

Радиальный электромагнит как элемент системы активного магнитного подвеса

А.П. Харитонов, А.В. Андрианов, Э.В. Сусликов, А.М. Ахметзянов, Г.П. Страхов

(ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»)

Рассмотрены варианты исполнения радиальных электромагнитов активных магнитных подшипников для центробежных компрессоров и проведен сравнительный анализ их расчетных характеристик. Показано, что для активных магнитных подшипников 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.

Radial electromagnet as an element of the magnetic dropper

A.P. Kharitonov, A.V. Andrianov, E.V. Suslikov, F.M. Akhmetzyanov, G.P. Strakhov

Variants of execution of radial electromagnets of active magnetic bearings for centrifugal compressors are considered and the comparative analysis of their design characteristics is carried out. It is shown, that for active magnetic bearings 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 «NIIturbo-compressor n.a. V.B. Shnep» is defined.

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

На современном этапе развития компрессоростроения все более актуальными становятся задачи снижения механических потерь в опорно-упорных и уплотнительных узлах и обеспечения безотказности их работы.

Наиболее радикальным и перспективным направлением повышения эффективности центробежных компрессоров является применение подшипников, обладающих способностью длительно и устойчиво работать в любой среде без смазки и трения при незначительном потреблении энергии.

В настоящее время такими подшипниками для центробежных компрессоров являются 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 органам 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 детали ротора нагнетателя при отключении АМП в нерабочих режимах, а также при авариях, связанных с отказами АМП, обеспечивая при этом выбег ротора на страховочных подшипниках. В нормальных режимах работы стра-

