

Цифровая модель оптимизации сборки ротора компрессора авиационного двигателя

М.А. Болотов¹, В.А. Печенин¹, Е.Ю. Печенина¹, Н.С. Голев¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Статья посвящена проблемам качества сборки наукоемких изделий в авиадвигательной промышленности. Предложена математическая модель для определения оптимальных условий выполнения операций сборки сборочных единиц ротора компрессора низкого давления (КНД) авиационного двигателя. Оптимизируемыми параметрами являются относительные угловые положения деталей в роторе. Рассмотрены три критерия оптимизации: по сборочным геометрическим параметрам; по величине дисбаланса; по интегральному критерию, объединяющему предыдущие два. Модель реализована в системе MATLAB. Вычисления проводились на основании действительных моделей деталей, созданных на основании измерений геометрии деталей КНД. Выбран лучший критерий оптимизации.

1. Введение

Выполнение требований к сокращению сроков вывода изделий на рынок и их высокому качеству является сложной противоречивой задачей, в решении которой могут помочь перспективные цифровые технологии. Производство и ремонт сложных наукоемких изделий имеет высокую себестоимость, длинные циклы и значительные вложения оборотных средств. К сложным наукоемким изделиям, в которых качество является критичным показателем, относятся авиационные двигатели, силовые и энергетические установки, ракетные двигатели. Качество приведенных изделий зависит от множества факторов и прежде всего от геометрической точности сборочных единиц и изделий.

Пути достижения размерной точности определяются на этапе конструкторско-технологической подготовки производства [1,2,3]. Решение указанных задач на каждом из этапов может быть упрощено за счёт наличия математических моделей [4] и средств, позволяющих прогнозировать и определять действительное значение геометрических параметров [5], характеризующих достижимую точность.

В работе рассматривается создание цифровой модели сборки ротора компрессора низкого давления (КНД), которая используется для поиска оптимальных сборочных положений входящих в сборку деталей до проведения фактических работ по сборке.

2. Объект исследования

Как было сказано ранее, объектом исследования выступает сборка ротора компрессора низкого давления. Эскиз сборки приведен на рисунке 1.

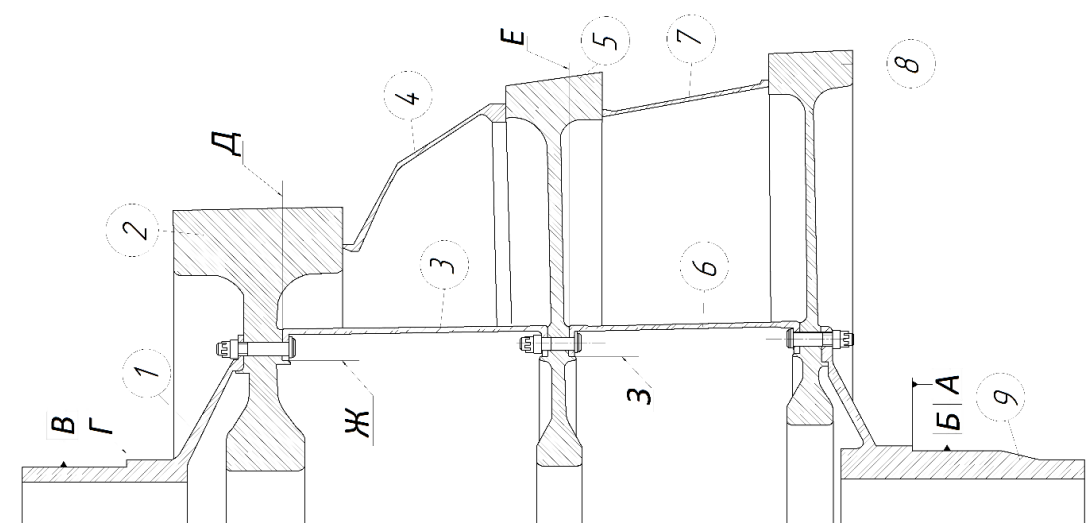


Рисунок 1. Эскиз сборки семи деталей КНД.

