

А.П. Харитонов, инж., А.В. Андрианов, к.т.н., Э.В. Сусликов, А.М. Ахметзянов, Г.П. Страхов, инженеры (ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа"), г. Казань, Россия

Радиальные электромагниты активных магнитных подшипников для центробежных компрессоров

Рассмотрены варианты исполнения радиальных электромагнитов активных магнитных подшипников (АМП) для центробежных компрессоров и проведен сравнительный анализ их расчетных характеристик. Показано, что для АМП центробежных компрессоров с диаметром расточки ротора электромагнитов в диапазоне от 90 до 300 мм предпочтительными являются электромагниты с трехполюсными зонами притяжения. Определен ряд унифицированных конструкций магнитопроводов радиальных электромагнитов, включающий три типоразмера пластин с трехполюсными зонами притяжения, целесообразный для применения в шести базовых конструкциях центробежных компрессоров, разрабатываемых в ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа".

Ключевые слова: центробежный компрессор, активный магнитный подвес, радиальный электромагнитный подшипник, электромагнит, магнитопровод.

Розглянуті варіанти виконання радіальних електромагнітів активних магнітних підшипників (АМП) для відцентрових компресорів і проведений порівняльний аналіз їх розрахункових характеристик. Показано, що для АМП відцентрових компресорів з діаметром розточування ротора електромагнітів в діапазоні від 90 до 300 мм переважними є електромагніти з триполюсними зонами тяжіння. Визначений ряд уніфікованих конструкцій магнітопроводів радіальних електромагнітів, що включає три типорозмірів пластин з триполюсними зонами тяжіння, доцільний для застосування в шести базових конструкціях відцентрових компресорів, що розробляються в ЗАТ "НИИтурбокомпресор ім. В.Б.Шнеппа".

Ключові слова: відцентровий компресор, активний магнітний підвіс, радіальний електромагнітний підшипник, електромагніт.

Variants of execution of radial electromagnets of active magnetic bearings (AMB) for centrifugal compressors are considered and the comparative analysis of their design characteristics is carried out. It is shown, that for AMB of centrifugal compressors with bore diameter of the electromagnet rotor in the range from 90 to 300 mm the electromagnets with three-polar zones of attraction are preferable. A number of unified magnetic circuits designs of radial electromagnets, including three standard sizes of plates with three-polar zones of attraction, expedient for application in six basic designs of centrifugal compressors developed in JSC "NIIturbocompressor n.a. V.B.Shneppe" is defined.

Keywords: centrifugal compressor, active magnetic suspension, radial magnetic bearing, electromagnet, magnetic circuit.

Совершенствование конструкции опор и уплотнений вала центробежных машин является актуальным при создании нового компрессорного оборудования [1-3].

В настоящее время в центробежных компрессорах широко применяются, так называемые, активные магнитные подшипники (АМП). Принцип работы АМП основан на регулировании напряженности (индукции) магнитного поля в зазоре электромагнитов, окружающих цилиндрический ротор из ферромагнитного материала так, чтобы обеспечивать удержание ротора в центральном положении.

Эскиз конструкции радиального АМП центробежного нагнетателя НЦ16-76/1.44 газоперекачивающего агрегата ГПА-16 "Волга" приведен на рис. 1.

Несущим силовым органом радиального АМП является электромагнит, содержащий ротор (1) и статор с обмотками (2).

Радиальный электромагнит воспринимает и компенсирует:

- постоянную нагрузку от массы ротора;
- динамические нагрузки из-за остаточного небаланса ротора;
- газодинамические нагрузки из-за окружной неравномерности газового потока.

Кроме электромагнита радиальный АМП содержит датчики радиального положения ротора (3) и радиальный страховочный подшипник (4).

