



УДК 621.4.002.2: 629.73.002.72

Филимонихин Г.Б., Невдаха А.Ю.

Кировоградский национальный технический университет. Украина, г. Кировоград

**СБОРКА РОТОРОВ БАРАБАННО-ДИСКОВОГО ТИПА
МЕТОДОМ ДВУХ ПРОБНЫХ СБОРОК С ЗАМЕРОМ БИЕНИЙ НА ПРИЗМАХ –
ТИПОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТОВ**

Анотація

Розробляється технологія складання міжопорних роторів газотурбінних двигунів (ГТД) барабанно-дискового типу (БДТ) методом двох пробних складань з заміром биття на призмах та типові процеси, призначені для визначення характеристик пар і оптимального складання ротора. Створюються алгоритми розрахунків, що забезпечують: визначення і аналіз характеристик пар; разове і оптимальне складання ротора тощо. Оптимізуються відомі алгоритми розрахунків, що забезпечують складання консольних роторів з заміром биття на призмах. В середовищі швидкої розробки додатків Borland Delphi створена комп'ютерна програма, що забезпечує розрахунки при складанні роторів ГТД БДТ методом двох пробних складань з заміром биття, як на поворотному складальному станелі, так і на призмах.

Abstract

Purpose. Is developed the technology of assembling of intersupporting rotors of the gas turbine

engines of drum-disk type by the method of two test assembling with the measurement of the beats on prisms.

Design/methodology/approach. Are developed the model processes which intended on determination of descriptions of pairs of rotor and optimum assembling of rotor. Are created the algorithms of computations which providing: determination of descriptions of pairs of rotor at measuring of beating on prisms; analysis of descriptions of pairs; a single virtual assembly of the rotor; optimum assembling of rotor; prognosis of beats of control surfaces of links of rotor and etc The known algorithms of computations, providing assembling of cantilever rotors with measuring of beating on prisms, are optimized.

Findings. Are developed the typical processes and algorithms of computations, setting for determination of descriptions of pairs, single virtual assembly of the rotor, optimum assembling of rotor. On results the work in the environment of rapid development of supplements Borland Delphi was created the connected module of subprograms and computer program, providing computations at assembling of rotors of gas-turbine engines of drum-disk type by the method of

two trial assembling with measuring of beats, both on a turning assembling device, and on prisms.

Originality/value. *Technologies of assembling of rotors and computer program allow optimum to collect the cantilever and intersupporting rotors GTE DDT on manufacture, to conduct the calculable and model experiments on the study of efficiency of method of two test assembling.*

Введение

Роторы барабанно-дискового типа (БДТ) широко используются в конструкциях современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Окончательная сборка таких роторов в виде соединения его рабочих колес, валов, проставок и т.п. это наиболее ответственный этап сборки, так как именно на нем формируется геометрическая ось ротора и ось вращения [3–6, 16].

Наиболее перспективной технологией сборки роторов ГТД БДТ является технология, основанная на методе двух пробных сборок ротора, разработанная в работах [7–16]. В соответствии с технологией, ротор разбивается на звенья, дважды пробно собирается с определенным взаимным разворотом звеньев, после каждой пробной сборки на поворотном сборочном стапеле (ПСС) замеряются биения контрольных поверхностей (КП) звеньев, затем ротор собирается третий раз — окончательно, с оптимальными взаимными разворотами звеньев, рассчитанными по определенным алгоритмам. Такой метод не требует дополнительных приспособлений для деталей ротора (центрирующих, прижимных, переходных контрольных и т.п.) и наиболее эффективен, так как характеристики пар определяются непосредственно, а не рассчитываются по биениям посадочных поверхностей звеньев, как это делается в [3–6]. Однако, он более эффективен для сборки консольных, чем межопорных роторов, поскольку биения замеряются на ПСС. В связи с этим работе [17] была построена математическая модель сборки межопорных роторов БДТ методом двух пробных сборок с замером биений на призмах.

Цель

Разработать технологию и сопутствующие ей алгоритмы расчетов для сборки межопорных роторов ГТД БДТ. Усовершенствовать алгоритмы расчетов, предназначенные для сборки роторов с замером биений на ПСС.

1. Разбиение ротора на звенья и вычисление его вспомогательных параметров

Процесс разбиения ротора на звенья описан в работе [16].

Для определения оптимальных взаимных углов поворота звеньев необходимы такие величины:

- N — количество звеньев в роторе;
- np_k — количество вариантов установки звена $(k + 1)$ на звено k в паре номер $k = /1, N - 1 /$;
- r_k — радиусы, на которых замеряются торцевые биения КП звеньев, $k = /1, N /$;
- $\pm l_k$ — расстояния между плоскостями измерения радиальных биений в паре, $k = /1, N - 1 /$ (если плоскость измерения радиальных биений второго звена пары выше аналогичной плоскости первого звена, то расстояние берется со знаком «+», если нет, то — «-»);
- $e \max_k, \delta \max_k$ — максимально-допустимые значения эксцентриситетов и перекосов КП в собранном роторе, $k = /1, N /$;
- μ_k, ν_k — коэффициенты функционала качества, $k = /1, N /$.