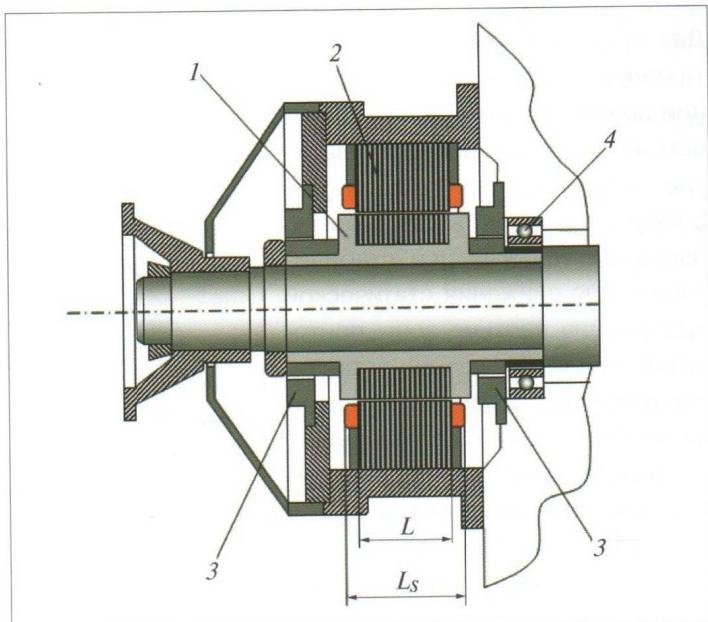


Рис. 1. Конструкция радиального АМП нагнетателя НЦ16-76/1.44

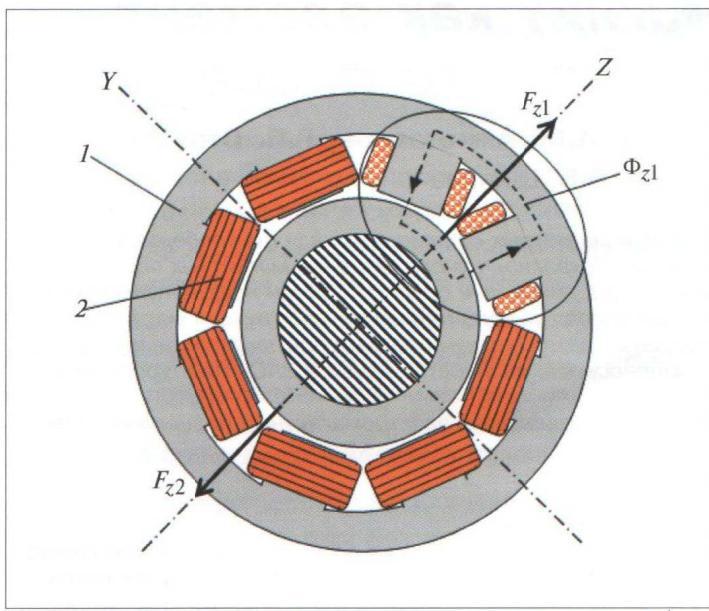


Рис. 2. Электромагнит радиального подшипника

ховочные 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 (Москва) и используемых в центробежных нагнетателях НЦ16-76/1,44 и НЦ12-56/1,44, созданных 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 числу полюсов зон притяжения и по схеме включения обмоток, образующих магнитные потоки в зонах притяжения, поэ-

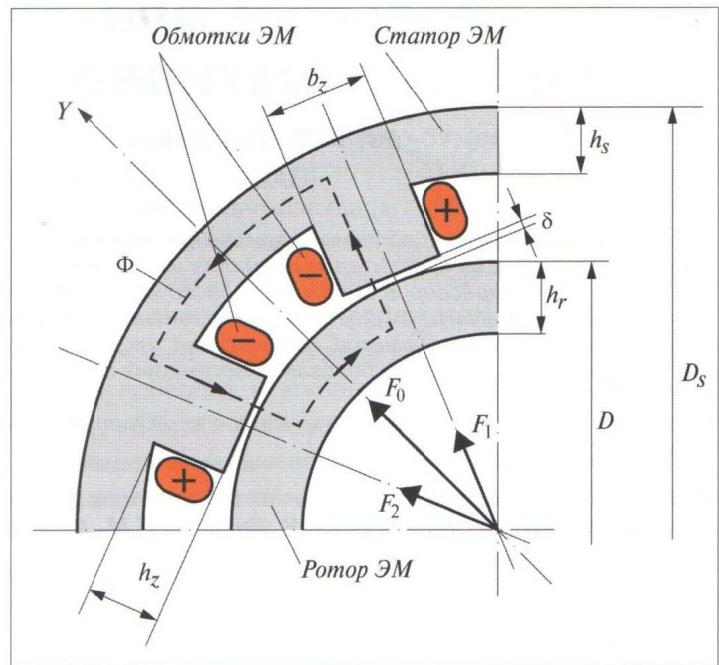


Рис. 3. Эскиз двухполюсной зоны притяжения радиального ЭМ:

δ – зазор между полюсом статора и ротором; b_z , h_z – соответственно ширина и высота зубца полюса статора; h_s , h_r – высота спинки магнитопроводов соответственно статора и ротора; D – диаметр расточки поверхности ротора; D_s – внешний диаметр пакета статора

тому разные конструкции радиальных электромагнитов могут различаться соответствующими геометрическими, нагрузочными и электрическими параметрами.

