

УДК 621.313

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ С МАССИВНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

В. П. Верещагин, И. В. Гурова, А. З. Емельянов,
А. В. Рогоза, Н. Н. Смирнов, А. А. Михаленко

Рассмотрены вопросы экспериментального определения электрических параметров осевых электромагнитных подшипников двух типов с массивными магнитопроводами, которые применяются в газоперекачивающих агрегатах. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью устранения в системе управления электромагнитными подшипниками негативного влияния на динамические свойства вихревых токов, возникающих в массивном магнитопроводе. Представлены данные электрических измерений и расчёта комплексных сопротивлений массивных магнитопроводов при различных частотах напряжения питания. Получены расчётные значения параметров массивных магнитопроводов и аппроксимирующие зависимости, характеризующие их изменение от частоты питания. Эти данные могут представлять интерес как при моделировании процессов, протекающих в самих электромагнитах, так и в системах управления с применением вычислителя магнитного потока. Рассмотренные результаты и выводы соответствуют основным положениям и закономерностям, существующим в электромеханике.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, массивный магнитопровод, схема замещения, комплексное сопротивление магнитопровода, расчётные формулы.

В соответствии с существующими научными планами в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» проводятся работы по улучшению динамических свойств систем электромагнитных подшипников. Вместе с тем, многие вопросы требуют проведения сложных экспериментальных исследований. К таким вопросам относится учёт влияния вихревых токов, возникающих в массивном магнитопроводе электромагнита, на его динамические свойства.

В связи с этим актуальным является исследование по экспериментальному определению параметров осевых электромагнитных подшипников (ОМП) для газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Следует отметить, что в ГПА, имеющем мощность 16 МВт (ГПА-16), максимальная осевая нагрузка достигает 4 тонн, а в 25 МВт ГПА (ГПА-25) – 7 тонн.

В состав ОМП входят два осевых электромагнита торцевого типа с «П»-образной магнитной системой, в пазу которой располагается кольцевая обмотка возбуждения. Основные технические данные двух типов ОМП, для ГПА-16 и ГПА-25, полученные в результате экспериментального исследования, приведены в табл. 1.

Общий вид осевого электромагнита с поднятым диском ротора показан на рис. 1.

В этих ГПА сердечники ОМП выполнены массивными из стали 10880 (ГОСТ 11036 – 75 «Сталь сортовая электротехническая нелегированная»).

Экспериментальное исследование ОМП является одним из этапов решения комплексной задачи разработки системы управления магнитным подвесом ротора ГПА.

Далее рассмотрим вопросы по идентификации параметров ОМП. Тяговое усилие, создаваемое ОМП, в значительной степени зависит от вихревых токов массивного магнитопровода ОМП. Эти параметры нелинейно изменяются с частотой питающего напряжения, что затрудняет прямое применение традиционных подходов для расчёта тяговых усилий.

В связи с этим требуется, кроме измерения основных электрических параметров ОМП, провести специальные расчёты, позволяющие вычислить параметры, характеризующие влияние вихревых токов магнитопровода ОМП.