Датчики положения ротора формируют сигналы отклонения ротора от центрального положения для управления токами электромагнитов. Страховочные подшипники предохраняют от повреждения де-

тали ротора нагнетателя при отключении АМП в нерабочих режимах, а также при авариях, связанных с от-

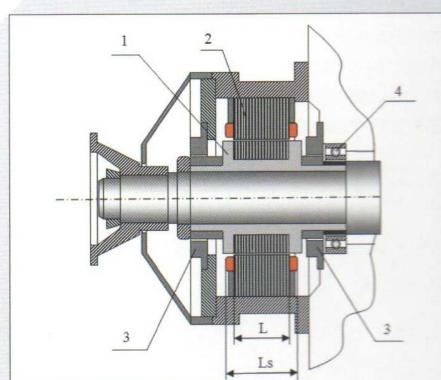


Рис. 1. Конструкция радиального АМП нагнетателя НЦ16-76/1.44: 1 – ротор подшипника; 2 – статор подшипника; 3 – датчики радиального положения ротора; 4 – радиальный страховочный подшипник

казами АМП, обеспечивая при этом выбег ротора на страховочных подшипниках. В нормальных режимах работы страховочные подшипники не нагружены, так как при работе АМП в конструкции подшипника предусматривается гарантированный зазор между ротором нагнетателя и внутренней обоймой страховочного подшипника.

Типичной конструкцией радиальных электромагнитов, разработанных в ФГУП ВНИИЭМ (г. Москва), и используемых в центробежных нагнетателях НЦ16-76/1,44 и НЦ12-56/1,44, разработанных в ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа", является конструкция, приведенная на рис. 2.

Магнитопровод электромагнита 1 выполнен в виде восьмиполюсного пакета листовой электротехнической стали, в пазы которого уложены обмотки возбуждения 2. Соседние пары полюсов с последовательно включенными обмотками образуют четыре зоны притяжения. Две противоположные зоны притяжения образуют ось стабилизации положения ротора в радиальном направлении (Y или Z). Наличие четырех зон притяжения позволяет организовать две взаимно-перпендикулярные оси стабилизации. Для снижения статической нагрузки на верхние зоны притяжения оси стабилизации устанавливаются под углом 45° к вертикальной оси корпуса подшипника.

Конструкции статоров радиальных электромагнитов могут отличаться по количеству полюсов зон притяжения и по схеме включения обмоток, образующих магнитные потоки в зонах притяжения. Следовательно, разные конструкции радиальных электромагнитов отличаются соответствующими геометрическими,

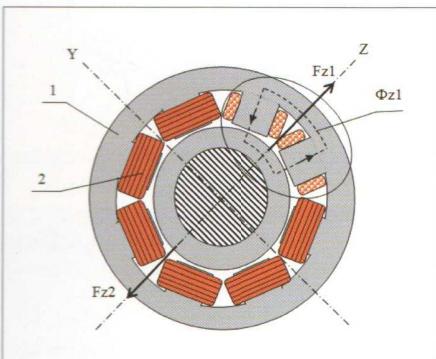


Рис. 2. Электромагнит радиального подшипника

нагрузочными и электрическими характеристиками.

На рис. 3 показан эскиз двухполюсной зоны притяжения радиального электромагнита (ЭМ), а на рис. 4 – варианты многополюсных зон. При пропускании электрического тока через обмотки возбуждения в магнитопроводе создаются замкнутые магнитные потоки Φ , а между полюсами статора и ротором возникают электромагнитные силы притяжения F_1 и F_2 . Результирующая сила F_0 , определяемая как геометрическая сумма векторов F_1 и F_2 , направлена вдоль центральной оси зоны притяжения.

В настоящей статье приведены результаты сопоставления конструкций для определения наиболее рациональных решений при конструировании ряда центробежных компрессоров, разрабатываемых в ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа".

