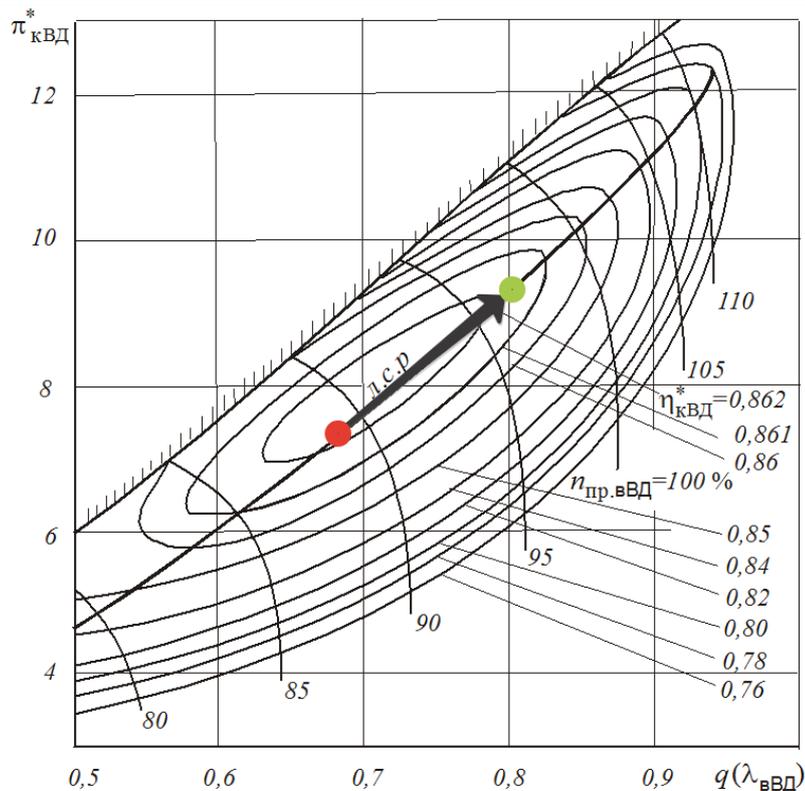
рт ↗ по лср на хар. квд .

Увеличиваются относительная плотность тока в сечении ВВД, приведенная частота вращения ротора, частота вращения ротора, отношения температур $T_K^*/T_{ВВД}^*$ и $T_\Gamma^*/T_{ВВД}^*$:

$$q(\lambda_{ВВД}) \uparrow ,$$

$$n_{вд.пр.ВВД} \uparrow , n_{вд} \uparrow ,$$

$$\left(T_K^*/T_{ВВД}^*\right) \uparrow , \left(T_\Gamma^*/T_{ВВД}^*\right) \uparrow .$$



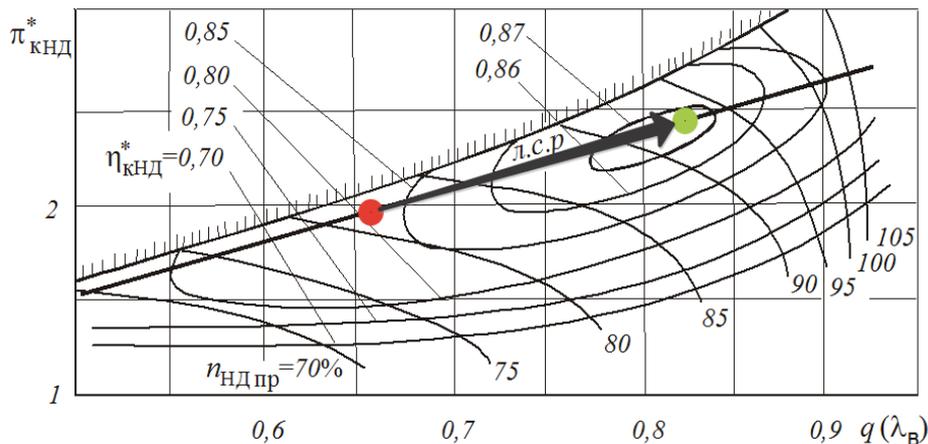
Аналогично, смещается рабочая точка по линии совместной работы на характеристике компрессора НД:

рт ↗ по лср на хар. кнд .

