

В.В. Суханов, Ю.Д. Нетеса

Моделирование электромагнитных процессов в электровибродвигателе средствами пакета «ELCUT»

Электровибродвигатель (ЭВД) представляет собой синхронный двигатель возвратно-поступательного движения и является основной составной частью резонансного электровибрационного привода. Синхронный электровибродвигатель состоит из магнитопровода, постоянных магнитов, одной силовой катушки, датчика положения якоря относительно статора и датчика температуры катушки. Магнитная система выполнена таким образом, что зазор между якорем и статором имеет постоянную величину. Рабочий ход якоря составляет от 2 до 60 мм с частотами вибрации от 10 до 200 Гц. Двигатель имеет симметричную силовую характеристику двустороннего действия. При этом якорь двигателя удерживается упруго в среднем (нейтральном) положении магнитными силами. Этот эффект, называемый «магнитной пружиной», увеличивает коэффициент жесткости колебательной системы и частично снижает необходимую жесткость основной упругой системы. Массогабаритные показатели электровибродвигателя в 1,5 - 2 раза меньше по сравнению с электромагнитами, которые применяются в настоящее время в качестве вибровозбудителей.

Резонансный преобразователь, как вторая составная часть резонансного электровибрационного привода, обеспечивает полное управление синхронным электровибродвигателем. Преобразователь обеспечивает частоту возбуждающей силы, всегда равную резонансной частоте (авторезонанс) механической системы при любых изменениях присоединённой массы, жесткости упругой системы, в том числе и нелинейной, любых рабочих нагрузках и возмущающих воздействиях. Преобразователь обеспечивает регулирование и поддержание заданной амплитуды колебаний механической системы в диапазоне от 0,5 мм до максимальной рабочей амплитуды вибродвигателя (60 мм) с точностью не хуже

$\pm 0,2$ мм во всем диапазоне частот колебаний. В преобразователе предусмотрена защита двигателя от перегрева, а также возможность подключения дополнительного датчика перемещений для стабилизации амплитуды других упруго-связанных масс. Вариант резонансного преобразователя с системой управления на микропроцессорной базе позволит обеспечить дополнительные возможности, а именно: одновременное поддержание двух частот, отдельное регулирование и поддержание заданных значений амплитуд сложных колебаний (бичастотное регулирование), а также активное и (или) рекуперативное гашение колебаний системы.

Резонансный электровибрационный привод может использоваться для создания регулируемых резонансных вибровозбудителей, виброгасителей, а также как прямой резонансный вибропривод систем вибротехники со своей упругой системой. Основные преимущества резонансного электровибропривода - это значительное снижение энергопотребления вибротехники, снижение установленной мощности вибропривода, повышение производительности и качества технологических процессов, повышение надежности и устойчивости работы вибротехники, отсутствие повышения амплитуд колебаний при пуске и выбеге установки. При этом в серийном производстве стоимость резонансного вибропривода может быть ниже соответствующего по мощности комплекта дебалансного асинхронного вибровозбудителя с преобразователем частоты. Кроме того, для выполнения тех же задач, резонансный вибропривод потребует значительно меньшей мощности.

Уникальные характеристики резонансного электровибрационного привода позволяют использовать его практически во всех традиционных областях вибротехники и создают перспективы расширения областей применения вибротехнологий.

Вопросам расчёта и проектирования синхронных магнитных механизмов (СММ) возвратно-поступательного движения посвящено большое количество работ. Наиболее полно результаты этих работ изложены в [1, 2], где представлены различные конструктивные схемы исполнения этих

электромагнитных устройств, а также инженерные методики их расчёта. Используя накопленный ранее опыт [1] и методологию расчётов [2], в НПП «ВРТ» разработан и создан простой по конструкции ЭВД, где в якоре для создания постоянного магнитного поля используются высокоэффективные постоянные магниты Nd-Fe-B. На рис. 1 представлена фотография опытного образца ЭВД, а на рис. 2 – его сборочный чертёж с обозначением основных элементов конструкции.