Для анализа характеристик пар дополнительно необходимы такие характеристики ротора:

- $r_k^{(i)}$ — радиус нижней посадочной поверхности звена k (равный радиусу $r_{k-1}^{(a)}$ верхней посадочной поверхности звена $k - 1$);
- H_k — расстояние между нижней посадочной поверхностью звена k и его КП для измерения радиальных биений.

Алгоритм 1 — вычисления вспомогательных параметров ротора, необходимых для дальнейших расчетов. Эти параметры зависят от геометрических характеристик собираемого типа ротора и способа его разбиения на звенья и не зависят от собираемого роторного комплекта. Параметры вычисляются один раз и далее используются в вычислениях при сборке выбранным способом различных роторных комплектов, принадлежащих данному типу ротора. Введение вспомогательных параметров значительно ускоряет процесс дальнейших расчетов.

На рис. 1 представлена развернутая блок-схема алгоритма. Величины на входе определены выше.

На выходе: $\Delta\varphi_k$ — угол шага поворота звена $(k + 1)$ относительно звена k в паре $k, /k = 1, N - 1 /$;

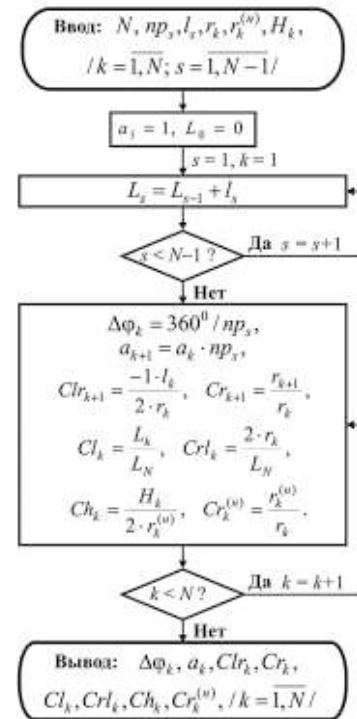


Рис. 1. Развернутая блок-схема алгоритма вычисления вспомогательных характеристик ротора

$a_k, Clr_k, Cr_k, Cl_k, Cr_l^i, Ch_k, Cr_k^i, /k=1, N /$ – вспомогательные параметры, используемые в дальнейших расчетах (a_N – количество различных возможных вариантов сборки ротора с выбранным способом разбиения его на звенья).



Рис.2. Развернутая блок-схема типового техпроцесса определения характеристик пар

Таблица 1
Биения звеньев $1 \div N$ в роторном пакете после пробной сборки $j = 1, 2$ ротора

Величина, мм Звено №	$\Delta 3_{k,j}$	$\Delta 4_{k,j}$	$\delta 3_{k,j}$	$\delta 4_{k,j}$
$k = 1 \div N$				

2. Работа с роторными комплектами – техпроцессы

2.1. Типовой техпроцесс определения характеристик пар

Развернутая блок-схема типового техпроцесса определения характеристик пар по результатам двух пробных сборок ротора с замером биений на призмах приведена на рис. 2. Процесс разметки звеньев (дисков) ротора и замера биений их КП описан в работе [16].

Первый раз ротор пробно собирается с взаимным поворотом звеньев ротора друг относительно друга на 0° , второй – на 180° . После каждой пробной сборки ротор устанавливается на призмы для измерения биений КП звеньев. В результате дважды заполняется таблица биений.

Если КП звеньев не центрированы с их главными центральными осями инерции, то замеряются эталонные биения КП звеньев $\Delta 3_{k,0}, \Delta 4_{k,0}, \delta 3_{k,0}, \delta 4_{k,0}, k = /1, N /$, как это описано в работе [16].

2.2 Типовые техпроцессы сборки ротора

В работе [16] приведены укрупненные блок-схемы двух типовых техпроцессов сборки ротора БДТ методом двух пробных сборок с замером биений на ПСС: без текущего контроля и коррекции ошибок; с текущим контролем и коррекцией ошибок. Для сборки ротора с замером биений на призмах также можно использовать эти два технологических процесса. При сборке ротора без текущего контроля и коррекции ошибок ротор окончательно собирается на монтажном столе, и достигнутые биения звеньев замеряются для полностью собранного ротора на призмах. При сборке ротора с текущим контролем и коррекцией ошибок ротор окончательно собирается на монтажном столе, и достигнутые биения звеньев замеряются для полностью собранного ротора на призмах. При сборке ротора с текущим контролем и коррекцией ошибок необходимо использовать ПСС для замера достигнутых биений КП звеньев ротора после установки в роторный пакет очередного звена. По этим биениям пересчитываются оптимальные углы поворотов неустановленных звеньев. После окончательной сборки ротора, достигнутые биения его звеньев также замеряются на призмах.