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 элек-

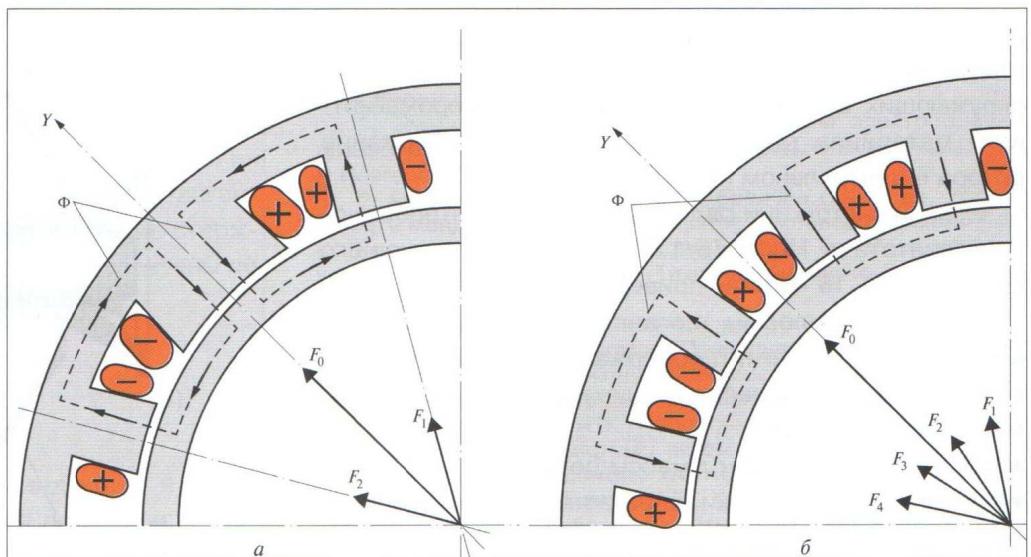


Рис. 4. Трехполюсная (а) Ш-образная (3Ш) и четырехполюсная (б) П-образная (4П) зоны притяжения ЭМ

Таблица 1

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

Таблица 2

Параметр	Число полюсов p и схема зоны притяжения			
	2 П	4 П	3 Ш	6 Ш
Диаметр расточки ротора D , мм	275	190	190	190
Зазор между полюсами статора и ротором δ , мм	0,75	0,75	0,75	0,75
Внешний диаметр статора D_s , мм	447	316	322	328
Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , мм	194	253	214	209
Объем, занимаемый ЭМ V_s , дм ³	30	20	17	18
Масса пакета ротора, кг	43,5	17,85	17,34	12,1
Максимальная несущая сила ЭМ $F_{\text{ЭМ}}$, Н	14 000	14 000	14 000	14 000
Максимальная электрическая мощность потерь в обмотках ЭМ, Вт	94	182	126	157
Относительные потери в стали ротора, связанные с перемагничиванием	1	0,41	0,4	0,492
Ширина полюса статора b_z , мм	65	20	24	16
Высота полюса статора h_z , мм	20,5	42	18	14

медию обмотки $K_0 = 0,5$, плотности тока в обмотках $J_i = 3,5 \text{ А/мм}^2$.

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

Данные расчетов параметров 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).

Отметим, что потери в стали ротора от перемагничивания зависят от частоты вращения ротора, массы пакета стали ротора, марки и толщины листов электротехнической стали, величины индукции в зазоре ЭМ.

тромагнитные 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 (с целью определения наиболее рациональных) для ряда центробежных компрессоров (ЦК), разрабатываемых в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа».

Расчеты конструктивных, нагрузочных и электрических характеристик радиальных ЭМ с различными зонами притяжения осуществляли по оригинальным 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);
- начальные токи обмоток верхней и нижней зон ЭМ (I_{10}, I_{20});
- статическая нагрузка от массы ротора (F_{stat});
- марка стали магнитопроводов статора и ротора.

С целью равномерного распределения индукции вдоль линии замыкания магнитного потока Φ конструкция магнитопровода должна по возможности иметь участки с сечениями одинаковой площади. Например, для двухполюсной конструкции зоны ЭМ (см. рис. 3) это условие равносильно равенству сечений $h_s \times L_1; h_r \times L_1; b_z \times L_1$, где L_1 – активная толщина пакета стали.

Оптимум конструкции электромагнита при расчете определяется ограничительными критериями (минимум диаметра или длины, минимальные электрические потери, минимальный расход меди, минимальный нагрев элементов электромагнита в рабочих режимах и др.) и в общем случае не может быть сформулирован однозначно. В ряде случаев оптимальными могут быть многополюсные конструкции магнитопроводов.

Расчет электромагнитов осуществляли по методикам, учитывающим нелинейность характеристик $B(H)$ стали магнитопроводов, путем изменения величин b_z и h_z до получения максимальной рабочей индукции, например до $B_m(H_m) = 1,25 \text{ Т}$.