Сборка включает в себя следующие детали (рисунок 1): вал задний (9) и вал передний (1); диски 1, 2 и 3 (2, 5 и 8 рис. 1); первое и второе промежуточные кольца (3 и 6); кольца 1 и 2 (4 и 7 на рисунке 1). В экспериментах кольца 1 и 2 сборки не использовались. Ротор КНД устанавливается в двигатель по цилиндрическим поверхностям B и B , с упором в торцы A и $Г$. Сборку производят поэтапно, соответственно три этапа: 1) сборка вала заднего, диска 3 и кольца промежуточного 2; 2) добавление диска 2 и кольца промежуточного 1; 3) добавление диска 1 и вала переднего. Соответственно детали между собой соединяются при помощи призонных болтов.

Базовыми элементами (по которым контролируются сборочные параметры) в сборке являются поверхности A и B . На каждом из этапов сборки производится контроль торцевых $\delta_{t,r}$ и радиальных $\delta_{r,r}$ биений. На первом этапе контролируются поверхности E и $З$ кольца промежуточного (6); на втором этапе поверхности D и $Ж$ кольца промежуточного (3); контрольными поверхности третьего этапа являются поверхности вала переднего B и $Г$.

Задача сборки заключается в достижении допустимых сборочных параметров (допуск на все рассматриваемые биения 0,1 мм) и кроме того в обеспечении допустимых дисбалансов деталей и сборки в целом [6] (допуск на остаточный дисбаланс для рассматриваемого ротора составляет 600 г·мм). Все детали являются симметричными, поэтому возможны различные комбинации сборок деталей. Задачей исследования является снижение трудоемкости этапа сборки посредством выбора лучших положений деталей в сборке посредством виртуального расчета. Рассмотрим кратко математическую модель рассматриваемой сборки.

3. Модель сборки ротора

Моделирование сборки включает в себя три этапа: моделирование деталей, включающих в себя реальную геометрию, содержащую производственные отклонения; расчет сопряженных состояний деталей [7, 8]; расчет геометрических параметров и дисбалансов.

3.1. Создание моделей деталей с реальной геометрией

Для моделирования действительной геометрии необходима информация по ней в виде данных измерений поверхностей деталей. Поверхности деталей измерялись на координатно-измерительной машине (КИМ) DEA Global Performance. Детали устанавливались неподвижно на плите КИМ с помощью специальных приспособлений.

В процессе измерения было получено следующее количество измеряемых точек: на сопрягаемых плоскостях и цилиндрических поверхностях по 200-300 точек; на контрольном торце $Г$ 100 точек. Измерения граней деталей производилось по сечениям. В случае

цилиндрических поверхностей сечения представляют собой линии пересечения поверхности и плоскостей, перпендикулярных оси вращения. Для торцевых поверхностей сечения представляют собой линии пересечения поверхности и цилиндрических поверхностей, ось и центр которых совпадают с нормальным вектором плоскости. Таким образом, сечения представляют собой окружности. Координаты измеренных точек сохранялись в файлы *.txt для дальнейшего анализа в системе MATLAB.

После загрузки координат точек по поверхностям производится их обработка и приведение к структуре для дальнейшего построения действительных поверхностей. Обработка координат точек заключается в сглаживании выпадающих значений и вычислении координат точек, не хватающих для построения структуры данных. Сглаживание осуществлялось методом скользящей средней. Вычисление координат точек заключается в формировании сечений поверхностей деталей посредством аппроксимации или интерполяции измеренных массивов координат точек поверхностей посредством сплайнов в виде профилей или поверхностей [9].

В общем виде сложные поверхности деталей представляются в порционном виде, т.е. похожем на лоскутное одеяло. Кривые и поверхности сложной формы в САД-системах и метрологическом обеспечении измерительного оборудования описываются сплайновыми уравнениями. Для математического представления пространственных кривых использован нормализованный кубический сплайн 3-й степени – Эрмитова кривая [10]. Для описания поверхностей деталей, имеющих геометрические отклонения формы, использовались поверхности, образованные из бикубических порций (порции Кунса [10]).

Таким образом, действительные модели деталей представляют собой набор взаимосвязанных поверхностей деталей, участвующих в сборке и контроле.