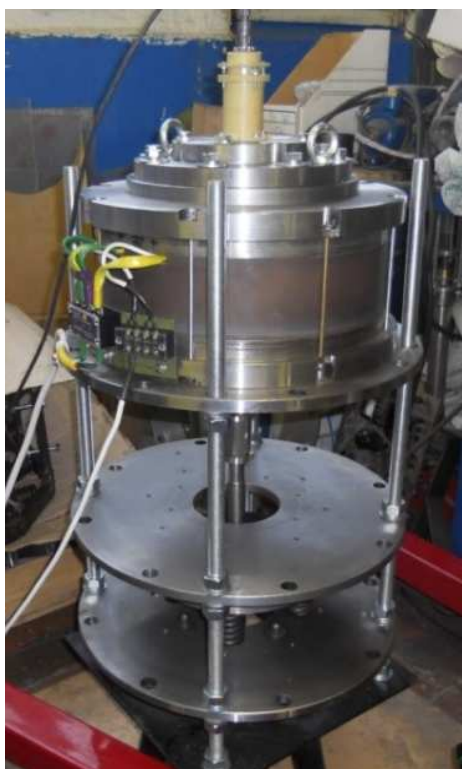


Рис. 1. Фотография
опытного образца
электровибродвигателя

Ферромагнитные сердечники статора и якоря выполнены шихтованными из листовой электротехнической стали. Катушка или обмотка статора питается переменным током $i_k = I_{mk} \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$. Для разработчиков вибромашин важное значение имеют силовые характеристики электровибродвигателя, которые представляют собой зависимость силы f , действующей на якорь, от смещения якоря S относительно нейтрального положения. Инженерные методики электромагнитных расчётов электровибродвигателей основываются, как правило, на схемах замещения магнитной цепи, которые в свою очередь строятся в соответствии с законом Ома для участков разветвленной

магнитной цепи. Достоверность получаемых в таком случае результатов расчёта может быть проверена либо экспериментальным путем, либо путем математического моделирования реальных магнитных полей с учётом всех особенностей конструктивного исполнения электромагнитного устройства.

В процессе разработки в НПП «ВРТ» вышеприведённого опытного образца электровибродвигателя было рассмотрено десять вариантов конструктивного исполнения магнитной системы двигателя. При этом, каждый вариант конструкции исследовался методом математического моделирования

магнитного поля при помощи конечно-элементного программного комплекса «ELCUT» версии 5.10 с использованием компоненты пакета «Нелинейная задача нестационарного магнитного поля» в осесимметричной постановке. Эта компонента пакета выбрана потому, что она представляет собой общий случай расчёта электромагнитного поля, вызванного переменными сторонними токами и постоянными магнитами в нелинейной ферромагнитной среде с учётом вихревых токов.

В этом случае уравнение нестационарного магнитного поля, записанное через векторный потенциал A , в нелинейной постановке, будет иметь вид [3]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r\mu} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - g \frac{\partial A}{\partial t} = -j_{\text{стор}} + \left(\frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right) \quad (1)$$