Увеличиваются степень повышения давления в компрессоре НД, относительная работа компрессора НД, относительная плотность тока в сечении В, приведенная частота вращения ротора, частота вращения ротора, отношение температур $T_{ВВД}^*/T_{В}^*$:

$$\pi_{кнд}^* \uparrow, l_{кнд} \uparrow, q(\lambda_{В}) \uparrow,$$

$$n_{нд.пр} \uparrow, n_{нд} \uparrow, (T_{ВВД}^*/T_{Н}^*) \uparrow.$$



Уменьшаются степень двухконтурности и скольжение роторов:

$$m \downarrow, \left(n_{ВД} / n_{НД} \right) \downarrow .$$

Увеличивается отношение температур T_K^* / T_H^* :

$$\left(T_K^* / T_H^* \right) \uparrow .$$

Увеличиваются полные температуры в сечениях за компрессорами НД и ВД, а также в сечении на входе в сопло наружного контура:

$$T_{ВВД}^* \uparrow ,$$

$$T_K^* \uparrow ,$$

$$T_{II}^* \uparrow .$$

Полные температуры в сечениях за турбинами ВД и НД увеличиваются пропорционально $T_{\Gamma}^* \uparrow$:

$$T_{\Gamma}^* \uparrow \sim T_{\Gamma\text{НД}}^* \uparrow \sim T_{\Gamma}^* \uparrow .$$

Увеличивается относительный расход топлива в камере сгорания:

$$q_m \sim T_{\text{К}}^* \uparrow \left(\left(T_{\Gamma}^* / T_{\text{К}}^* \right) \uparrow - 1 \right) .$$

Увеличиваются суммарная степень повышения давления в компрессоре:

$$\pi_{\kappa\Sigma}^* \uparrow .$$

Согласно уравнениям баланса давлений для внутреннего и наружного контуров увеличиваются располагаемые степени понижения давления в соплах внутреннего и наружного контуров:

$$\pi_{\text{ср}} \uparrow = \frac{\pi_V \cdot \sigma_{\text{вх}} \cdot \pi_{\text{кнд}}^* \uparrow \cdot \pi_{\text{квд}}^* \uparrow \cdot \sigma_{\text{кс}}}{\pi_{\text{твд}}^* \cdot \pi_{\text{тнд}}^*} ;$$

$$\pi_{\text{срII}} \uparrow = \pi_V \cdot \sigma_{\text{вх}} \cdot \pi_{\text{кII}}^* \uparrow \cdot \sigma_{\text{II}} .$$

Увеличиваются скорости истечения рабочего тела из сопел:

$$c_C \uparrow = \varphi_c \sqrt{2000 \cdot c_{p2} \cdot T_T^* \uparrow \cdot \left(1 - \frac{1}{\frac{k_2 - 1}{\pi_{ср} \uparrow}} \right)};$$

$$c_{сII} \uparrow = \varphi_{сII} \sqrt{2000 \cdot c_{pв} \cdot T_{II}^* \uparrow \cdot \left(1 - \frac{1}{\frac{k_в - 1}{\pi_{срII} \uparrow}} \right)}.$$

Увеличиваются удельные тяги внутреннего, наружного контуров и двигателя в целом:

$$P_{Iуд} \uparrow \approx (c_C \uparrow - V_{п});$$

$$P_{IIуд} \uparrow \approx (c_{сII} \uparrow - V_{п});$$

$$P_{уд} \uparrow = \frac{P_{Iуд} \uparrow + P_{IIуд} \uparrow \cdot m}{1 + m}.$$

Увеличиваются полные давления в проточной части двигателя:

$$p_{\text{ВВД}}^* \uparrow, p_{\text{К}}^* \uparrow, p_{\text{Г}}^* \uparrow, p_{\text{ГНД}}^* \uparrow, p_{\text{Т}}^* \uparrow, p_{\text{II}}^* \uparrow.$$

Увеличиваются суммарный расход воздуха через двигатель, а также расходы воздуха через внутренний и наружный контуры:

$$G_{\text{В}} \uparrow \sim q(\lambda_{\text{В}}) \uparrow;$$

$$G_{\text{ВИ}} \uparrow \sim (\rho_{\text{С}} \uparrow \cdot c_{\text{С}} \uparrow);$$

$$G_{\text{ВИ}} \uparrow \sim (\rho_{\text{СИ}} \uparrow \cdot c_{\text{СИ}} \uparrow).$$