Расчеты конструктивных, нагрузочных и электрических характеристик радиальных ЭМ с различными зонами притяжения осуществлялись по оригинальным

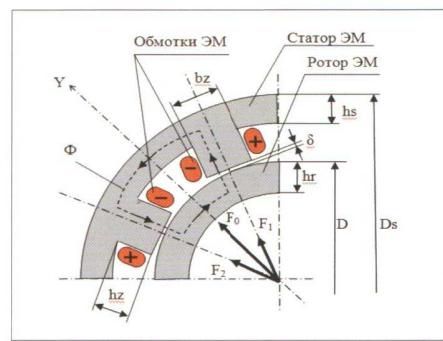


Рис. 3. Эскиз двухполюсной зоны притяжения радиального ЭМ: δ – зазор между полюсом статора и ротором; bz , hz – ширина и высота зубца полюса статора; hs , hr – высота спинки магнитопроводов статора и ротора; D – диаметр расточки поверхности ротора; D_s – внешний диаметр пакета статора

Ф конструция магнитопровода должна по возможности иметь участки с одинаковой площадью сечений. Например, для двухполюсной конструкции зоны ЭМ (рис. 3) это условие равносильно равенству сечений $hs \times L_1$; $hr \times L_1$;

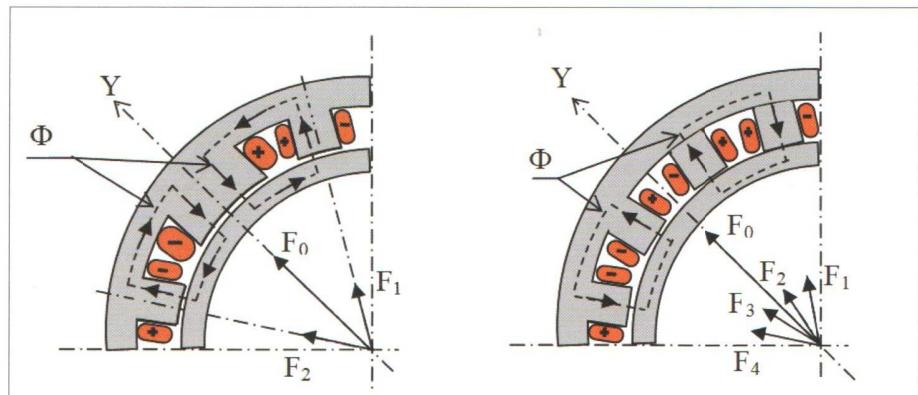


Рис. 4. Трехполюсная Ш-образная (3Ш) и четырехполюсная П-образная (4П) зоны притяжения ЭМ

методикам, разработанным специалистами ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа".

Исходными данными для расчетов ЭМ являются:

- зазоры между статором и ротором верхней и нижней зон ЭМ (δ_1 , δ_2 м);
- начальные токи обмоток верхней и нижней зон ЭМ (I₁₀, I₂₀ A);
- статическая нагрузка от массы ротора (F_{stat} , H);
- марка стали магниопроводов статора и ротора.

С целью равномерного распределения индукции вдоль линии замыкания магнитного потока

$bz \times L_1$, где L_1 – активная толщина пакета стали.

Оптимум конструкции электромагнита при расчете определяется ограничительными критериями (минимум диаметра или длины, минимальными электрическими потерями, минимальным расходом меди, минимальным нагревом элементов электромагнита в рабочих режимах и т.д.) и в общем случае не может быть сформулирован однозначно. В ряде случаев оптимальными могут быть многополюсные конструкции магнитопроводов.

Расчет электромагнитов осуществлялся по методикам, учитывающим нелинейность характеристи-

тик $B(H)$ стали магнитопроводов, путем изменения величин bz и hz до получения максимальной рабочей индукции, например до $Bm(Hm)$ равной 1,25 Т.

В табл. 1 приведены требования к конструктивным характеристикам электромагнитов радиальных подшипников для шести баз корпусов центробежных компрессоров на основе опыта конструирования в ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа".