3. Работа с роторными комплектами – алгоритмы расчетов

3.1. Алгоритмы по работе с параметрами

Рассмотрим развернутые блок-схемы алгоритмов, обеспечивающих расчет характеристик пар и неточностей базирования посадочных поверхностей. Будем относить их к характеристикам роторного комплекта.

Алгоритм 2 – вычисления характеристик пар позволяет определить их по биениям КП звеньев и геометрическим параметрам ротора. Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

Величины на входе определены выше.

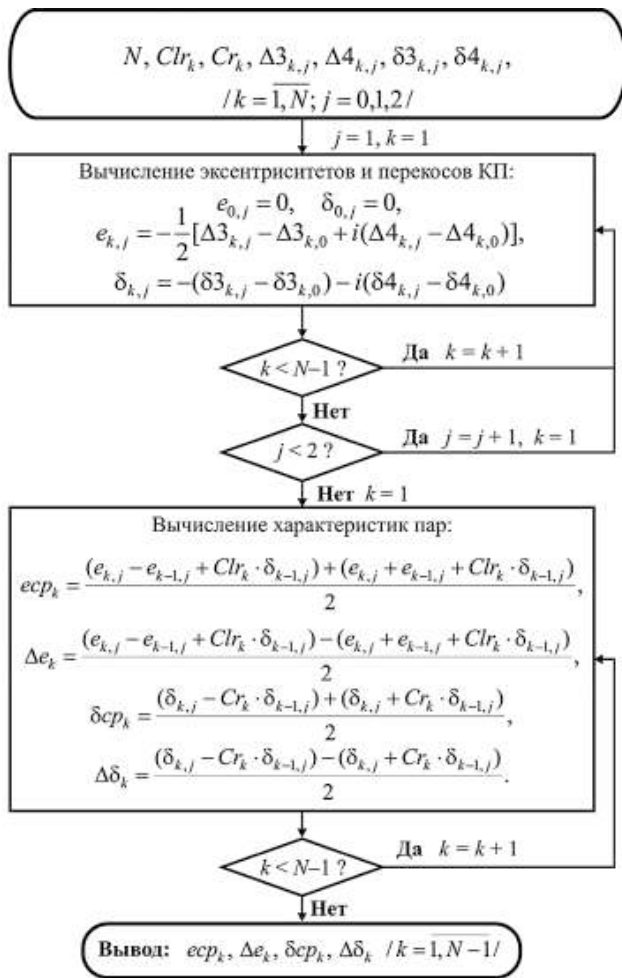


Рис. 3. Развернутая блок-схема алгоритма вычисления характеристик пар

На выходе: $esp_k, \Delta e_k, \delta cp_k, \Delta \delta_k$ – характеристики пар.

Алгоритм 3 – вычисления неточности базирования посадочных поверхностей – это вспомогательный алгоритм, не влияющий на оптимальную или разовую сборки ротора. Его задача – определять неточность изготовления посадочных поверхностей звеньев ротора. Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 4.

Величины на входе определены выше.

На выходе: $e_k^{(a)}, e_{k+1}^{(i)}, \delta_k^{(a)}, \delta_{k+1}^{(i)}$ – эксцентриситеты и перекосы посадочных поверхностей.

3.2. Алгоритмы расчетов, обеспечивающие разовую виртуальную сборку роторов БДТ

Алгоритм 4 – разовой виртуальной сборки ротора на ПСС необходим для сборки консольных роторов БДТ [16]. Укрупненная блок-схема алгоритма представлена на рис. 5.

Величины на входе определены выше.

На выходе: $e_k^{(c)}, \delta_k^{(c)}$ – эксцентриситеты и перекосы КП при виртуальной сборке ротора на ПСС.

Решение задачи разовой сборки ротора с замером биений на ПСС обеспечивают алгоритмы:



Рис. 4. Развернутая блок-схема алгоритма вычисления неточности базирования посадочных поверхностей



Рис. 5. Укрупненная блок-схема алгоритма разовой виртуальной сборки ротора с замером биений на ПСС

- вычисления относительных углов поворота звеньев по номеру сборки;
- вычисления абсолютных углов поворота звеньев;
- виртуальной сборки ротора на поворотном сборочном стапеле.

Алгоритм 5 – вычисления относительных углов поворота звеньев по номеру сборки. Для возможности реализации метода полного перебора одним циклом, введен номер сборки ротора m . Он меняется от 0 (когда угол поворота всех звеньев равен 0°) до a_N . По этому номеру алгоритм вычисляет относительные углы поворотов звеньев.

Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

Величины на входе определены выше.

На выходе: ϕ_s – относительные углы поворота.

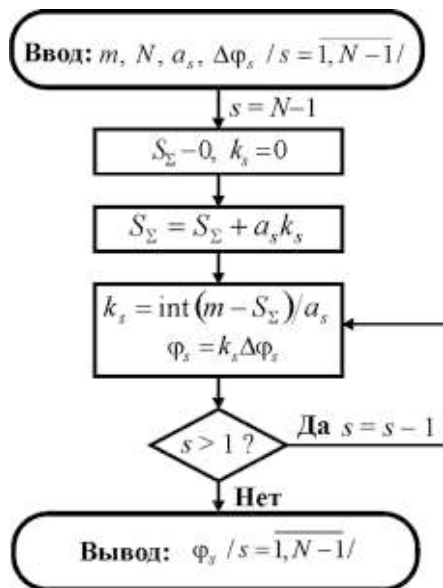


Рис. 6. Развернутая блок-схема алгоритма вычисления относительных углов поворота звеньев по номеру сборки

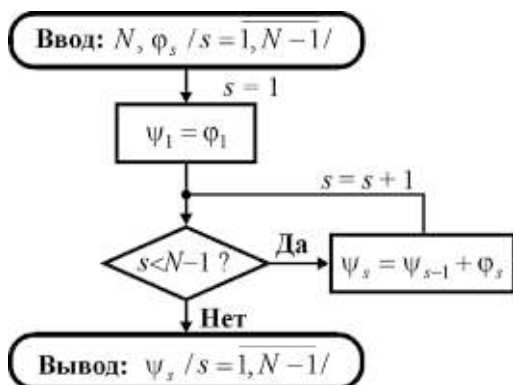


Рис. 7. Развернутая блок-схема алгоритма вычисления абсолютных углов поворота звеньев ротора

Алгоритм 6 – вычисления абсолютных углов поворота звеньев ротора. В расчетах удобнее использовать не относительные углы поворота звеньев, а абсолютные (поворот звена k относительно первого). Развернутая блок-схема алгоритма вычисления абсолютных углов поворота звеньев ротора по относительным представлена на рис. 7.

Величины на входе определены выше.

На выходе: ψ_s – абсолютные углы поворота.

Алгоритм 7 – виртуальная сборка ротора на ПСС позволяет по характеристикам пар определить эксцентриситеты и перекосы КП звеньев ротора при разных значениях абсолютных углов поворота [16]. Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 8.

Величины на входе и выходе алгоритма определены выше.



Рис. 8. Развернутая блок-схема алгоритма виртуальной сборки ротора на ПСС



Рис. 9. Укрупненная блок-схема алгоритма разовой виртуальной сборки ротора с замером биений на призмах

В отличие от алгоритма работы [16], в предложенный алгоритм входят вспомогательные коэффициенты, что значительно сокращает процесс расчетов.

Алгоритм 8 – разовой виртуальной сборки ротора с замером биений на призмах применяется в случае разовой виртуальной сборки межопорных роторов БДТ [17]. Укрупненная блок-схема алгоритма представлена на рис. 9.

Решение задачи разовой сборки ротора с замером биений на призмах обеспечивают алгоритмы:

- разовой виртуальной сборки ротора на ПСС;
- виртуальной переустановки консольного ротора на призмы [17].

Величины на входе определены выше.

На выходе: e_k, δ_k – эксцентриситеты и перекося КП при виртуальной сборке ротора на призмах.

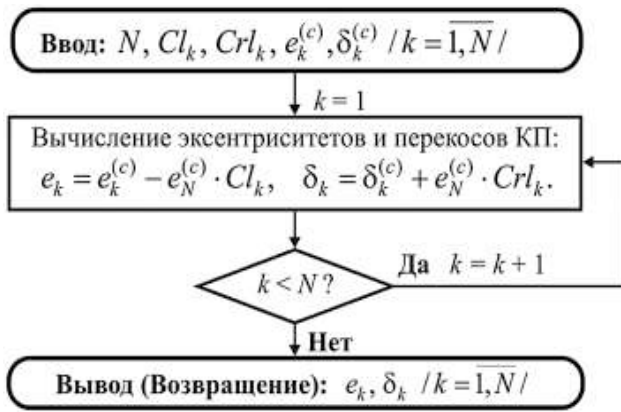


Рис. 10. Развернутая блок-схема алгоритма виртуальной переустановки ротора на призмы

Алгоритм 9 – виртуальная переустановка ротора на призмы позволяет определить изменение эксцентриситетов и перекосов КП ротора, если бы его переустановили с ПСС на призмы [17]. Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 10.

Величины на входе и выходе алгоритма определены выше.