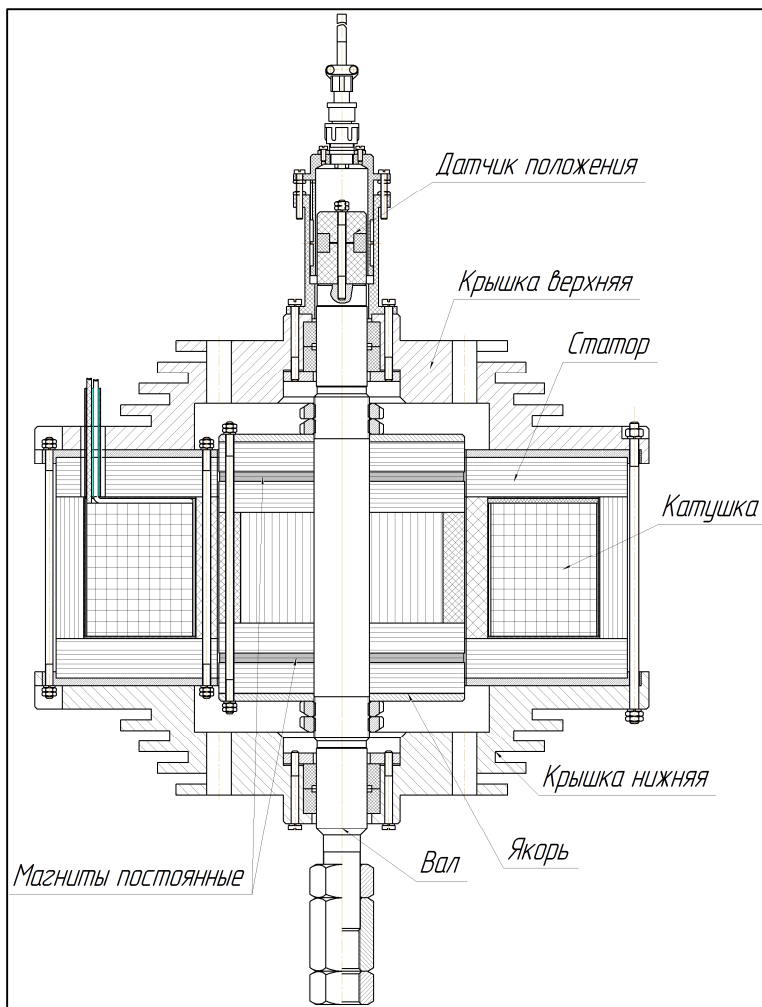


Рис. 2. Сборочный чертёж опытного образца электровибродвигателя

В уравнении (1) свойства материалов по магнитной проницаемости μ считаются изотропными и задаются зависимостью $\mathbf{B}(\mathbf{H})$, представленной кубическим сплайном. При отсутствии проводящих сред электрическая проводимость $g=0$ и последний член в левой части уравнения (1) отсутствует. Сторонняя плотность тока $j_{\text{стор}}$ в правой части (1) является гармонической функцией времени и задаётся в виде:

$$j_{\text{стоп}} = j_{\text{стоп}}(t) = J_{\text{мкр}} \sin \omega t, \quad (2)$$

где $J_{\text{мкр}}$ -расчётное значение амплитуды плотности тока катушки, которое определяется следующим образом.

Если катушка (обмотка статора) с током I_k (действующее значение) имеет число витков w_k и занимает окно с площадью поперечного сечения $S_{\text{ок}}$, то значение $J_{\text{мкр}}$ будет равно:

$$J_{\text{мкр}} = \frac{\sqrt{2} I_k w_k}{S_{\text{ок}}} \quad (3)$$

В соответствии с рис. 2 геометрическая модель расчётной области поля электровибродвигателя показана на рис. 3.

