

В. М. Борисов, С. В. Борисов

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗМЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОБИРАЕМОСТИ ОСНОВНЫХ КОМПРЕССОРОВ ТУРБОХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

*Ключевые слова:* турбохолодильные машины, осевые компрессоры, оценка собираемости.

*Предлагается алгоритм составления сборочных размерных цепей для оценки собираемости осевых компрессоров турбохолодильных машин. Предложенные формулы для расчета радиальных зазоров в ступенях компрессора с учетом суммарного эксцентриситета, а также формулы для расчета толщины компенсатора, передних и задних осевых зазоров в тракте компрессора.*

*Keywords:* turbo refrigeration machines, axial compressors, assessment collection.

*An algorithm for drawing assembly size of chains to assess the collectability of axial compressors turbo refrigeration machines. The proposed formula for calculating the radial clearances in the compressor stages and overall eccentricity, as well as formulas for calculating the thickness of the compensator, front and rear axle clearances in the path of the compressor.*

В специальных турбохолодильных машинах, применяемых в системах кондиционирования для административных, производственных и складских помещений (машина может МТХМ1-25 и ее модификации), основным функциональным элементом является многоступенчатый осевой компрессор.

Из числа функциональных параметров, определяющих точности сборки компрессоров, наиболее важными являются зазоры в трактах, поскольку их изменения, при прочих равных условиях, существенно влияют на энергетические параметры и безопасность работы машин [1]. Контроль таких зазоров производит методом непосредственной оценки (с применением спецщупов, шаблонов) или расчетом и, наконец, может применяться метод, сочетающий непосредственные замеры и расчеты [2,3].

Поскольку обеспечение расчетных величин радиальных и осевых зазоров в трактах осевых компрессоров при их сборке производится методом регулировки (компрессоров). Особый интерес представляет разработка эффективной и корректной методики по составлению сборочных размерных цепей для решения задачи по оценке собираемости осевых компрессоров. Практика производства турбохолодильных машин показала, что из технологических погрешностей, сопровождающих сборку компрессора значительную долю составляют погрешности посадки (несоблюдение зазоров, натягов) и ориентации (смещения осей деталей, биения): существенно влияющие на радиальные зазоры – зазоры, от которых зависят производительности, КПД, надежность и безаварийность работы компрессоров,

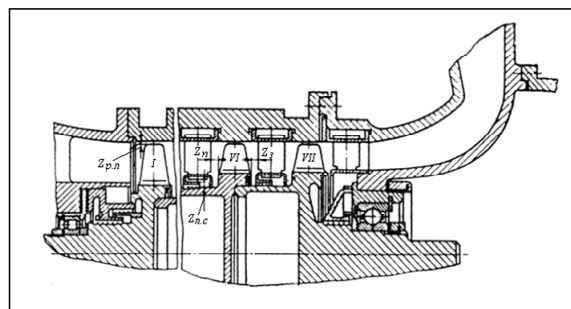
Известно, что величина радиальных зазоров по торцам рабочих лопаток ( $Z_{р.л}$ ) и в лабиринтных уплотнениях ступеней ( $Z_{л.с}$ ) осевых компрессоров (рис.1) могут быть определены при непосредственных измерениях диаметром сопрягаемых поверхностей по формуле [2,3]:

$$Z_p = (D - d) / 2, \quad (1)$$

где  $D$  и  $d$  – диаметры поверхностей соответственно статорной и роторной сборочной единицы.

Однако, формула (1) справедлива лишь для статического положения ротора, более того, она не учитывает погрешностей изготовления и сборки статора и ротора компрессора.

На наш взгляд, формула (1) должна быть трансформирована с учетом величины предельного суммарного эксцентриситета в рассматриваемом сечении собранного компрессора. Тогда формула для определения величины минимального и максимального радиального зазора в рассматриваемом сечении компрессора могут быть представлены в виде:



**Рис. 1 - Разрез осевого компрессора ТХМ (I,VI,VII - номера ступеней)**

$$Z_{p.i.min} = (D_{imin} - d_{imax}) / 2 - e_{\Sigma i}, \quad (2)$$

$$Z_{p.i.max} = (D_{imax} - d_{imin}) / 2 + e_{\Sigma i}, \quad (3)$$

где  $D_{imax}$  – максимальные,  $D_{imin}$  – минимальные замеренные величины диаметров поверхности статорной оборотов единицы для сечения в котором определяется зазор  $Z_i$ ;  $d_{imax}$   $d_{imin}$  – тоже для ро-

торной сборочной единицы;  $e_{\Sigma i}$  – суммарный эксцентриситет рассматриваемого сечения компрессора.

