

УДК 621.89.097.3

И.В. Грешнов, Е.А. Грешнова

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТОИМОСТИ КОМПРЕССОРА СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ НК-25

Представлена оптимизационная математическая модель, позволяющая минимизировать стоимость компрессора среднего давления (КСД) двигателя НК-25 с учетом сохранения его качественных характеристик. Предлагается снизить число ступеней компрессора, увеличив средний диаметр за счет изменения формы компрессора постоянного втулочного диаметра на постоянный периферийный диаметр и разнесения компрессора от оси вращения с учетом габаритов корпуса двигателя. Модель учитывает стоимость лопаток компрессора, роторов, статоров и сборки компрессора. Присутствует ограничение по массе компрессора, которая после оптимизации не должна превышать исходную.

Ключевые слова: модель оптимизации стоимости компрессора, снижение ступеней компрессора, математическая модель, двигатель НК-25, компрессор среднего давления.

I.V. Greshnov, E.A. Greshnova

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

OPTIMIZATION MATHEMATICAL MODEL COSTING OF MEDIUM PRESSURE COMPRESSOR ENGINE NK-25

Compiled optimization mathematical model, which allows the engine to minimize the cost of the medium pressure compressor NK-25 with a view to preserving its qualitative characteristics. It is proposed to reduce the number of compressor stages, increasing the expense of the average diameter of the compressor changes shape with the PHD (permanent hub diameter) on the CPD (constant peripheral diameter) and the diversity of the compressor from the axis of rotation, taking into account the size of the motor housing. The model takes into account the cost of the compressor blades, rotors and stators, as well as the cost of the compressor assembly. There is a limit on the weight of the compressor, which after optimization should not exceed the original.

Keywords: optimization model compressor value, decrease of compressor stages, mathematical model, engine NK-25, medium pressure compressor.

Актуальным вопросом в настоящее время является снижение стоимости авиационных двигателей. К традиционным методам снижения стоимости относится повышение параметров рабочего процесса, степени двухконтурности и КПД узлов. В статье [1] говорится о том, что эти способы уже практически не помогают добиться снижения себестоимости двигателя. В работе [2] обосновано, что единственным возможным способом является уменьшение числа ступеней, а соответственно, и массы двигателя. Таким образом, целью данной работы является создание оптимизационной модели, позволяющей минимизировать построение двигателя (на примере КСД двигателя НК-25) с учетом сохранения его качественных характеристик и ограничения по весовому параметру.

НК-25 – турбореактивный двигатель двухконтурный, трехкаскадный, с форсажной камерой (ТРДДФ), разработанный на Куйбышевском моторном заводе под руководством Н.Д. Кузнецова. Наряду с НК-32 он долгое время является одним из самых мощных авиационных двигателей в мире. НК-25 выполнен по трехвальной схеме: каскады низкого, среднего и высокого давления.

Каскад включает в себя компрессор и турбину. Каждый из компрессоров состоит из нескольких ступеней. Рассмотрим КСД, состоящий из пяти ступеней. Каждая из ступеней представляет собой ротор с лопатками (рабочее колесо) и направляющий аппарат.

Составим модель формирования стоимости компрессора среднего давления. Затраты на его производство рассчитываются по формуле

$$Z = p_1 \cdot z_{\Phi} + \sum_{i=1}^{z_{\Phi}} (p_{2i} \cdot m_i) + \sum_{i=1}^{z_{\Phi}} (p_{3i} \cdot m_i) + p_4 \cdot z_{\Phi} + p_{сб},$$

где p_1 – цена ротора; z_{Φ} – число ступеней; p_2 – цена одной лопатки на i -м диске; p_3 – цена одной лопатки на i -м направляющем аппарате; m – количество лопаток на i -м диске или направляющем аппарате; p_4 – цена статора; $p_{сб}$ – цена сборки компрессора.