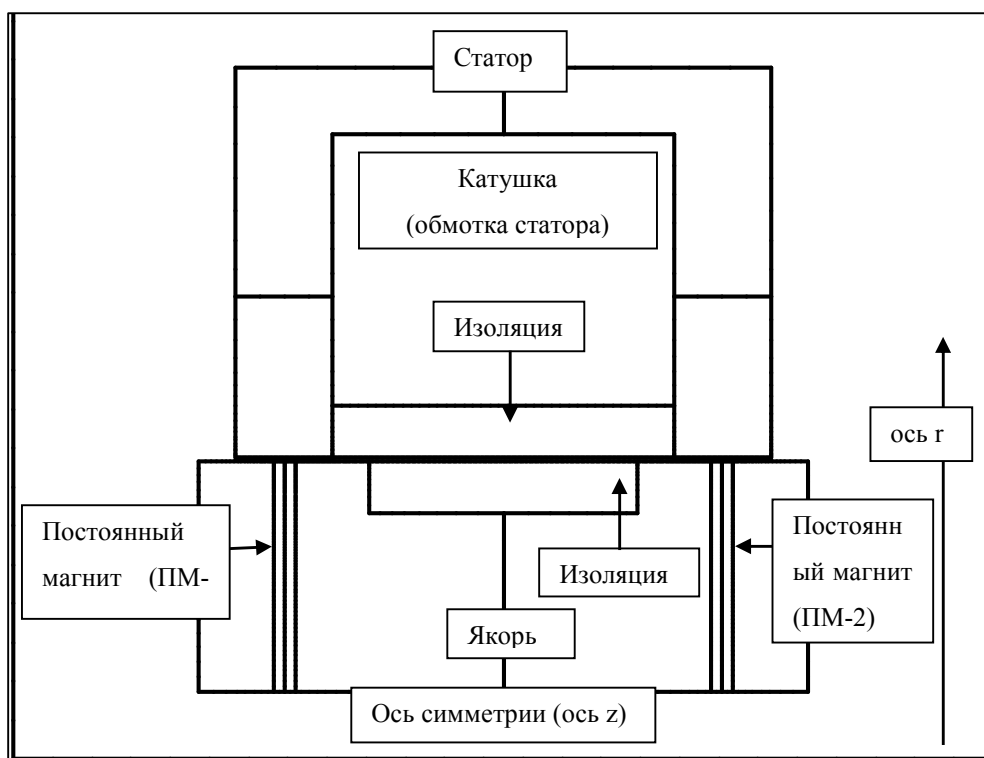


Рис. 3. Геометрическая модель расчётной области поля электровибродвигателя

Выше отмечалось, что при поиске оптимальной конструкции ЭВД было рассмотрено до десяти вариантов расчёта. В настоящей статье в качестве примера приводятся результаты полевых расчётов в пакете «ELCUT» одного из таких вариантов. Основными исходными данными для этого варианта расчёта являются следующие величины и характеристики:

1. число витков в катушке обмотки статора - $w_k=64$,

2. действующее значение переменного тока в обмотке статора - $I_k=45,45$ А,
3. частота и период переменного тока - $f=50$ Гц, $T=0,02$ сек,
4. площадь сечения окна под катушку обмотки статора - $S_{ок}=6716$ мм²,
5. коэрцитивная сила постоянных магнитов ПМ-1 и ПМ-2 - $H_c=850000$ А/м,
6. направление намагничивания постоянного магнита ПМ-1 - 0° градусов,
7. направление намагничивания постоянного магнита ПМ-2 - 180° градусов,
8. марка изотропной электротехнической стали сердечников статора и якоря - М270-50 А,
9. зазор между статором и якорем ЭВД - $\delta=1$ мм,
10. габариты активной зоны статора ЭВД - диаметр $D_{ст}=372$ мм, длина $L_{ст}=144$ мм,
11. габариты активной зоны якоря ЭВД - диаметр $D_{як}=160$ мм, длина $L_{як}=164$ мм,
12. габариты кольцевых ПМ - $h_z \times h_r=6 \times 62$ мм, где h_z - толщина кольца, h_r - ширина кольца.

Остальные геометрические размеры расчётной модели ЭВД, а также зависимость $\mathbf{B(H)}$ стали М270-50А можно найти в соответствующих файлах задачи «ELCUT», которые прилагаются к настоящей статье. При этом следует отметить, что расчётная модель поля ЭВД построена таким образом, что при смещении якоря S в любом осевом направлении относительно нейтрального положения топология расчётной области не нарушается.

Основные результаты полевых расчётов с использованием программного комплекса «ELCUT» представлены в виде картин магнитного поля, таблиц с численными значениями важнейших показателей ЭВД, а также графических зависимостей силовых и других характеристик двигателя.

На рис. 4, исходя из общих физических представлений, показаны идеализированные картины распределения магнитного поля в магнитной системе ЭВД, которые не учитывают потоков рассеяния и поэтому являются приближёнными. Аналогичные, но реальные картины магнитного поля, полученные на основе полевых расчётов в «ELCUT», приведены на рис. 5 и рис. 6, где максимальное положительное и отрицательное значения тока $i_k = \pm I_{mk}$

получаются соответственно для моментов времени $t_1=1/4 \cdot T=0,005$ сек и $t_2=3/4 \cdot T=0,015$ сек.