Величина  $e_{\Sigma i}$  должна, на наш взгляд определяться теоретико-вероятностным методом с учетом технологических погрешностей деталей и сборочных единиц, которые обеспечивают силовое замыкание сборочной размерной цепи, вызывающих смещение оси статора и ротора компрессора.

Нами предлагается определить величину  $e_{\Sigma i}$  по формуле:

$$e_{\Sigma i} = 0,5K \sqrt{\sum_i^n \Delta_{p,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{z,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{k,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{n,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{np,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{nc,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{np,i}^2 + \sum_i^n \Delta_{ц}^2 + \sum_i^m \Delta_{pr,i}^2} \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент, характеризующий закон распределения  $i$ -ой погрешности;  $\Delta_{p,i}$  – величины максимального радиального зазора в подшипнике  $i$ -ой опоры компрессора;  $\Delta_{z,i}$  – величина максимального зазора между наружной поверхностью обоймы подшипника  $i$ -ой опоры и его корпусом;  $\Delta_{k,i}$  – величина максимального биения внутренней поверхности корпуса подшипника  $i$ -ой опоры относительно наружной посадочной;  $\Delta_{n,i}$  – величина максимального зазора посадки корпуса подшипника  $i$ -ой опоры в корпусе компрессора;  $\Delta_{np,i}$  – величина максимального биения поверхности корпуса подшипника  $i$ -ой опоры относительно посадочной поверхности в корпусе компрессора;  $\Delta_{nc,i}$  – величина максимального биения посадочных поверхностей сопряженных деталей корпуса компрессора в  $i$ -ом сечении компрессора;  $\Delta_{np,i}$  – величина максимальной не параллельности осей стыковочных фланцев  $i$ -ой и  $i+1$  корпусных сборочных единиц на радиусе  $R_i$  расположения стяжных болтов;  $n$  – число подшипниковых опор компрессора;  $m$  – число стартерных сборочных единиц, образующих тракт компрессора;  $\Delta_{ц}$  – величина максимального биения цапф компрессора относительно друг друга;  $\Delta_{pr,i}$  – величина максимального биения поверхности ротора относительно его цапф в месте определения радиального зазора.

Для рассматриваемого случая  $K=1$ , [2,3], поскольку величины  $\Delta_i$  – являются векторными,

равновероятными по направлению и модули их распределяются по закону Максвелла при величине производительного риска 0,15% [4].

Задавшись технологически выполняемыми и экономически целесообразными (при обычных производственных условиях) значениями величин  $\Delta_i$ , входящих в правую часть зависимости (4), или взяв их максимально допустимые значения из технических условий на изготовление соответствующих деталей компрессора, представляется возможным определить величины  $e_{\Sigma i}$ , которые будут являться постоянными для каждого типа компрессора. Тогда значения  $Z_{imin}$  и  $Z_{imax}$  определяемые по уравнениям (2) и (3), являются функциями непосредственно измеряемых величин  $D_i$  и  $d_i$ , и перед укладкой ротора в корпус компрессора представляется возможным (до сборки) определять ожидаемые величины радиальных зазоров в ступенях и лабиринтных уплотнениях тракта компрессора. Зависимости осевых зазоров в тракте основного компрессора от геометрических размеров корпуса и ротора, обеспечивающих получения этих зазоров определяются по формулам:

$$Z_{n,i} = \sum_i^n p_{p,i} - \sum_i^m p_{ст,i} + k - f; \quad (5)$$

$$Z_{z,i} = \sum_i^n p_{ст,i} - \sum_i^m p_{p,i} - k + f, \quad (6)$$

где  $Z_{n,i}$  и  $Z_{z,i}$  – величины переднего и заднего зазора  $i$ -ой ступени компрессора;  $p_{ст,i}$  и  $p_{p,i}$  – длинновые размеры стартерных и роторных деталей, обеспечивающих осевые зазоры в тракте компрессора;  $k$  – толщина компенсатора (кольца, втулки);  $f$  – возможное осевое перемещение ротора при его работе под действием составляющей газовых сил и температурных удлинений;  $n$  и  $m$  – число увеличивающих и уменьшающих звеньев рассматриваемых размерных цепей.