3.3. Алгоритмы расчетов, обеспечивающие оптимальную сборку роторов БДТ методом двух пробныхборок

Алгоритм 10 – решения задачи оптимальной сборки ротора по результатам двух пробныхборок с замером биений на призмах или ПСС.

На рис. 11. представлена укрупненная блок-схема алгоритма. В отличие от алгоритма работы [16], предложенный алгоритм не зависит от числа звеньев ротора, и применим при замере биений как на ПСС, так и на призмах.

Укрупненная блок-схема состоит из блоков: ввода расчетных данных; разовой виртуальной сборки ротора для замера биений на призмах или на ПСС; проверки ограничений на биения; вычисления функционала качества; сравнения значения текущего функционала качества с предыдущим, и в случае выполнения условия сохранения новых значений функционала качества и относительных углов; вывода результатов.

При оптимальной сборке консольного ротора БДТ используется укрупненная блок-схема алгоритма разовой виртуальной сборки ротора на ПСС (рис. 5), а для межопорного ротора – укрупненная блок-схема алгоритма разовой виртуальной сборки ротора для замера биений на призмах (рис. 9).

Как видно на рис. 11, метод полного перебора реализован одним циклом. Это стало возможно за счет ввода величины m , присваивающей порядковый номер каждому варианту сборки ротора. Также следует отметить, что такой алгоритм позволяет опти-

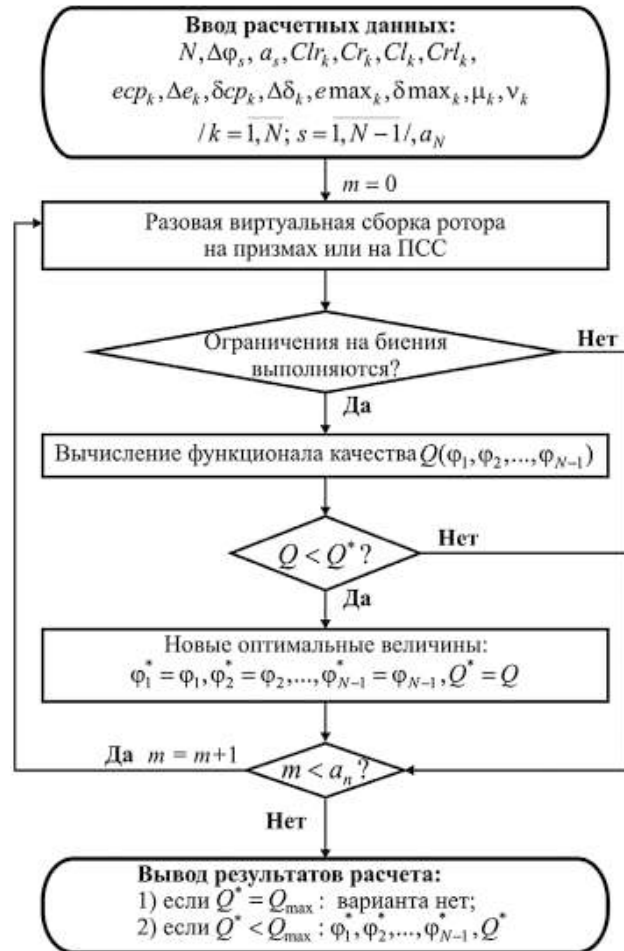


Рис. 11. Укрупненная блок-схема алгоритма оптимальной сборки ротора

мально собирать роторы с произвольным количеством звеньев.

Для решения задачи оптимизации используется метод полного перебора возможных вариантов сборки ротора [6, 16]. Для этого ротор виртуально собирается по всем возможным вариантам, для каждого варианта проверяются ограничения на биения и при их выполнении вычисляется функционал. Оптимальными считаются углы, при которых выполняются ограничения на биения и функционал качества минимален.

Величины на входе и выходе алгоритма приведены выше.

Алгоритм 11 – проверка ограничений на биения проверяет, соответствуют ли заданным требованиям эксцентриситеты и перекосы КП звеньев ротора. Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 12.

Величины на входе определены выше.

На выходе: Fl – флаг, сигнализирующий, ограничены ли биения ($Fl = 1$) или нет ($Fl = 0$).