Остальные наиболее важные результаты расчётов представлены в таблицах 1 и 2. В этих таблицах смещения якоря $S=-16, +16$ соответствуют случаю, когда постоянные магниты якоря полностью выходят из зацепления с сердечником статора. В таблице 1 сила f_z - это полная осевая пондеромоторная сила, действующая на якорь ЭВД и определяемая с помощью интегрального калькулятора, имеющегося в пакете «ELCUT». По данным таблицы 1 на рис. 7 средствами пакета «Mathcad» [4] построены силовые характеристики $f_z(S)$ электровибродвигателя при токе $i_k=0$ и $i_k = \pm I_{mk}$. В таблице 2 индуктивности катушки обмотки статора L_k рассчитаны с помощью «Мастера индуктивностей» на основе концепции потокосцеплений с учётом результирующего магнитного поля. Поскольку индуктивности L_k при положительном и отрицательном направлении тока i_k различаются, то значение L_{cp} определено как среднеарифметическое из значений $L_k(t_1)$ и $L_k(t_2)$. Зависимость $L_{cp}(S)$ приведена на рис. 8.

Зависимости индуктивного сопротивления $x_L(S)$ и напряжения на катушке $U_k(S)$ имеют тот же характер, что и $L_{cp}(S)$, так как $x_L=\omega L_{cp}$, а $U_k= I_k x_L$, если пренебречь активным сопротивлением катушки обмотки статора.

В заключение по материалам настоящей статьи можно сделать следующие выводы:

1. Для резонансного электровибрационного привода разработан и создан простой по конструкции экспериментальный образец электровибродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов с высокоэнергетическими параметрами.
2. На основе программного комплекса «ELCUT» разработана и апробирована методика расчёта электромагнитных процессов электровибродвигателя. Определены силовые характеристики и параметры катушки обмотки статора электровибродвигателя.