3.2. Выполнение виртуального расчета сборки деталей, сохранение результатов

Для решения контактной задачи с использованием моделей поверхностей, был разработан итерационный алгоритм, позволяющий рассчитать сопряжение деталей без учета деформаций деталей в процессе сборки, подробно описанный в [7]. Алгоритм нахождения сопряжённого состояния предполагает итерационное перемещение одной сопрягаемой поверхности относительно другой с вектором приложения усилия сборки поверхностей \vec{D}_1 . Для выполнения процедуры наилучшего совмещения используется итерационный алгоритм ближайших точек (ICP) [11, 12]. Согласно данному алгоритму, на каждой итерации методами нелинейного оптимизационного поиска рассчитываются углы поворота и перемещения вдоль координатных осей. Для исключения пересечений двух поверхностей используется система неравенств, представленную в работе [13], которая накладывает ограничения на функцию зазора $G(\vec{V})$. В результате работы алгоритма вычисляется матрица вращения и вектор перемещения подвижной детали, определяющие преобразование ее начальной системы координат в систему координат в собранном состоянии.

3.3. Расчет сборочных параметров и дисбаланса

Расчет радиального биения между цилиндрическими поверхностями и базой B производится в следующей последовательности:

1. Выполняется выравнивание системы координат элементов по поверхности B , за счет совмещения нормального вектора поверхности B \vec{a}_y с осью X .

2. Рассчитываются расстояния от измеренных точек второй цилиндрической грани до оси поверхности B .

3. Величина радиального биения $\delta_{r,r}$ рассчитывается как разность между наибольшим d_{\max} и наименьшим d_{\min} от измеренных точек до оси B .

На рисунке 2 приведено пояснение к определению геометрического параметра «радиальное биение». Торцевое биение, например применяемое к торцу Γ детали «вал передний», рассчитывается как разность максимального и минимального расстояний от измеренных точек торца Γ до плоскости, перпендикулярной оси, образуемой базой B .

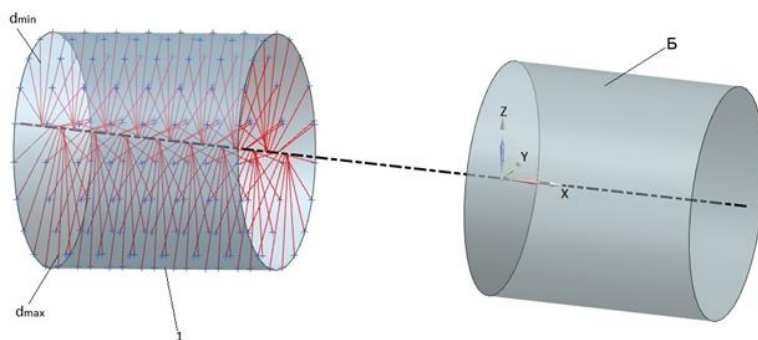


Рисунок 2. Графическое пояснение к вычислению радиального биения, 1 – поверхность, у которой вычисляется радиальное биение.

Расчет величины общего дисбаланса сборки производится с использованием выражения:

$$D_{\Sigma} = \left| \vec{r}_{\Sigma} \right| \cdot M_{\Sigma} , \quad (1)$$

где $\left| \vec{r}_{\Sigma} \right|$ – модуль суммарного вектора смещения центра масс сборки; M_{Σ} – суммарная масса сборки, состоит из суммы масс входящих в нее деталей.

Компоненты суммарного вектора \vec{r}_{Σ} вдоль координатных осей OX , OY и OZ вычисляются как:

$$r_j = \left(\sum_{i=1}^N t_{ij} \cdot M_i \right) / M_{\Sigma} , \quad (2)$$

где r_j – компонент вектора вдоль j -й оси (OX , OY или OZ); N – количество деталей в сборке; t_{ij} – компонент вектора перемещения центра масс i -й детали вдоль j -й оси; M_i – масса i -й детали.

Вектора перемещения детали \vec{t}_i рассчитывается в результате работы алгоритма поиска сопряженного состояния деталей (раздел 3.2) и пересчитывается исходя из положения оси вращения, образуемой поверхностями B вала заднего и B вала переднего (рисунок 1).