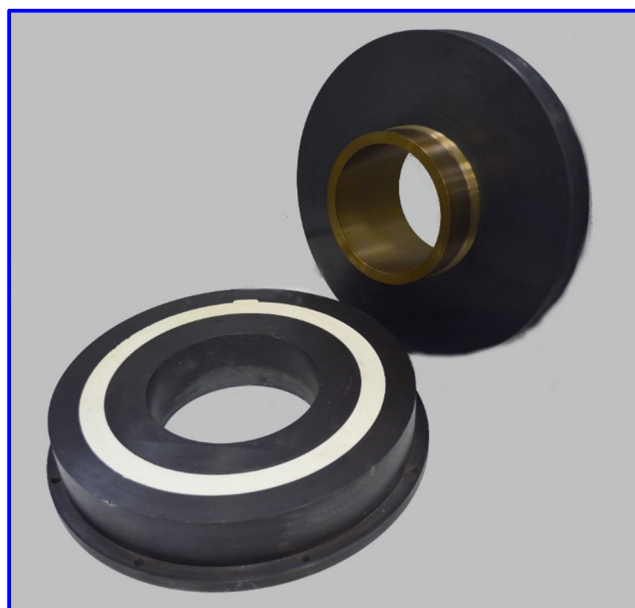


Рис. 1. Общий вид осевого электромагнита

Таблица 1

Основные технические данные ОМП

	ОМП-4 для ГПА-16	ОМП-7 для ГПА-25
Максимальная нагрузка, кН	40	70
Внешний диаметр, мм	440	440
Внутренний диаметр, мм	275	192
Высота магнитопровода, мм	62	90
Зазор между статором и диском, мм	1, 0	1, 0
Число витков обмотки	200	152

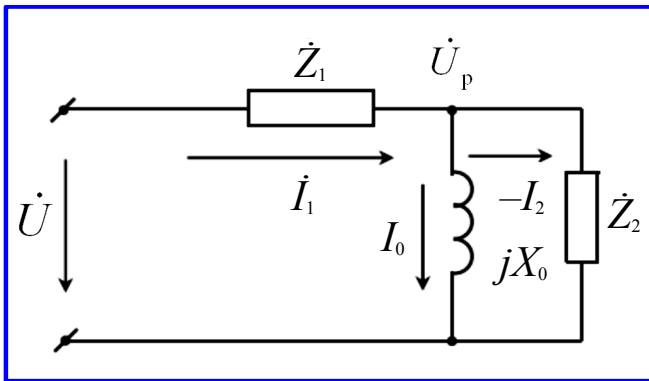


Рис. 2. Схема замещения ОМП

При проведении исследований использованы основные положения и подходы, применяемые при анализе электрических машин с массивным ротором и изложенные в [1]. Кроме того, некоторые данные предварительных экспериментальных исследований ОМП, проведённых в АО «Корпорация «ВНИИЭМ», изложенные в [2] и [3], могут представлять интерес при рассмотрении данной статьи.

На основании представленных в этих источниках данных для описания и исследования ОМП, с достаточной для практических целей точностью, можно воспользоваться «Т»-образной схемой замещения, показанной на рис. 2.

Особенность этой схемы состоит в том, что комплексное сопротивление обмотки \dot{Z}_1 частично обусловлено потоками рассеяния, замыкающимися по массивному магнитопроводу ОМП.

Индуктивное сопротивление jX_0 , соответствующее магнитному потоку в зазоре между статором и ротором ОМП, включено в схеме параллельно с комплексным сопротивлением \dot{Z}_2 , характеризующим потери в массивном магнитопроводе. Закономерность изменения этого сопротивления от частоты напряжения питания \dot{U} является в общем виде сложной функцией. В первом приближении без учёта насыщения материала магнитопровода в соответствии с существующими в электромеханике подходами, эту зависимость упрощённо можно принять в виде нелинейной функции следующего вида:

$$\dot{Z}_2 = \dot{Z}_{21} f^{0,5}, \quad (1)$$

где f – частота питания; \dot{Z}_{21} – комплексное единичное сопротивление магнитопровода при $f = 1$ Гц.

Кроме того, соотношение между активной R_2 и реактивной X_2 составляющими в широком частотном диапазоне изменения f можно считать примерно постоянным и равным 0,6, т. е.

$$X_2/R_2 = 0,6. \quad (2)$$

Целью данной статьи являются экспериментальные исследования ОМП по определению параметров схемы замещения и закономерностей их изменения с частотой напряжения питания.

При определении параметров рассматриваемой схемы замещения базовыми электрическими значениями являются величина и фаза общего тока \dot{I}_1 , потребляемого обмоткой ОМП и напряжения на разветвлении схемы \dot{U}_p . Причём, для измерения этого напряжения используется дополнительная катушка, расположенная в зазоре между статором и ротором концентрично с основной обмоткой ОМП. Измерения проводились при частотах f напряжения питания 50, 200, 400 и 500 Гц. Величина напряжения питания устанавливалась 50 В при всех частотах для удобства сравнения между измеряемыми величинами.