Алгоритм 12 – вычисление функционала качества. Функционал качества текущей сборки рассчитывается по вспомогательным коэффициентам функционала и значениям эксцентриситетов и пере-

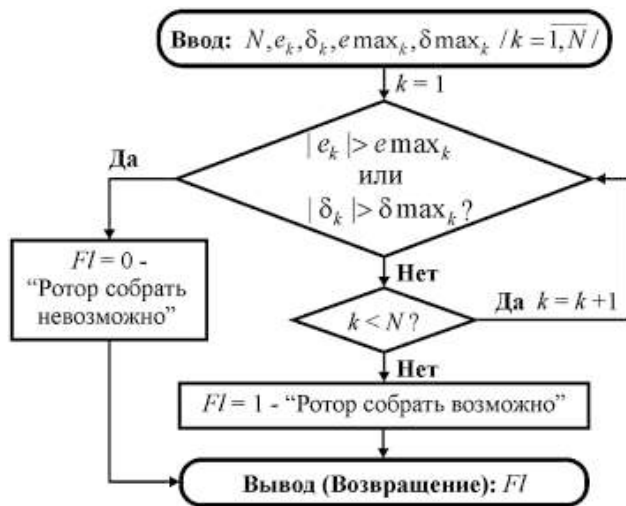


Рис. 12. Развернутая блок-схема алгоритма проверки ограничений на биения

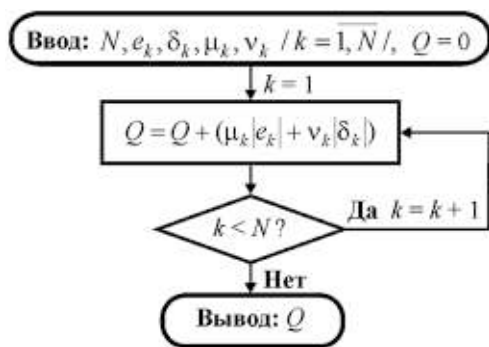


Рис. 13. Развернутая блок-схема алгоритма вычисления функционала качества

косов КП звеньев ротора. Развернутая блок-схема алгоритма представлена на рис. 13.

Величины на входе определены выше.

На выходе: Q – функционал качества.

Алгоритм 13 – запоминания новых оптимальных значений предназначен для запоминания нового (оптимального) значения функционала качества, относительных углов поворота звеньев и соответствующего номера сборки ротора. Развернутая блок-схема алгоритма приведена на рис. 14.

Величины на входе определены выше.

На выходе:

Q^* – новое минимальное значение функционала качества;

m^* – номер сборки, соответствующий Q^* ;

$\varphi_1^*, \varphi_2^*, \dots, \varphi_{N-1}^*$ – новые оптимальные относительные углы поворота звеньев.

4. Информационный алгоритм.

Алгоритм 14 – информационный, необходим для прогноза положений звеньев в роторном пакете для некоторого определенного варианта сборки ротора, а также для оценки качества и точности

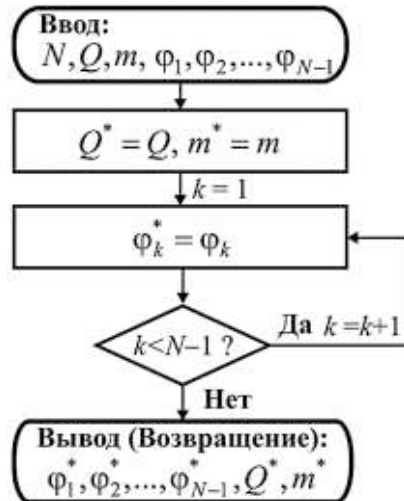


Рис. 14. Развернутая блок-схема алгоритма запоминания новых оптимальных значений

сборки ротора в этом варианте. На рис. 15 изображена укрупненная блок-схема алгоритма.

Величины на входе определены выше.

На выходе блок-схемы, помимо величин приведенных выше: $\Delta_k^{(np)}, \delta_k^{(np)}$ – ожидаемые радиальные и торцевые биения КП ротора.

Расчеты обеспечивают алгоритмы:

- проверки ограничений на биения;
- вычисления функционала качества;
- вычисления прогнозируемых биений.

Для контроля положения звеньев в роторе используется алгоритм прогноза биений.

Блок-схемы алгоритмов проверки ограничений на биения и вычисления функционала качества приведены выше.

Алгоритм 15 – прогноза биений КП звеньев.

Сравнением расчетных и достигнутых биений можно оценивать, насколько точно устанавливаются звенья в роторе.



Рис. 15. Укрупненная блок-схема информационного алгоритма

Пусть в результате виртуальной сборки ротора получены значения эксцентриситетов и перекосов звена k при абсолютном угле ψ_k поворота этого звена относительно первого. Тогда радиальные Δ'_k и торцевые δ'_k биения звена k в собственной системе координат будут определяться по формулам:

$$\Delta'_k = -2 \cdot e_k \cdot e^{-i\psi_{k-1}}, \delta'_k = -\delta_k \cdot e^{-i\psi_{k-1}}, / k = \overline{1, N} /.$$

На практике контрольные поверхности звеньев ротора могут быть выполнены не идеально и иметь некоторые эталонные биения. С учетом этого формулы прогноза радиальных и торцевых биений имеют вид:

$$\Delta_k^{(np)} = \Delta'_k + \Delta_{k,0}, \delta_k^{(np)} = \delta'_k + \delta_{k,0}, / k = \overline{1, N} /,$$