В формулах (5) и (6) значения  $k$  (толщина регулируемого элемента, устанавливаемая у передней опоры компрессора) может быть определена (при минимальном значении переднего осевого зазора первой ступени компрессора заданному техническому условию) по формуле:

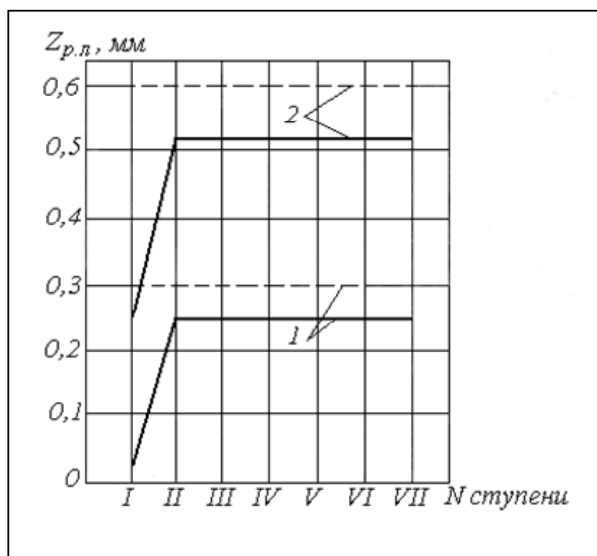
$$k = p_{ст,1} - p_{p,1} + Z_{n,1}, \quad (7)$$

где  $p_{ст,1}$  и  $p_{p,1}$  – длинновые размеры стартерной и роторной деталей, обеспечивающих получение переднего осевого зазора первой ступени компрессора –  $Z_{n,1}$ .

Определения, таким образом, толщина компрессора принимается постоянной для данного компрессора при расчетах величин передних и задних

осевых зазоров в ступенях (долевая увязка компрессора).

Уравнения (5) и (6) следует составлять для каждого типа компрессора с учетом его конструктивного выполнения. При этом следует выполнять следующие условия: число звеньев размерных



**Рис. 2 - Величины радиальных зазоров по торцам рабочих лопаток в ступенях компрессора; по расчету (сплошные линии), по техническим условиям (штриховые линии); 1 и 2 – минимальные и максимальные зазоры соответственно**

должно быть по возможности наименьшим; исходные базы при определении замыкающих звеньев должны быть неизменными.

Нами были рассчитаны величины ожидаемых радиальных зазоров по торцам рабочих лопаток по ступеням компрессора турбохолодильной машины МТХМ1-25 по формулам (2) и (3). Эти же зазоры были замерены с помощью оттисков при проведении макетной сборки компрессора. Хорошая сходимость полученных результатов подтверждает справедливость предлагаемой формулы (4).

На рис. 2 представлено рассмотрению распределение величин радиальных зазоров по торцам рабочих лопаток в ступенях компрессора машины МТХМ1-25, полученных расчетом по формулам (2) и (3) и заданных техническими условиями.

Сопоставление представленных результатов позволяет заключить, что заданный техническими условиями интервал изменения зазоров выше полученного расчетным путем. Следовательно, можно рекомендовать уменьшение верхней границы радиальных зазоров, что должно сказаться на улучшении энергетических показателей компрессора.

### Литература

1. Максимов, В.А. Компрессорное и холодильное машиностроение на современном этапе / В.А. Максимов, А.А. Мифтахов, И.Г. Хисамов // Вестн. Казан. технол. ун-та. – 1998. – №1. – С. 104 -113.
2. Соломенцев, Ю.М. Машиностроение. Энциклопедия: в 40т. / Ю.М. Соломенцев. – М.: Машиностроение, 2001. – Т.5. Технология сборки в машиностроении.– Разд.3. Технология производства машин. – 638 с.
3. Новиков, М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов / М.П. Новиков. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
4. Смирнов, Н.В. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 511с.