В табл. 2 приведены сравнительные результаты расчета для шестой базы центробежных компрессоров радиальных электромагнитов с различными схемами зон притяжения, оптимизированных по объему конструкции для значений максимальной индукции потока $Bm=1,25$ Т, коэффициента заполнения паза медью обмотки $Ko=0,5$, плотности тока в обмотках $Ji=3,5$ А/мм².

В табл. 3 приведены сравнительные результаты расчета радиальных электромагнитов для центробежных компрессоров шести базовых корпусов, оптимизированных по осевой длине с учетом вылета обмоток (Ls).

Данные расчетов характеристик ЭМ показывают, что для всех базовых корпусов электромагниты с Ш-образными зонами полюсов обладают более высокими удельными характеристиками при несколько больших потерях электрической мощности в обмотках (по сравнению с восьмиполюсной конструкцией МП).

Следует отметить, что потери в стали ротора от перемагничивания (поз. 11 табл. 3) зависят от частоты вращения ротора, от массы пакета стали ротора, от марки и толщины листов электротехнической стали, от величины индукции в зазоре ЭМ, поэтому расчет потерь в стали ротора должен осуществляться для конкретных режимов работы подшипника. Примечательно, что потери в стали ротора от перемагничивания обычно существенно больше потерь в обмотках статора (поз. 10 табл. 3) и компенсируются соответствующим отбором механической мощности от приводного двигателя компрессора. При этом потери в стали ротора не отражаются в потребляемой мощности АМП.

В конструкциях АМП, как правило, необходимо предусматривать принудительное охлаждение

ротора, чтобы исключить перегрев конструкции, связанный с потерями от перемагничивания стали.

С целью унификации магнитопроводов статоров ЭМ для центробежных компрессоров, разрабатываемых в ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа", могут быть рекомендованы три типоразмера пластин с Ш-образными зонами, которые в

рамках ряда базовых корпусов центробежных компрессоров отличаются толщиной пакета электротехнической стали.

Расчетные размеры унифицированного ряда приведены в табл. 4.

Выводы

1. На основе анализа расчетных характеристик оптимизированных по объему радиальных электромаг-

Таблица 1. Конструктивные характеристики электромагнитов

Номер базового корпуса ЦК	1	2	3	4	5	6
1. Максимальная несущая сила ЭМ, Н	1000	2000	3000	4000	7000	12000
2. Диаметр шейки вала d , не менее, мм	45	55	65	75	95	135
3. Внешний диаметр статора D_s , не более, мм	250	270	310	350	500	550
4. Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , не более, мм	100	110	120	160	170	300

Таблица 2. Расчетные данные подшипников центробежного компрессора шестой базы

1. Число полюсов p и схема зоны притяжения	2 П	4 П	3 Ш	6 Ш
2. Диаметр расточки ротора D , мм	275	190	190	190
3. Зазор между полюсами статора и ротором δ , мм	0,75	0,75	0,75	0,75
4. Внешний диаметр статора D_s , мм	447	316	322	328
5. Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , мм	194	253	214	209
6. Объем, занимаемый ЭМ V_s , дм ³	30	20	17	18
7. Масса пакета ротора, кг	43,5	17,85	17,34	12,1
8. Максимальная несущая сила ЭМ $F_{\text{эм}}$, Н	14000	14000	14000	14000
9. Максимальная электрическая мощность потерь в обмотках ЭМ, Вт	94	182	126	157
10. Относительные потери в стали ротора, связанные с перемагничиванием	1	0,41	0,4	0,492
11. Ширина полюса статора b_z , мм	65	20	24	16
12. Высота полюса статора h_z , мм	20,5	42	18	14