Для возможности разделения параметров цепей разветвления схемы замещения рис. 2 проводилось экспериментальное определение величины индуктивности L_0 , соответствующей магнитному потоку в зазоре между статором и ротором ОМП. Сравнивались результаты измерения двумя способами: по переходным характеристикам нарастания тока \dot{I}_1 в обмотке и по показаниям микроверметра, подключаемого к упомянутой измерительной катушке. Получены практически совпадающие значения $L_0 = 0,7$ Гн – для ОМП с максимальной нагрузкой до 4 тонн и $L_0 = 0,65$ Гн – до 7 тонн.

Результаты, полученные при электрических измерениях для ОМП-4 и ОМП-7, представлены соответственно в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Данные измерений электрических величин ОМП-4

Частота f , Гц	50	200	400	500
Ток обмотки \dot{I}_1 , А	0,57	0,3	0,23	0,2
Фаза тока \dot{I}_1 , α , град.	-44,7	-37,5	-36,8	-36,0
Напряжение разветвления \dot{U}_p , В	46,8	46	45,1	44,3
Фаза \dot{U}_p , φ , град.	0	-1,6	-2,1	-2,3

Таблица 3

Данные измерений электрических величин ОМП-7

Частота f , Гц	50	200	400	500
Ток обмотки \dot{I}_1 , А	1,41	0,64	0,47	0,424
Фаза тока \dot{I}_1 , α , град.	-38,0	-37,1	-35,9	-35,0
Напряжение разветвления \dot{U}_p , В	46,9	46,4	45,8	45,3
Фаза \dot{U}_p , φ , град.	0	-1,8	-2,3	-2,5

Исходя из представленных данных электрических измерений, определялись основные параметры схемы замещения ОМП.

Общее комплексное сопротивление схемы замещения ОМП Z находилось из соотношения следующего вида:

$$\dot{Z} = R + jX = \frac{U(\cos \alpha - j \sin \alpha)}{I_1}, \quad (3)$$

где α – угол сдвига между \dot{U} и \dot{I}_1 (см. табл. 2 и 3), U и I_1 – модули \dot{U} и \dot{I}_1 .

Для расчёта собственного сопротивления обмотки Z_1 , включающего активное сопротивление и реактивное сопротивление, соответствующее магнитному потоку рассеяния, воспользуемся комплексным значением падения напряжения $\Delta \dot{U}$, которое можно получить из соотношения следующего вида:

$$\Delta \dot{U} = U - U_p(\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (4)$$

где φ – угол сдвига между \dot{U} и \dot{U}_p (см. табл. 2 и 3).

Полученное значение $\Delta \dot{U}$ в соответствии с общим уравнением

$$\dot{Z}_1 = R_1 + jX_1 = \Delta \dot{U} / \dot{I}_1 \quad (5)$$

позволяет определить активную R_1 и реактивную X_1 составляющие.

В результате преобразования уравнения (5) с учётом выражений (3) и (4) получаем расчётные выражения для составляющих в следующем виде:

$$R_1 = \frac{U \cos \alpha - U_p \cos(\alpha - \varphi)}{I_1}; \quad (6)$$

$$X_1 = \frac{-U \sin \alpha + U_p \sin(\alpha - \varphi)}{I_1}. \quad (7)$$

Полученные из уравнений (3), (6), (7) значения сопротивлений позволяют рассчитать комплексное сопротивление разветвления:

$$\dot{Z}_p = \dot{Z} - \dot{Z}_1 = R_p + jX_p. \quad (8)$$

С другой стороны, из схемы замещения на рис. 2 следует:

$$\dot{Z}_p = \frac{R_2 X_0^2 + j[X_0 R_2^2 + (X_0 + X_2)X_0 X_2]}{R_2^2 + (X_0 + X_2)^2}, \quad (9)$$

где $X_0 = 2\pi f L_0$.