где $\Delta_{k,0} = \Delta 3_{k,0} + i \cdot \Delta 4_{k,0}$, $\delta_{k,0} = \delta 3_{k,0} + i \cdot \delta 4_{k,0}$, / $k = \overline{1, N}$ /,
или, окончательно:

$$\Delta_k^{(np)} = -2 \cdot e_k \cdot e^{-i\psi_{k-1}} + \Delta 3_{k,0} + i \cdot \Delta 4_{k,0},$$

$$\delta_k^{(np)} = -\delta_k \cdot e^{-i\psi_{k-1}} + \delta 3_{k,0} + i \cdot \delta 4_{k,0}, / k = \overline{1, N} /.$$

Развернутая блок-схема алгоритма прогноза биений представлена на рис. 16.

Величины на входе определены выше.

На выходе: $\Delta_k^{(np)}$, $\delta_k^{(np)}$ — ожидаемые радиальные и торцевые биения КП ротора.

5. Программа, обеспечивающая сборку роторов ГТД БДТ методом двух пробных сборок

По приведенным выше блок-схемам, в среде быстрой разработки приложений Borland Delphi была составлена компьютерная программа, предназначенная для числовых расчетов, обеспечивающих

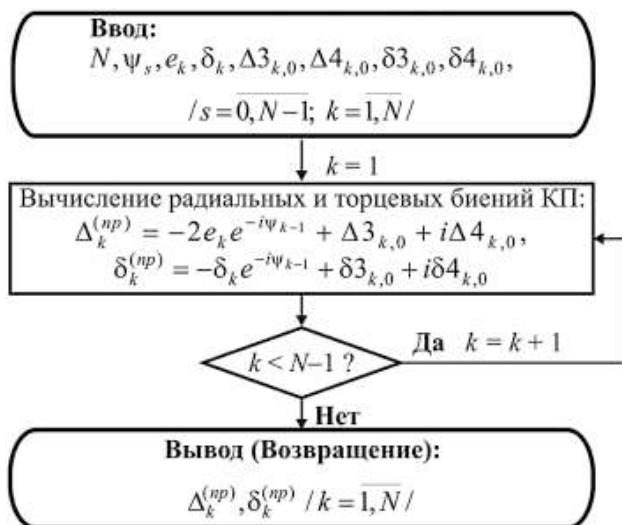


Рис. 16. Развернутая блок-схема алгоритма прогноза биений

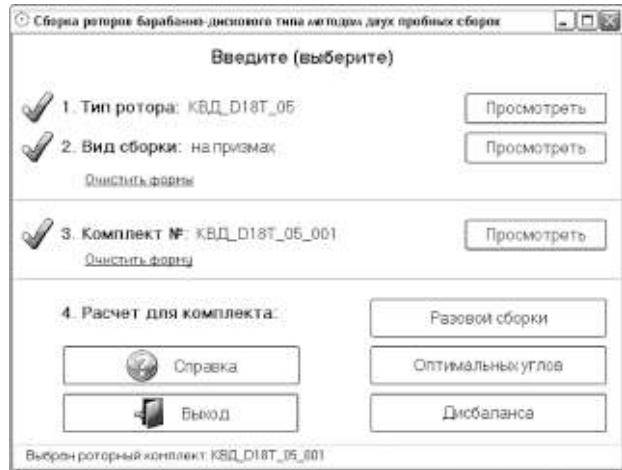


Рис. 17. Окно программы сборки роторов ГТД БДТ методом двух пробных сборок

типовые процессы сборки роторов ГТД БДТ методом двух пробных сборок.

Для возможности дальнейшего расширения программы был создан отдельный модуль, в котором в виде процедур реализованы отдельные обеспечивающие алгоритмы.

Интерфейс программы сам подсказывает пользователю последовательность действий.

При выборе типа ротора загружается информация о роторе: количество звеньев, количество вариантов соединения звеньев, необходимые для расчетов геометрические размеры, ограничения на биения и коэффициенты функционала качества. Если нужной информации нет, то ее можно ввести самостоятельно.

Вид сборки определяет, где будут замеряться биения КП — на ПСС или на призмах, а также точность прибора, измеряющего биения.

При выборе номера комплекта пользователем вводятся биения КП звеньев конкретного роторного комплекта (или загружаются с файла, если они уже были введены): эталонные, первой и второй пробных сборок.

После ввода всех данных можно работать с комплектом: выполнять расчет разовой сборки, оптимальных углов и дисбаланса ротора.

Выводы

В работе получены такие основные результаты по процессам сборки роторов ГТД БДТ.