4. Критерии оптимизации

Критериями поиска оптимальных условий выполнения операций сборки ротора являются сборочные параметры входящих в него деталей и величина дисбаланса. Оптимизируемыми параметрами в процессе оптимизационного поиска являются относительные угловые положения деталей в роторе. Множество изменяемых параметров обозначается как $AP = \{ap_1, ap_2, ap_3, \dots, ap_l\}$, $AP \in R$, $l \in N$, где l – количество изменяемых параметров. Множеству изменяемых параметров устанавливается соответствие множество их допустимых значений $[AP]$, и соответствующее формальное условие $AP \leq [AP] \in R$. Для параметров, характеризующих относительное угловое положение деталей, указываются их допустимые значения, определяемые конструктивными особенностями дисков, включающих число равномерно расположенных крепёжных отверстий. Нахождение оптимального варианта сборки выполнялось исходя из трёх вариантов, отличающихся целевыми функциями.

Первый вариант предполагает наилучшее соответствие заданным геометрическим сборочным параметрам, для его нахождения минимизируется критерий:

$$K_{AsP} = \sum_{j=1}^N w_j \frac{\Delta_{AsPj}}{T_{AsPi}} \rightarrow \min , \quad (3)$$

где $\Delta_{AsPj} = AsP_j - [AsP_j]$ – расхождение между j -м геометрическим сборочным параметром ротора AsP_j и его допустимым значением $[AsP_j]$; T_{AsPi} и w_j – соответственно допуск и вес

важности на j -го геометрического сборочного параметра ротора. Исходя из требований конструкторской документации, геометрические сборочные параметры ротора не должны превышать их допустимых значений $AsP \leq [AsP] \in R$.

Второй вариант направлен на достижение наилучшего соответствия заданным требованиям дисбаланса ротора. Критерий, учитывающий достижение наилучшего распределения дисбалансов ротора:

$$K_{DP} = \frac{F(\overline{DP}, AP) - [D]}{T_D} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $F(\overline{DP}, AP)$ – функция, позволяющая параметр, характеризующий вибрационное состояние ротора, в исследовании суммарный дисбаланс D_Σ ; $[D]$ и T_D – соответственно допустимое значение и допуск на достижение параметра, характеризующего вибрационное состояние ротора в соответствии с технологической или конструкторской документацией.

Третий вариант является смешанным и предусматривает компромиссное решение по достижению наиболее значимых геометрических сборочных параметров и требований к дисбалансу ротора. Используется интегральный критерий:

$$K = w_{AsP} K_{AsP} + w_D K_{DP} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где w_{AsP} и w_D – соответственно веса значимости геометрических сборочных параметров, а также параметров, характеризующих вибрационное состояние ротора.

Значимыми геометрическими сборочными параметрами, могут являться радиальные биения дисков, оказывающие существенное влияние на неравномерность радиального зазора между торцами лопаток и статором. Для значимых геометрических параметров необходимо устанавливать высокое значение соответствующих весов значимости.

Для оценки результатов прогноза параметров сборок и уточнения структуры выбранной нейросетевой модели необходимо производить оценку ошибок прогнозирования. Оценка ошибок прогнозирования параметров производится по двум критериям:

5. Результаты применения модели сборки для оптимизации процесса

Для проведения экспериментов, были измерены семь деталей ротора КНД (рисунок 1), созданы модели деталей с измеренной геометрией. Каждая деталь имела четыре угловых положения: 0° , 90° , 180° и 270° . Таким образом, для учета всех сборочных комбинаций деталей, в системе MATLAB было проведено моделирование 4096 случаев сборок, расчет которых проводился на компьютере с процессором AMD Ryzen 7 2700 Eight-Core, с тактовой частотой 3,2 ГГц, объемом ОЗУ в 32 Гб в течение 30,5 ч. После сохранения всех результатов были использованы три рассмотренные выше критерии оптимизации и выбраны наилучшие с точки зрения критериев варианты. При проведении оптимизаций допустимое значение $[AsP_j]$ равно 0; допуск на сборочные параметры T_{AsP_i} равен 0,1 мм; $[D]$ равен 0; T_D равен 600 г·мм; веса значимости в критериях (9-11) равны 1.