Соотношение между мнимой и вещественной частями уравнения (9) соответствует отношению X_p/R_p уравнения (8), которое определяется по результатам электрических измерений. Если известно соотношение $K_p = X_p/R_p$ и принять обозначения $K = X_2/R_2$, а коэффициент коррекции $K_{k1} = R_2/X_0$, $K_{k2} = X_2/X_0$, то получим искомое расчётное соотношение в следующем виде:

$$K_p = K(1 + K_{k2}) + K_{k1}. \quad (10)$$

Следовательно, для расчёта значения K , характеризующего соотношение X_2/R_2 , кроме K_p необходимо знать значения корректирующих коэффициентов K_{k1} и K_{k2} . Поскольку с ростом частоты питания f значение $X_0 \rightarrow \infty$, то величины корректирующих коэффициентов, соответственно, стремятся к

нулю, т. е. K_{k1} и $K_{k2} \rightarrow 0$. Для рассматриваемых ОМП при изменении частот от 50 до 500 Гц эти коэффициенты, судя по значениям X_p и R_p , изменяются от 0,3 до 0,1.

Мониторинг взаимного изменения корректирующих коэффициентов K_{k1} , K_{k2} и $K_{k1p} = R_p/X_0$, $K_{k2p} = R_p/X_0$ с учётом закономерностей влияния изменений частоты питания f в рассматриваемом диапазоне показывает, что могут быть установлены приближённые эмпирические зависимости, связывающие эти коэффициенты. Поскольку разница в значениях X_p и X_2 обычно не превышает 25% для каждой частоты f , то нужно принять:

$$K_{k2} \cong K_{k2p}. \quad (11)$$

Сложнее получить соотношение между K_{k1} и K_{k1p} . Если вернуться к уравнению (9), то для расчёта активного сопротивления R_2 в рассматриваемом диапазоне частот можно воспользоваться упрощённым выражением следующего вида:

$$R_2 \cong R_p (1 + 2K_{k2}). \quad (12)$$

Преобразование уравнения (12) с учётом (11) позволяет получить выражение для расчёта K_{k1} следующего вида:

$$K_{k1} = K_{k1p} (1 + 2K_{k2p}). \quad (13)$$

В результате подстановки (11) и (13) в (10) получим уравнения, позволяющие по значениям R_p и X_p определить коэффициент, соответствующий R_2 и X_2 :

$$K = \frac{K_p - K_{k1p} (1 + 2K_{k2p})}{1 + K_{k2p}}. \quad (14)$$

и рассчитать величины R_2 и X_2 :

$$R_2 = R_p (1 + 2K_{k2p}); \quad (15)$$

$$X_2 = KR_2. \quad (16)$$

При использовании данных электрических измерений и указанных расчётных соотношений, определены параметры схем замещения для ОМП, которые сведены в табл. 4 и 5 соответственно для ОМП-4 и ОМП-7.

По результатам анализа и сравнения данных по ОМП, представленных в табл. 4 и 5, могут быть отмечены следующие характерные закономерности изменения параметров схемы замещения от частоты питающего напряжения.

Во-первых, в диапазоне рассматриваемых частот от 50 до 500 Гц величина активного R_2 и реактивного X_2 сопротивлений магнитопровода растут пропорционально корню квадратному из частоты. Такой характер изменения комплексного сопротивления массивного магнитопровода от частоты питания соответствует принятому для массивного ротора асинхронной машины [1] и может быть использован для ОМП. Причём, параметры магнитопровода составляют основную часть общего сопротивления схемы замещения и определяют энергопотребление на высоких частотах рабочего диапазона. Для расчётного определения параметров магнитопровода можно воспользоваться уравнением (1), в котором величины сопротивлений R_{21} и X_{21} соответствуют среднему значению, полученному для различных частот питания каждого типа ОМП из табл. 4 и 5. Следует отметить, что разброс параметров при такой оценке не превышает 10% от среднего значения.

Во-вторых, характерной особенностью параметров магнитопровода является постоянство соотношения X_2/R_2 , которое по данным табл. 4 и 5, для различных частот питания рассматриваемого диапазона составляет около 0,6. Это свойство учтено при выводе расчётных уравнений (15) и (16). Вместе с тем, при частоте питания 500 Гц соотношение $X_2/R_2 \cong 0,6$, что свидетельствует о соответствии этого соотношения для выбранного материала магнитопровода ОМП при работе на высоких частотах.