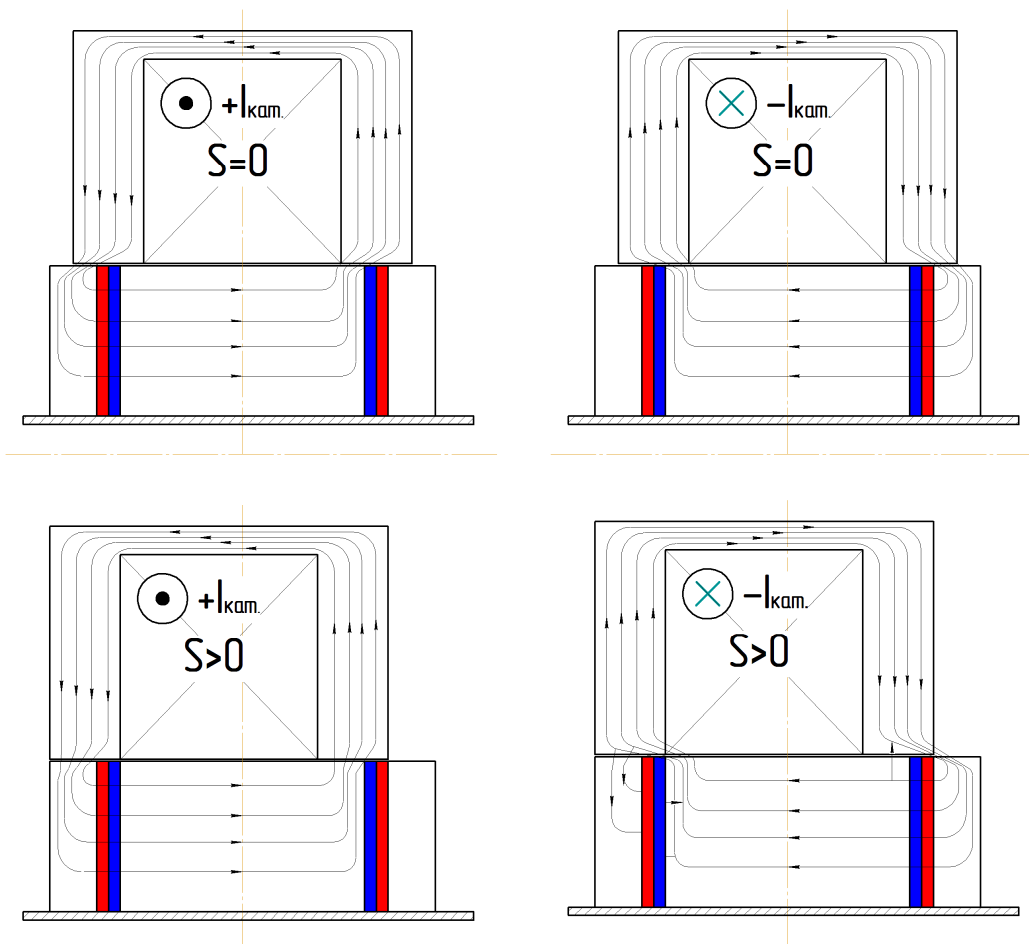


Рис. 4. Расчётные схемы и идеализированные картины путей вероятных потоков в магнитной системе ЭВД в зависимости от направления тока i_k в катушке обмотки статора и смещения якоря S относительно нейтрального положения: $S = 0$ – нейтральное положение якоря, осевая координата $z=0$; $S>0$ – якорь смещен вправо в направлении положительной координаты z ; $i_k=+I_{кам}$ – направление тока в катушке обмотки якоря положительное; $i_k=-I_{кам}$ – направление тока в катушке обмотки якоря отрицательное

Литература

1. Ганзбург Л.Б., Федотов А.И. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. - 364 с.
2. Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно- поступательного движения. - СПб.: Корона принт, 2004. - 368 с.
3. «ELCUT». Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. - СПб.: Производственный кооператив ГОР, 2003.- 249 с.
4. Макаров Е.Г. Инженерные расчёты в Mathcad. Учебный курс. СПб.: Питер, 2003.-448с.

Приложение

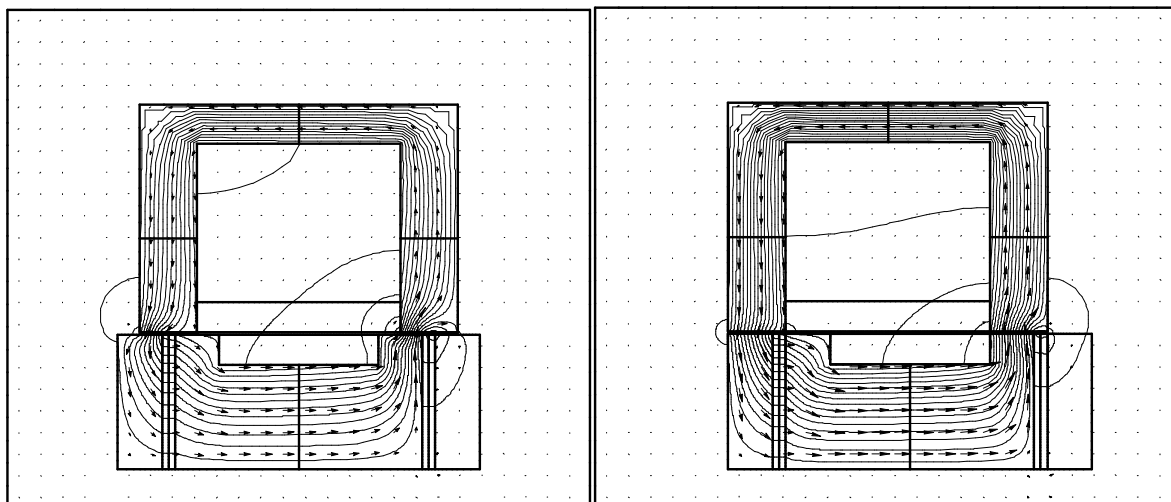


Рис. 5. Реальные картины магнитного поля в магнитной системе ЭВД при $i_k = I_{mk} = \sqrt{2}I_k = 64,27 \text{ A}$, $t_1 = T/4 = 0,005 \text{ сек}$. Слева - а) смещение якоря $S=0$; справа - б) смещение якоря $S=10 \text{ мм}$