В табл. 1 приведены требования к конструктивным параметрам 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 $B_m = 1,25 \text{ Т}$, коэффициента заполнения паза



Таблица 3

Параметр	Номер базового корпуса ЦК					
	1	2	3	4	5	6
Число полюсов и схема зоны притяжения	2П/3Ш	2П/3Ш	2П/3Ш	2П/3Ш	2П/3Ш	2П/3Ш
Диаметр расточки ротора D , мм	90/90	120/100	160/100	150/120	275/200	275/200
Зазор между полюсами статора и ротором δ , мм	0,5	0,5	0,6	0,6	0,75	0,75
Внешний диаметр статора D_s , мм	181/192	217/208	267/220	255/232	433/330	447/322
Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , мм	78/63	106/95	128/120	167/157	167/155	194/214
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
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
Максимальная несущая сила ЭМ $F_{\text{эм}}$, Н	1 000	2 000	3 000	4 000	7 000	12 000
Максимальная электрическая мощность потерь в обмотках ЭМ, Вт	23/28	32/39	46/58	56/72	83/98	84/132
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
Ширина полюса статора b_z , мм	18/10	25/12	32/12	30/14	60/25	65/24
Высота полюса статора h_z , мм	27/40	23/10	21/42	22/42	18,5/40	20,5/42

Поэтому расчет потерь в стали ротора должен осуществляться для конкретных режимов работы подшипника. Отметим также, что потери в стали ротора от перемагничивания обычно существенно больше потерь в обмотках статора 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 различаются толщиной пакета электротехнической стали.

Расчетные размеры унифицированного ряда приведены в табл. 4.

Расчет тяговой характеристики осуществляется после выбора максимального значения рабочего тока и определения числа витков обмоток возбуждения w . Максимальный ток обмоток возбуждения определяется возможностями выходных каскадов усилителей мощности блока управления АМП.

Для расчета статической тяговой характеристики должны быть заданы:

- статическая составляющая силы от массы ротора F_{stat} ;
- активная толщина пакета статора L_1 ;
- зазоры между статором и ротором верхней и нижней зон ЭМ (δ_1, δ_2);

- начальные токи обмоток верхней и нижней зон ЭМ (I_{10}, I_{20}).

Процедура расчета тяговой характеристики предполагает пошаговое решение уравнения, отражающего магнитное состояние магнитопроводов верхней и нижней зон электромагнитов при заданных значениях токов в обмотках возбуждения для каждого замкнутого контура магнитного потока, с определением на каждом шаге индукции в зазоре $B_1(H_1)$.

Электромагнитная сила притяжения как результат электромагнитного взаимодействия статора ЭМ и ротора, вызванного рассматриваемым контуром магнитного потока, определяется соотношением

$$F_1 = B_1(H_1)^2 \frac{S_{\text{cl}}}{\mu_0},$$

где S_{cl} – площадь сечения участка в зазоре, через который замыкается рассматриваемый магнитный поток.

Расчет результирующей тяговой силы ЭМ производили по аналогичным соотношениям для каждого контура магнитных потоков с учетом направления действия сил притяжения.

В качестве расчетного примера рассмотрен радиальный электромагнит с двухполюсными зонами и размерами $D_s = 475$ мм; $d = 135$ мм; $L_1 = 120$ мм; $\delta = 0,75$ мм и статической нагрузкой $F_{\text{stat}} = 5\ 000$ Н.

Покажем, что выбор начальных значений токов I_{10} и I_{20} верхней и нижней зон ЭМ определяет линейность результирующей тяговой характеристики ЭМ.

На рис. 5 показаны расчетные тяговые характеристики радиального ЭМ при разных настройках начального тока.



Таблица 4

Параметр	Номер базового корпуса ЦК					
	1	2	3	4	5	6
Диаметр расточки ротора D , мм	100	100	120	120	200	200
Зазор между полюсами статора и ротором δ , мм	0,5	0,5	0,6	0,6	0,75	0,75
Внешний диаметр статора D_s , мм	210	210	245	245	335	335
Длина пакета статора ЭМ L , мм	45	70	85	110	110	190
Длина ЭМ с учетом вылета обмоток L_s , мм	70	100	120	150	160	255
Ширина полюса статора b_z , мм	12	12	15	15	25	25
Высота полюса статора h_z , мм	42	42	45	45	40	40
Масса ротора ЭМ, кг	2,5	3,4	5,9	6,6	23,5	28,5
Максимальная несущая сила ЭМ $F_{\text{эм}}$, Н	1 400	2 200	3 200	4 200	7 200	12 700
Максимальная электрическая мощность потерь в обмотках ЭМ, Вт	30	40	56	68	100	148

Из сравнения характеристик видно, что введение начальных токов делает статическую тяговую характеристику линейной в диапазоне малых разностей токов верхней и нижней зон притяжения ЭМ.