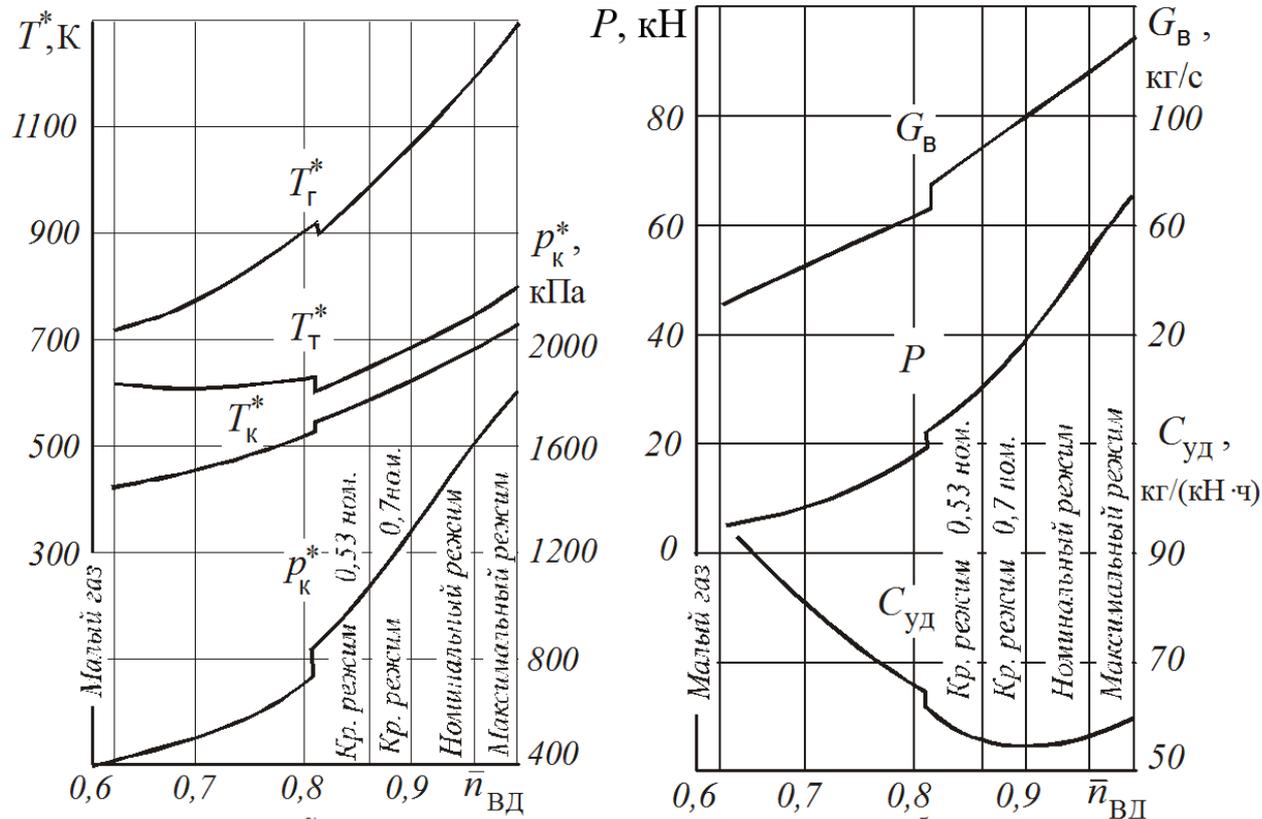
Увеличивается тяга двигателя:

$$P \uparrow = P_{\text{уд}} \uparrow \cdot G_{\text{В}} \uparrow.$$

Увеличение $T_{\Gamma}^* \uparrow$ и $\pi_{\kappa\Sigma}^* \uparrow$ ведет к повышению эффективного КПД $\eta_e^* \uparrow$ и к снижению полетного $\eta_{\Pi}^* \downarrow$ (при $V_{\Pi} > 0$). Противоположное влияние двух факторов приводит к образованию минимума удельного расхода топлива:

$$C_{\text{уд}} \searrow \nearrow .$$

Графики дроссельных характеристик ТРДД



Выводы

При повышении режима основные данные и параметры двигателя изменяются весьма существенно. В диапазоне режимов от малого газа до максимального тяга двигателя увеличивается в 15...30 раз, обеспечивая широкий диапазон изменения тяги. Удельный расход топлива изменяется почти в 2 раза. Расход воздуха увеличивается примерно в 4 раза, а частота вращения ротора – в 1,5...2 раза.

Дроссельная характеристика, построенная для САУ и $M_{II}=0$, не отличается от обобщенных характеристик.