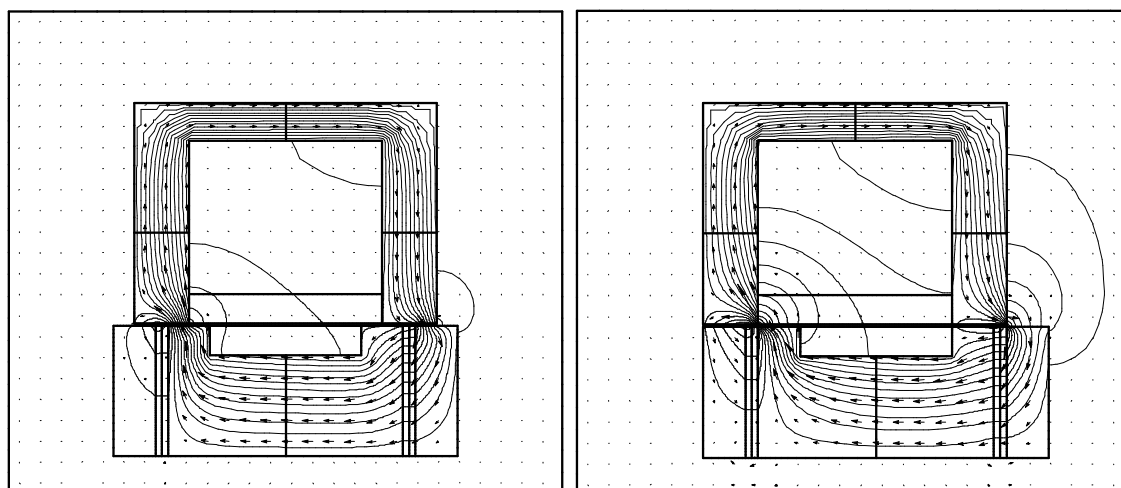


Рис. 6. Реальные картины магнитного поля в магнитной системе ЭВД при $i_k = -I_{mk} = -\sqrt{2}I_k = -64,27 \text{ A}$, $t_2 = 3/4T = 0,015 \text{ сек}$. Слева - а) смещение якоря $S=0$; справа - б) смещение якоря $S=10 \text{ мм}$