Таким образом, если снизить число ступеней, то стоимость процессора значительно уменьшится.

$$z_o = \frac{L_y}{K_H \cdot u_{ср}^2},$$

$$L_y = c_p (T_{\text{вых}}^* - T_{\text{вх}}^*),$$

$$u_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{ср}} \cdot \pi \cdot n_p}{60},$$

где z_o – ожидаемое число ступеней; $z_{\text{ф}}$ – фактическое число ступеней; L_y – работа узла; $K_{\text{н}}$ – ожидаемый коэффициент нагрузки; $u_{\text{ср}}$ – средняя окружная скорость узла; c_p – изобарная теплоемкость; T^* – температура заторможенного потока; $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр в сечении; n_p – частота вращения ротора.

$$L_y = c_p \cdot (T_{\text{вых}}^* - T_{\text{вх}}^*) = 1004,5(534,16 - 381,96) = 152\,884,9 \text{ Дж/кг},$$

$$u_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{ср}} \cdot \pi \cdot n_p}{60} = \frac{D_{\text{ср}} \cdot \pi \cdot 7300}{60} = 382,2271 \cdot D_{\text{ср}},$$

$$z_o = \frac{L_y}{K_{\text{н}} \cdot u_{\text{ср}}^2} = \frac{152\,884,9}{0,4(382,2271 \cdot D_{\text{ср}})^2} = \frac{2,6164}{D_{\text{ср}}^2},$$

$$z_{\text{ф}} = \text{ОКРУГЛ}(z_o; 0).$$

Согласно приведенным формулам для уменьшения количества ступеней нужно увеличить средний диаметр. Для НК-25 средний диаметр в сечении $D_{\text{ср}} = 0,7326 \text{ м}$.

Существуют три вида форм компрессора: с постоянным втулочным диаметром (ПВД), с постоянным периферийным диаметром (ППД) и с постоянным средним диаметром (ПСД) (рис. 1).

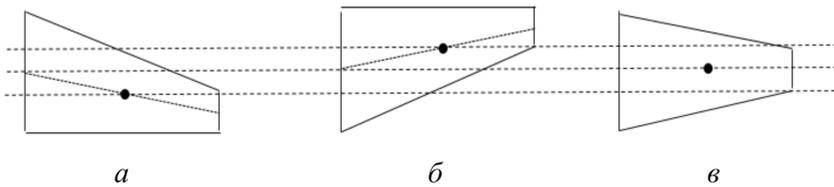


Рис. 1. Формы компрессора: а – с ПВД; б – с ППД; в – с ПСД

ПВД позволяет сохранить максимальную высоту лопатки в сечении на выходе, что благоприятно скажется на потерях из-за пограничного слоя, однако средняя окружная скорость в таком случае будет ниже. ППД позволяет добиться большей окружной скорости из-за уве-

личения среднего диаметра, что приведет к уменьшению количества ступеней. ПСД сочетает в себе достоинства обоих предыдущих вариантов, однако они не столь ярко выражены. Таким образом, выберем компрессор с периферийным диаметром, а в двигателе НК-25 стоит компрессор среднего давления с втулочным диаметром.

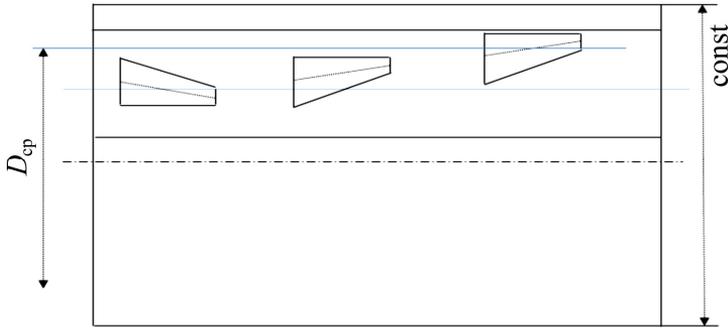


Рис. 2. Двигатель

Для того чтобы увеличить средний диаметр, нужно максимально разнести компрессор от оси вращения, но нас ограничивает корпус, так как габариты двигателя остались неизменными (рис. 2). Пусть $Max_{доп}$ определяет границу свободного перемещения проточной части.