1. Созданы типовые техпроцессы определения характеристик пар и оптимальной сборки межопорных роторов по результатам двух пробных сборок ротора с замером биений на призмах.

2. Разработаны и оптимизированы алгоритмы расчетов, обеспечивающие оптимальную сборку роторов БДТ по результатам двух пробных сборок ротора с замером биений, как на поворотном сбо-



рочном стапеле, так и на призмах, пригодные для ротора, разбитого на произвольное число звеньев.

3. В среде быстрой разработки приложений Borland Delphi создана компьютерная программа, обеспечивающие расчеты при сборке роторов ГТД БДТ методом двух пробных сборок.

Технологии сборки роторов и компьютерная программа позволяют оптимально собирать на производстве консольные и межопорные роторы ГТД БДТ, проводить вычислительные и натурные эксперименты по изучению эффективности метода двух пробных сборок.

Литература

1. Зрелов В.А. Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы: Учебн. Пособие. М.: ОАО «Издательство «Машиностроение», 2005. 336 с.
2. Gunston, Bill (2006). World Encyclopedia of Aero Engines, 5th Edition. Phoenix Mill, Gloucestershire, England, UK: Sutton Publishing Limited. pp. 260.
3. ОСТ 1.41185-72. Ротор компрессора с дисками, имеющие торцевые зубья: Типовой технологический процесс сборки ротора компрессора.
4. ОСТ 1-76086-71 «Прибор для определения оптимального положения дисков при сборке ротора компрессора».
5. РТМ 1.4.775-80. Сборка и балансировка роторов ГТД: Руководящий технологический материал. — М.: НИИТ, 1981. — 127 с.
6. Непомилуев В.В. Разработка технологических основ обеспечения качества сборки высокоточных узлов газотурбинных двигателей / Дисс. ... докт. техн. наук: 05.07.05. — Рыбинск: РГАТА, 2000. — 356 с.
7. Кондратюк Э.В. Учет коробления и неточности изготовления деталей при прогнозировании результатов сборки роторов ГТД / Э.В. Кондратюк, В.А. Титов, Г.Б. Филимоныхин // Вестник двигателестроения. — 2005. — №1. — С. 61–68.
8. Кондратюк Э.В. Сборка ротора КВД газотурбинного двигателя Д-18Т методом двух пробных сборок и последовательной оптимизации / Э.В. Кондратюк // Технологические системы. — 2005. — №2. — С. 10–16.
9. Кондратюк Э.В. Анализ характеристик пар, образуемых стыковкой звеньев ротора ГТД барабанно-дисковой конструкции / Э.В. Кондратюк, В.А. Титов, Г.Б. Филимоныхин // Вестник национального технического университета Украины «КПИ». — 2005. — №47. — С. 16–19.
10. Кондратюк Э.В. Сборка ротора КВД газотурбинного двигателя методом двух пробных сборок и полной оптимизации / Э.В. Кондратюк, Г.Б. Филимоныхин // Технологические системы. — 2005. — №4 (30). — С. 9–14.
11. Кондратюк Э.В. Сборка ротора барабанно-дисковой конструкции методом двух пробных сборок / Э.В. Кондратюк, В.А. Титов, Г.Б. Филимоныхин // Технологические системы. — 2005. — №1. — С. 30–34.
12. СОУ-Н МПП 49.050-074:2006. Складання роторів газотурбінних двигунів барабанно-дискової конструкції методом двох пробних зборок / Е.В.Кондратюк, В.А.Тітов, Г.Б.Філімоніхін // Наставна Міністерства промислової політики України, 2006. — 32 с.
13. Патент № 33372 Україна. Спосіб складання ротора газотурбінного двигуна / Кондратюк Е.В., Пейчев Г.І., Тітов В.А., Тривайло М.С. Філімоніхін Г.Б. — опубл. 25.06.2008, бюлетень № 12.
14. Кондратюк Е.В. Підвищення ефективності та якості складання роторів газотурбінних двигунів барабанно-дискової конструкції: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». — К., 2009. — 22 с.
15. Тітов В.А. Забезпечення ресурсу та експлуатаційної надійності виробів машинобудування технологічними методами — науковий напрямок кафедри МПМ та РП НТУУ «КПІ» / В.А. Тітов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». — 2010. № 60. с. 25–32.
16. Кравченко И.Ф. Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчетов: Монография / И.Ф.Кравченко, Э.В. Кондратюк, В.А. Титов, Г.Б. Филимоныхин, Г.И. Пейчев, А.Я. Качан. — Киев: КВИЦ, 2011. — 197 с.
17. Філімоніхін Г.Б. Складання двоопорних роторів барабанно-дискової конструкції методом двох пробних складань з заміром биттів на призмах / Г.Б. Філімоніхін, А.Ю. Невдаха // Збірник наукових праць КНТУ, 2009, Вип. 22, С. 206–210.