Таблица 4

Результаты расчёта параметров схемы замещения ОМП-4

Частота питания f , Гц		50	200	400	500
Общее сопротивление \dot{Z} , Ом	R	62,3	131,7	173,9	202,5
	X	61,4	101,7	130,4	145
Сопротивление обмотки \dot{Z}_1 , Ом	R_1	4,8	7,3	13,0	18,5
	X_1	3,9	11,2	18,7	25,5
Сопротивление разветвления \dot{Z}_p , Ом	R_p	57,5	124,4	160,9	184
	X_p	57,5	90,5	111,7	119,5
Сопротивление магнитопровода \dot{Z}_2 , Ом	R_2	86,25	149,3	180,2	202,4
	X_2	47,4	79,1	104,5	109,3

Таблица 5

Результаты расчёта параметров схемы замещения ОМП-7

Частота питания f , Гц		50	200	400	500
Общее сопротивление \dot{Z} , Ом	R	28,0	62,5	86,2	96,7
	X	21,6	46,9	62,8	67,2
Сопротивление обмотки \dot{Z}_1 , Ом	R_1	1,77	3,13	5,3	7,1
	X_1	1,35	5,0	9,1	9,4
Сопротивление разветвления \dot{Z}_p , Ом	R_p	26,2	59,4	80,9	89,6
	X_p	20,25	41,9	53,7	57,8
Сопротивление магнитопровода \dot{Z}_2 , Ом	R_2	30,9	65,3	85,7	95
	X_2	18,2	39,2	52,3	56,05

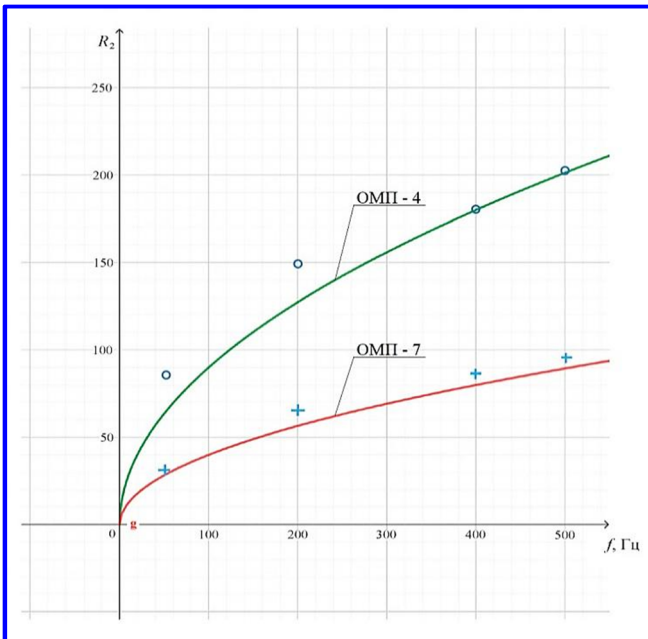


Рис. 3. Зависимость активной составляющей сопротивления магнитопровода от частоты питания