Таблица 3. Конструктивные характеристики электромагнитов

Номер базового корпуса ЦК	1	2	3	4	5	6
1. Число полюсов p и схема зоны притяжения	2П /3Ш	2П /3Ш	2П /3Ш	2П /3Ш	2П /3Ш	2П /3Ш
2. Диаметр расточки ротора D , мм	90 / 90	120/100	160/100	150/120	275/200	275/200
3. Зазор между полюсами статора и ротором δ , мм	0,5	0,5	0,6	0,6	0,75	0,75
4. Внешний диаметр статора D_s , мм	181/192	217/208	267/220	255/232	433/330	447/322
5. Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , мм	78/63	106/95	128/120	167/157	167/155	194/214
6. Объем, занимаемый ЭМ V_s , дм ³	1,99/1,8	3,9/3,2	7,1/5,0	8,6/6,7	25/13	30/17
7. Масса ротора ЭМ, кг	1,7/0,92	4,8/2	8,3/2,9	10,8/4,8	31,9/13	43,5/18
9. Максимальная несущая сила ЭМ $F_{ЭМ}$, Н	1000	2000	3000	4000	7000	12000
10. Максимальная электрическая мощность потерь в обмотках ЭМ, Вт	23/28	32/39	46/58	56/72	83/98	84/132
11. Относительные потери в стали ротора от перемагничивания	1/0,54	1/0,42	1/0,35	1/0,44	1/0,41	1/0,4
12. Ширина полюса статора b_z , мм	18/10	25/12	32/12	30/14	60/25	65/24
13. Высота полюса статора h_z , мм	27/40	23/10	21/42	22/42	18,5/40	20,5/42

Таблица 4. Расчетные размеры унифицированного ряда подшипников

Номер базового корпуса ЦК	1	2	3	4	5	6
1. Диаметр расточки ротора D , мм	100	100	120	120	200	200
2. Зазор между полюсами статора и ротором δ , мм	0,5	0,5	0,6	0,6	0,75	0,75
3. Внешний диаметр статора D_s , мм	210	210	245	245	335	335
4. Длина пакета статора ЭМ L , мм	45	70	85	110	110	190
5. Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , мм	70	100	120	150	160	255
6. Ширина полюса статора b_z , мм	12	12	15	15	25	25
7. Высота полюса статора h_z , мм	42	42	45	45	40	40
8. Масса ротора ЭМ, кг	2,5	3,4	5,9	6,6	23,5	28,5
9. Максимальная несущая сила ЭМ $F_{ЭМ}$, Н	1400	2200	3200	4200	7200	12700
10. Максимальная электрическая мощность потерь в обмотках ЭМ, Вт	30	40	56	68	100	148

ников с двухполюсными и много-полюсными зонами притяжения установлено, что для АМП центробежных компрессоров с диаметром расточки ротора ЭМ в диапазоне от 90 до 300 мм предпочтительными являются электромагниты с трехполюсными Ш-образными зонами притяжения.

2. Определен ряд унифицированных конструкций магнитопроводов радиальных ЭМ, включающий три типоразмера пластин с Ш-образными зонами притяжения, целесообразный для применения в шести

базовых конструкциях центробежных компрессоров, разрабатываемых в ЗАО "НИИтурбокомпрессор им. В.Б.Шнеппа".

Список литературы:

1. Баткис Г.С. Разработка и внедрение «сухих» газодинамических уплотнений для центробежных компрессорных машин / Г.С. Баткис, В.К. Хасайнов, Е.А. Новиков, Н.М. Лившиц // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2008. – №3(13).– С.50 -54.

2. Бухолдин Ю.С. Опыт создания и эксплуатации турбоком-

прессора с магнитным подвесом ротора / Ю.С. Бухолдин, В.С. Королев, В.Г. Панченко, А.В. Чернышов, В.И. Данилейко, А.П. Сарычев, А.В. Носков // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2008. – №4(14).– С.17 -19.

3. Мартыненко Г.Ю. Оценка возможности применения опор на постоянных магнита для ротора датандер-компрессорного агрегата / Г.Ю. Мартыненко, В.А. Левашов, Ю.С. Бухолдин // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2012. – №4(30).– С.43-45.