$$Max_{доп} \geq Max,$$

$$Max = \max(Max_{вх}; Max_{вых}),$$

$$Max_{вх/вых} = D_{м.ср}^{вх/вых} + h_{л}^{вх/вых},$$

$$h_{л}^{вх} = \frac{F^{вх}}{D_{м.ср}^{вх} \cdot \pi},$$

$$D_{м.ср}^{вх} = D_{ср} \cdot K,$$

$$h_{л}^{вых} = \frac{F^{вых}}{D_{м.ср}^{вых} \cdot \pi},$$

$$D_{м.ср}^{вых} = D_{ср} (2 - K),$$

где $h_{л}$ – высота лопатки в сечении; F – площадь сечения; $D_{м.ср}$ – меняющийся средний диаметр; K – коэффициент, определяющий тип компрессора.

$$D_{\text{м.ср}}^{\text{BX}} = D_{\text{ср}} \cdot K = 0,95 \cdot D_{\text{ср}},$$

$$h_{\text{л}}^{\text{BX}} = \frac{F^{\text{BX}}}{D_{\text{м.ср}}^{\text{BX}} \cdot \pi} = \frac{0,3261}{0,95D_{\text{ср}} \cdot \pi} = \frac{0,1093}{D_{\text{ср}}},$$

$$D_{\text{м.ср}}^{\text{ВЫХ}} = D_{\text{ср}} (2 - K) = 1,05 \cdot D_{\text{ср}},$$

$$h_{\text{л}}^{\text{ВЫХ}} = \frac{F^{\text{ВЫХ}}}{D_{\text{м.ср}}^{\text{ВЫХ}} \cdot \pi} = \frac{0,1271}{1,05D_{\text{ср}} \cdot \pi} = \frac{0,0385}{D_{\text{ср}}},$$

$$\text{Max}_{\text{BX}} = D_{\text{м.ср}}^{\text{BX}} + h_{\text{л}}^{\text{BX}} = 0,95D_{\text{ср}} + \frac{0,1093}{D_{\text{ср}}},$$

$$\text{Max}_{\text{ВЫХ}} = D_{\text{м.ср}}^{\text{ВЫХ}} + h_{\text{л}}^{\text{ВЫХ}} = 1,05D_{\text{ср}} + \frac{0,0385}{D_{\text{ср}}},$$

$$\text{Max} = \max(\text{Max}_{\text{BX}}; \text{Max}_{\text{ВЫХ}}) = \max\left(0,95D_{\text{ср}} + \frac{0,1093}{D_{\text{ср}}}; 1,05D_{\text{ср}} + \frac{0,0385}{D_{\text{ср}}}\right).$$

Для двигателя НК-25 $\text{Max}_{\text{доп}} = 0,87$ м. Таким образом,

$$\max\left(0,95D_{\text{ср}} + \frac{0,1093}{D_{\text{ср}}}; 1,05D_{\text{ср}} + \frac{0,0385}{D_{\text{ср}}}\right) \leq 0,87.$$

Для того чтобы параметры двигателя не ухудшились, требуется учесть ограничение по массе. Масса компрессора вычисляется по формуле

$$M = \sum_{i=1}^k V_i^l \cdot m_{1\text{см}^3}^l + \sum_{i=1}^{z_{\Phi}} V_i^r \cdot m_{1\text{см}^3}^r + \sum_{i=1}^{z_{\Phi}} V_i^s \cdot m_{1\text{см}^3}^s + V^v \cdot m_{1\text{см}^3}^v,$$

где V^l – объем лопатки; k – число лопаток компрессора; $m_{1\text{см}^3}^l$ – масса 1 см^3 лопатки; V^r – объем ротора; $m_{1\text{см}^3}^r$ – масса 1 см^3 ротора; V^s – объем статора; $m_{1\text{см}^3}^s$ – масса 1 см^3 статора; V^v – объем вала; $m_{1\text{см}^3}^v$ – масса 1 см^3 вала.