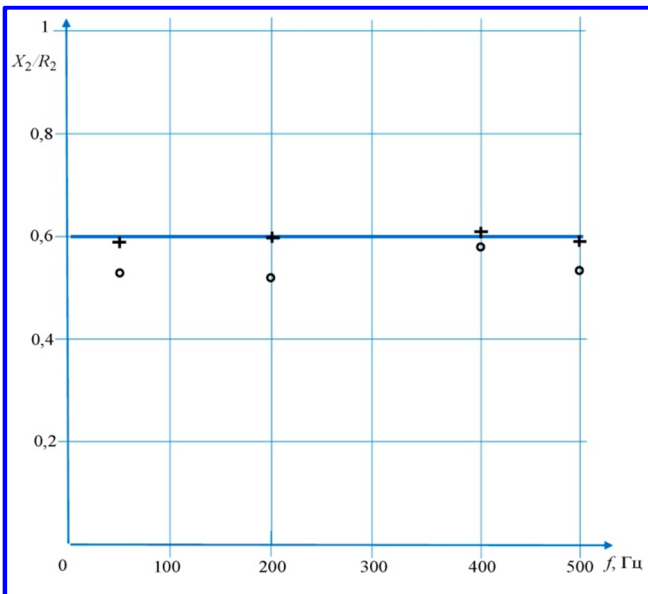


Рис. 4. Изменение отношения X_2/R_2 в зависимости от частоты питания

В-третьих, следует отметить, что собственное сопротивление обмотки возрастает с увеличением частоты питания. Причём, наблюдается увеличение составляющей активного сопротивления, которое существенно выше активного сопротивления обмотки постоянному току. Это может быть обусловлено изменением соответствующих магнитных потоков рассеяния, на которые влияют вихревые токи, возникающие в массивном магнитопроводе. Поскольку собственное сопротивление обмотки в ОМП не превышает 10% от общего сопротивления, то можно приближённо учесть изменение этого сопротивления в зависимости от частоты питания. Например, для рассматриваемых ОМП ввести дополнительную добавку к R_1 около 10% от R_2 .

Для общей наглядной оценки результатов представим зависимость изменения полученных параметров массивного магнитопровода от частоты питания в графическом виде. На графиках рис. 3 показаны расчётные зависимости изменения активной составляющей R_2 комплексного сопротивления магнитопровода \dot{Z}_2 от частоты питания f , соответствующие исходному уравнению (1). Причём, значения средних единичных сопротивлений R_{21} для каждого типа ОМП получены из табл. 4 и 5 и соответствуют для ОМП-4 – $9 \text{ Ом} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$ и ОМП-7 – $4 \text{ Ом} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$. Крестиками и точками на графиках показаны фактические значения R_2 , соответствующие табл. 4 и 5. Практическое совпадение расчётных и экспериментальных данных свидетельствует о достаточно высокой точности определения параметров магнитопровода.

Кроме того, для оценки постоянства соотношения реактивного X_2 и активного R_2 составляющих в рассматриваемом диапазоне частот от 50 до 500 Гц на рис. 4 показано фактическое отклонение (крестики и точки) полученных данных от постоянного значения 0,6 (соответствующая сплошная линия). Разброс не превышает 10%.

Отмеченные особенности изменения параметров схемы замещения от частоты питания, возникающие из-за влияния массивного магнитопровода, оказывают существенное воздействие на выбор

способа и структуры управления электромагнитными подшипниками с обратной связью по магнитному потоку [4] и [5], которые разрабатываются в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». В какой мере необходимо учитывать каждую из этих особенностей, зависит от конкретной конструкции ОМП. По результатам данных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

Анализ полученных значений параметров схемы замещения для двух типов ОМП позволяет предложить для математического моделирования следующие расчётные зависимости.

Выводы

1. Эквивалентные параметры массивного магнитопровода:

- активное сопротивление $R_2(f) = R_{21} f^{0,5}$;
- индуктивность $L_2(f) = L_{21} f^{-0,5}$, где R_{21} и L_{21} – значения параметров при частоте $f = 1$ Гц.

Для ОМП-4 $R_{21} = 9$ Ом·Гц^{-0,5}, а $L_{21} = 0,9$ Гн·Гц^{0,5}.

Для ОМП-7 $R_{21} = 4,0$ Ом·Гц^{-0,5}, а $L_{21} = 0,4$ Гн·Гц^{0,5}.

2. Значения индуктивностей, соответствующих магнитному потоку в зазоре между статором и ротором, составляют для ОМП-4 $L_0 = 0,7$ Гн и для ОМП-7 $L_0 = 0,65$ Гн.

3. Индуктивности, соответствующие магнитному

потоку рассеяния, составляют примерно 3% от L_0 . Однако, с учётом влияния вихревых токов в массивном магнитопроводе следует считать, что эта индуктивность шунтируется активным сопротивлением, составляющим около 10% R_2 .