Для сравнения полученных вариантов вычислялись относительные отклонения от параметров в «нулевом» положении, то есть когда угловое положение всех деталей в сборке устанавливается под 0° . Для каждого параметра формула относительного отклонения выглядит следующим образом:

$$\Delta_{omn} = (P_{omn} - P_0) / P_0 \cdot 100\%, \quad (6)$$

где P_{omn} – параметр, вычисленный в результате оптимизации; P_0 – измеренный при «нулевой» сборке параметр. В таблице 1 приведены значения геометрических параметры δ_{r_r} и δ_{t_r} поверхностей деталей сборки (рисунок 1), кроме того входящих в сборку дисков 1, 2 и 3 (в таблице 1 – д.1, д.2 и д.3), а так же суммарных дисбалансов при «нулевом» положении, а так же после оптимизаций по трем перечисленным в разделе 4 критериям. Рассчитаны относительные отклонения.

Таблица 1. Значение параметров и их отклонений от «нулевого» положения.

Параметр	Положение P_0	Варианты целевых функций			$\Delta_{отн}, \%$		
		K_{AsP}	K_{DP}	K	K_{AsP}	K_{DP}	K
δ_{r_r} д.3, мм	0,031	0,031	0,041	0,031	0,00	33,97	0,00
δ_{t_r} д.3, мм	0,106	0,106	0,130	0,106	0,00	22,93	0,00
δ_{r_r} З, мм	0,045	0,029	0,073	0,029	-35,13	64,38	-35,13
δ_{t_r} E, мм	0,015	0,023	0,029	0,023	50,54	91,99	50,54
δ_{r_r} д.2, мм	0,057	0,050	0,098	0,046	-12,36	71,90	-19,50
δ_{t_r} д.2, мм	0,074	0,033	0,061	0,055	-54,86	-17,59	-25,61
δ_{r_r} Ж, мм	0,050	0,011	0,096	0,010	-77,49	90,71	-80,56
δ_{t_r} Д, мм	0,027	0,018	0,034	0,017	-34,69	23,63	-36,99
δ_{r_r} д.1, мм	0,084	0,029	0,097	0,033	-64,94	16,44	-60,93
δ_{t_r} д.1, мм	0,039	0,028	0,045	0,025	-30,06	13,90	-37,16
δ_{r_r} B, мм	0,010	0,012	0,016	0,011	12,61	49,98	2,43
δ_{t_r} Г, мм	0,073	0,032	0,160	0,049	-56,26	117,74	-33,52
D_{Σ} , г·мм	5771,421	2193,878	59,397	1124,776	-61,99	-98,97	-80,51

Согласно полученным результатам, приведенным в таблице 1, можно сделать вывод что при оптимизации по критерию K_{AsP} в целом снижаются геометрические отклонения сборочных параметров, а так же величины общего дисбаланса на 62%, по сравнению со сборкой без оптимизации. При использовании в качестве критерия K_{DP} геометрические отклонения увеличиваются, однако существенно (на 99%) снижается дисбаланс. При использовании в качестве критерия K геометрические отклонения уменьшаются практически на те же величины, что и при использовании критерия, а дисбаланс снижается на 80%. Учитывая, что возникающие биения влияют на газодинамические характеристики двигателя в целом, можно сделать вывод, что использование интегрального критерия K для оптимизации сборки наиболее целесообразно.

6. Заключение

Рассмотренная цифровая модели сборки ротора позволяет фактически на стадии входного контроля деталей, поступающих на сборку, проводить планирование сборочных работ и комплектовать наборы деталей для достижения требуемой точности сборки и балансировки. Были рассмотрены критерии поиска оптимального положения деталей, выбран комплексный критерий, затрагивающий напрямую биения деталей сборки и величину дисбаланса. Подобный подход значительно сократит трудоемкость сборки, так как не требуется производить несколько пробных сборок для поиска приемлемого положения деталей. Как следствие сокращения трудоемкости, сократиться и стоимость производства. Для представленной сборки машинное время расчета составило немного более суток. В случае большего количества возможных вариантов сборки или большего количество входящих в нее деталей требуются другие алгоритмы поиска оптимального состояния, чем рассмотренный метод простого перебора, что является областью дальнейшего развития рассмотренной модели.

7. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках стипендии Президента Российской Федерации (номер СП-262.2019.5).

8. Литература

- [1] Soifer, V.A. Synthesis of a binary DOE focusing into an arbitrary curve, using the electromagnetic approximation / V.A. Soifer, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov // *Optics and Lasers in Engineering*. – 1998. – Vol. 29 (4-5). – P. 237-247.
- [2] Казанский, Н.Л. Оптимизация параметров инжекционного литья мультилинз из термопластичных полимеров / Н.Л. Казанский, И.С. Степаненко, А.И. Хаймович, С.В. Кравченко, Е.В. Бызов, М.А. Моисеев // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 203-214. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-203-214.
- [3] Doskolovich, L.L. Calculation of diffraction optical elements for focusing in out-axis radial focal regions / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavel'ev, V.A. Sojfer // *Avtometriya*. – 1995. – Vol 1. – P. 114-119.
- [4] Deng, X. Research on the manufacturing of mechanical parts based on the theory of space symmetry group / X. Deng, J. Wang // *Academic Journal of Manufacturing Engineering*. – 2017. – Vol. 15(1). – P. 64-71.
- [5] Zakharov, O.V. Minimization of the systematic error in centerless measurement of the roundness of parts / O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 58(12). – P. 1317-1321.
- [6] Boltov, M.A. Prediction of the vibration state of the GTE turbine rotor taking into account the influence of the geometric accuracy of parts / M.A. Boltov, E.J. Kolchina, V.A. Pechenin, N.D. Pronichev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 450(2). – P. 022022.
- [7] Болотов, М.А. Метод оценки неопределённостей пространственного сопряжения высокоточных оптических и механических деталей / М.А. Болотов, В.А. Печенин, С.П. Мурзин // *Компьютерная оптика*. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 360-369. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-3-360-369.
- [8] Болотов, М.А. Нейросетевая модель в цифровом прогнозировании геометрических параметров относительного положения деталей авиационных двигателей / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, Д.М. Балякин // *Сборник трудов V международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ)– Самара: Новая техника, 2019. – Т. 4. – С. 608-616.*
- [9] Печенин, В.А. Модель и программный модуль для прогнозирования погрешностей координатных измерений в NX OPEN API / В.А. Печенин, Н.В. Рузанов, М.А. Болотов // *Сборник трудов IV международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ), 2018. – С. 1454-1460.*
- [10] Rogers, D.F. *Mathematical Elements for Computer Graphics* / D.F. Rogers, J.A. Adams // New York, London: McGrawHill. – 1990. – 604 p.
- [11] Besl, P.J. A method for registration of 3-D shapes / P.J. Besl, N.D. McKay // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 1992. – Vol. 14(2). – P. 239-256.
- [12] Tian, H. ICP registration technology based on the coordinate system direction fit / H. Tian, P. Yang, C. Su, Z. Dong // *International Journal of Security and its Applications*. – 2015. – Vol. 9(12). – P. 47-56.
- [13] Pierce, R.S. Simulation of mating between nonanalytical programming formulation / R.S. Pierce, D. Rosen // *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. – 2007. – Vol. 7(4). – P. 314-321.

Digital model of aircraft engine compressor rotor assembly optimization

M.A. Bolotov¹, V.A. Pechenin¹, E.J. Pechenina¹, N.S. Golev¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The article is devoted to the problems of assembly quality of high technology products in the aircraft engine industry. A mathematical model is proposed to determine the optimal conditions for the assembly operations of assembly units of the rotor of a low-pressure compressor (LPC) of an aircraft engine. The optimized parameters are the relative angular positions of the parts in the rotor. Three optimization criteria are considered: according to assembly geometric parameters; the size of the imbalance; by the integral criterion combining the previous two. The model is implemented in the MATLAB system. The calculations were carried out on the basis of actual models of parts created on the basis of measurements of the geometry of the low pressure parts. The best optimization criterion was selected.