Мы не можем увеличить массу компрессора, следовательно,
 $M \leq M_{\text{КСД НК-25}}$.

В результате получим математическую модель оптимизации стоимости КСД НК-25:

$$Z = p_1 \cdot z_\phi + \sum_{i=1}^{z_\phi} (p_{2i} \cdot m_i) + \sum_{i=1}^{z_\phi} (p_{3i} \cdot m_i) + p_4 \cdot z_\phi + p_{сб} \rightarrow \min,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_\phi = \text{ОКРУГЛ} \left(\frac{2,6164}{D_{cp}^2}; 0 \right), \\ \max \left(0,95D_{cp} + \frac{0,1093}{D_{cp}}; 1,05D_{cp} + \frac{0,0385}{D_{cp}} \right) \leq 0,87, \\ D_{cp} > 0, \\ \sum_{i=1}^k V_i^l \cdot m_{1\text{см}^3}^l + \sum_{i=1}^{z_\phi} V_i^r \cdot m_{1\text{см}^3}^r + \sum_{i=1}^{z_\phi} V_i^s \cdot m_{1\text{см}^3}^s + V^v \cdot m_{1\text{см}^3}^v \leq M_{\text{КСД НК-25}}. \end{array} \right.$$

Список литературы

1. Небесный П.В., Моляков В.Д. Оптимизация числа ступеней компрессора газогенератора ГТД [Электронный ресурс] // Молодеж. науч.-техн. вестник. – 2013. – № 2. – URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/544385.html> (дата обращения: 27.11.2016).
2. Предварительное исследование характеристик гибридных турбореактивных двухконтурных двигателей различных схем для ближне- и среднемагистральных самолетов [Электронный ресурс] / Ю.А. Эзрохи, С.М. Каленский, А.С. Полев, А.С. Дрыгин // Наука и образование. – 2012. – № 3. – <http://technomag.bmstu.ru/doc/381537.html> (дата обращения: 27.11.2016).

References

1. Nebesnyi P.V., Moliakov V.D. *Optimizatsiia chisla stupenei kompressora gazogeneratora GTD* [Optimization of the number of compressor stages of the gas generator of a gas turbine engine] – *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik*. 2013, no. 2 – available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/544385.html>.
2. Ezrokhi Iu.A., Kalenskii S.M., Polev A.S., Drygin A.S. *Predvaritel'noe issledovanie kharakteristik gibridnykh turboreaktivnykh dvukhkonturnykh dvigatelei razlichnykh skhem dlia blizhne- i srednemagistral'nykh samoletov*

[A preliminary study of the characteristics of hybrid turbofan engines of various schemes for short and medium haul aircraft]. – Nauka i obrazovanie. 2012, no. 3 – available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/381537.html>.

Получено 04.12.2016

Об авторах

Грешнов Иван Викторович (Самара, Россия) – студент, кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов», Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443096, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: ssau.greshnov@gmail.com).

Грешнова Елизавета Андреевна (Самара, Россия) – студентка, кафедры «Математические методы в экономике», Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (443096, г. Самара, Московское шоссе, 34, e-mail: liza-nekrasova@mail.ru).

About the authors

Ivan V. Greshnov (Samara, Russian Federation) – Student, Department of Aircraft Engine Construction and Design, Samara National Research University (34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russian Federation, e-mail: ssau.greshnov@gmail.com).

Elizaveta A. Greshnova (Samara, Russian Federation) – Student, Department of Mathematical Methods of Economics, Samara National Research University (34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russian Federation, e-mail: liza-nekrasova@mail.ru).