Литература

1. Куцевалов В. М. Вопросы теории и расчёта асинхронных машин с массивными роторами / В. М. Куцевалов. – М. : Энергия, 1966. – 301 с.
2. Учёт вихревых токов в осевом магнитном подшипнике / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 119. – № 6. – С. 3 – 8.
3. Математическая модель осевого магнитного подшипника / В. П. Верещагин, В. А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 123. – № 4. – С. 3 – 8.
4. Особенности управления электромагнитными подшипниками с обратной связью по магнитному потоку / В. П. Верещагин, И. В. Гурова, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 157. – № 2. – С. 3 – 10.
5. Управление электромагнитными подшипниками с вычислителем магнитного потока / В. П. Верещагин, И. В. Гурова, А. В. Рогоза, А. В. Спиринов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 159. – № 4. – С. 3 – 8.

Поступила в редакцию 14.12.2018

Владимир Петрович Верещагин, доктор технических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 365-50-73.

Ирина Валерьевна Гурова, аспирант, инженер, т. (495) 366-31-88.

Анатолий Зиновьевич Емельянов, ведущий инженер-конструктор, т. (495) 366-24-95.

Александр Валерьевич Рогоза, кандидат технических наук, начальник НПК, т. (495) 366-04-79.

Николай Николаевич Смирнов, инженер 1 категории.

Артур Анатольевич Михаленко, инженер.

Т. (495) 366-42-11.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF AXILE ELECTROMAGNETIC BEARINGS WITH SOLID CORE

**V. P. Vereshchagin, I. V. Gurova, A. Z. Emelianov,
A. V. Rogoz, N. N. Smirnov, A. A. Mikhalenko**

The article considers the issues related to experimental determination of electrical parameters of two types of axile electromagnetic bearings with solid cores used within gas compressor units. The urgency of this task is conditioned by the necessity to set the electromagnetic bearings control system free from the negative influence of eddy currents appearing in the solid core on the dynamic properties. The results of electrical measurements and calculation of complex resistance of solid cores at various power supply voltage frequencies are presented. The design values of solid core parameters and approximating relationships characterizing their variation depending on the power supply frequency have been obtained. These data may be of interest both during the simulation of processes taking place inside the electric bearings.

and inside the control systems with application of magnetic flux calculator. The reviewed results and conclusions comply with the essentials and regularities existing in electromechanics.

Key words: electromagnetic bearing, solid core, equivalent circuit, complex resistance of solid core, calculation formulas.

References

1. Kutsevalov V. M. Matters of theory and design of asynchronous machines with solid rotors / V. M. Kutsevalov. – Moscow: Energia, 1966. – 301 p.
2. Consideration of eddy currents in axial magnetic bearing / V. P. Vereshchagin, V. A. Klabukov // NPP VNIIEM Proceedings. – M. : FGUE NPP VNIIEM, 2010. – Vol. 119. – No. 6. – Pp. 3 – 8.
3. Mathematical model of an axial magnetic bearing / V. P. Vereshchagin, V. A. Klabukov // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow: FGUE NPP VNIIEM, 2011. – Vol. 123. – No. 4. – Pp. 3 – 8.
4. Peculiarities of flux magnetic feedback control of electromagnetic bearings / V. P. Vereshchagin, I. V. Gurova, A. V. Rogoza, A. V. Spirin // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2017. – Vol. 157. – No. 2. – Pp. 3 – 10.
5. Control of axial electromagnetic bearings with magnetic flux calculator / V. P. Vereshchagin, I. V. Gurova, A. V. Rogoza, A. V. Spirin // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2017. – Vol. 159. – No. 4. – Pp. 3 – 8.

Vladimir Petrovich Vereshchagin, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Researcher, tel.: +7 (495) 365-50-73.

Irina Valerievna Gurova, Ph. D. Student, Engineer, tel.: +7 (495) 366-31-88.

Anatolii Zinovievich Emelianov, Leading Design Engineer, tel.: +7 (495) 366-24-95.

Aleksandr Valerevich Rogoza, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Research and Production Center, tel.: +7 (495) 366-04-79.

Nikolai Nikolaevich Smirnov, Category I Engineer.

Artur Anatolievich Mikhalevich, Engineer.

Tel.: +7 (495) 366-42-11.

E-mail: vniiem@vniiem.ru.

(JC «VNIIEM Corporation»).