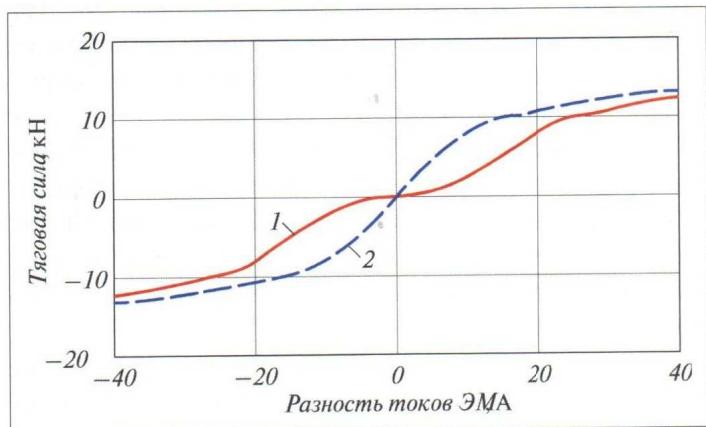


Рис. 5. Результирующие тяговые характеристики радиального ЭМ при $F_{\text{stat}} = 0$ и при $I_{10} = I_{20} = 0$ (кривая 1) и $I_{10} = I_{20} = 5$ А (кривая 2)

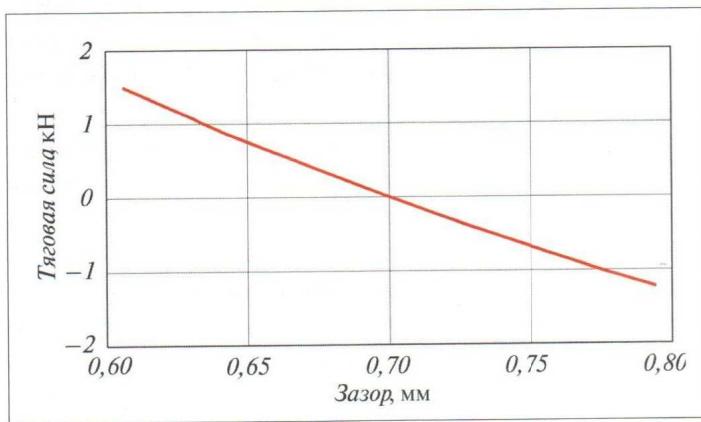


Рис. 6. График изменения тяговой силы ЭМ при $I_{10} = 7,65$ А, $I_{20} = 2,35$ А, $F_{\text{stat}} = 5$ 000 Н при изменении зазора

При расчетах динамики роторной системы ЦК важными характеристиками электромагнитов являются коэффициенты чувствительности тяговой характеристики к изменению тока ЭМ и зазоров при регулировании. Коэффициент чувствительности к изменению тока легко определяется крутизной тяговой характеристики в точке, соответствующей рабочему режиму ЭМ (см. рис. 5).

На рис. 6 приведена зависимость изменения тяговой силы электромагнитов одной из осей стабилизации как функции изменения зазора δ_1 , рассчитанной для рабочего режима с нагрузкой $F_{\text{stat}} = 5$ 000 Н и токами $I_{10} = 7,65$ А, $I_{20} = 2,35$ А, крутизна которой определяет коэффициент чувствительности к изменению зазора.

Таким образом, на основе анализа расчетных характеристик оптимизированных по объему радиальных элекромагнитов с двухполюсными и многополюсными зонами притяжения установлено, что для АМП центробежных компрессоров с диаметром расточки ротора ЭМ в диапазоне 90...300 мм предпочтительными являются электромагниты с трехполюсными Ш-образными зонами притяжения.

Определен ряд унифицированных конструкций магнитопроводов радиальных ЭМ, включающий три типоразмера пластин с Ш-образными зонами притяжения, целесообразный для применения в шести базовых конструкциях ЦК, разрабатываемых в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа».

На основе расчетов тяговых характеристик радиальных ЭМ предложен уточненный метод определения коэффициентов чувствительности к изменению тока ЭМ и зазоров при регулировании, используемых при расчетах динамики роторных систем с АМП.