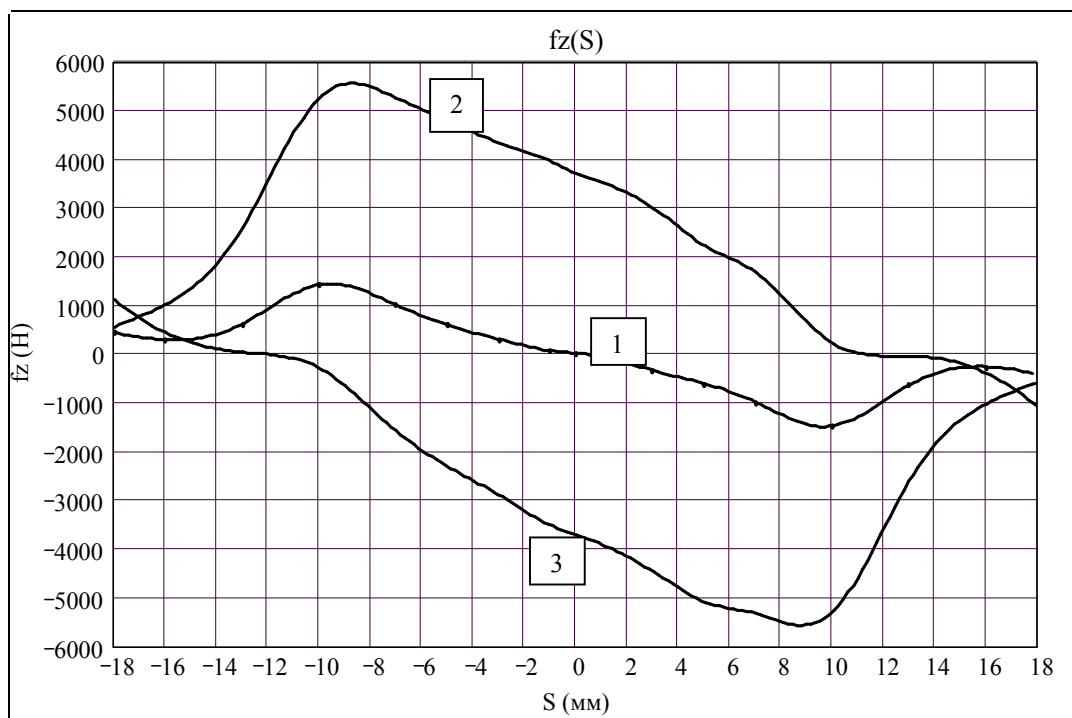


Рис. 7. Силовые характеристики ЭВД: кривая 1 $i_k=0$, кривая 2 $i_k=I_{mk}$, кривая 3 $i_k=-I_{mk}$

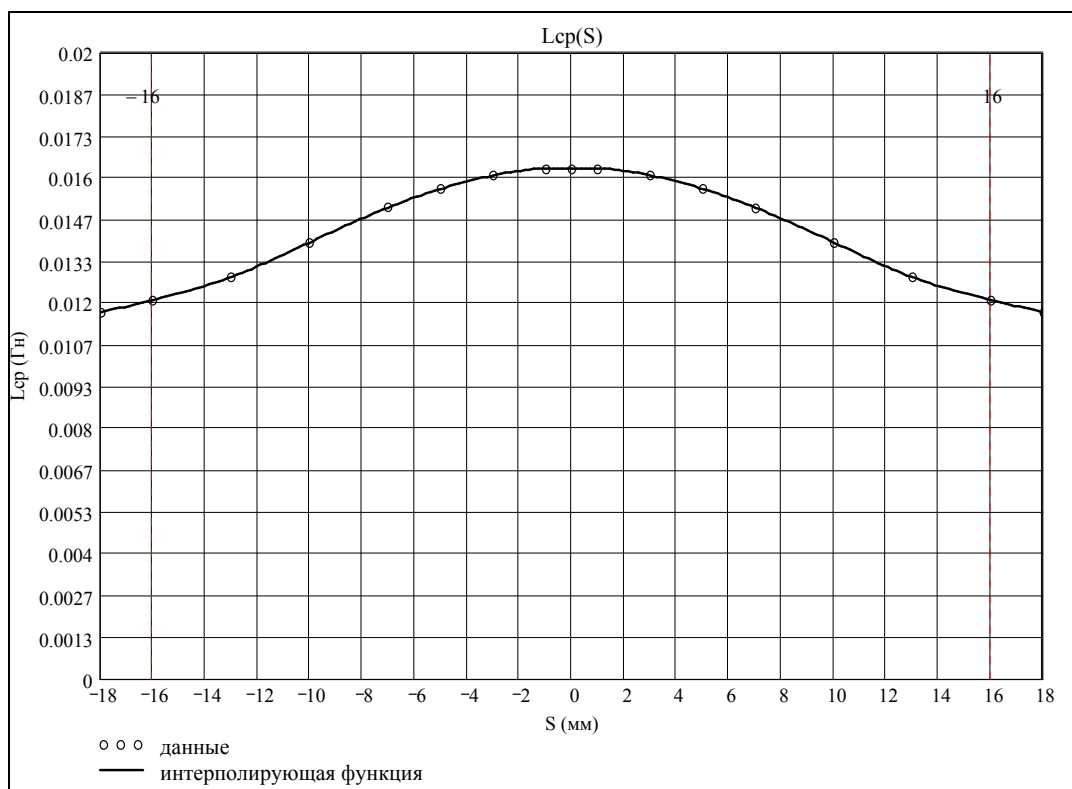


Рис. 8. Зависимость среднего значения индуктивности катушки L_{cp} от смещения якоря S

Таблица 1. Результаты расчёта силовых характеристик ЭВД

№ п/п	S (мм)	Осевая сила f_z - Ньютоны			
		$i_K=0$	$t_1=0.005$ сек	$t_2=0.015$ сек	$t_3=0.025$ сек
		f_z	f_z	f_z	f_z
1	-18	442.4	565.5	1115.4	565.5
2	-16	294.4	1021.2	439.1	1021.1
3	-13	617.9	2579.3	41.7	2579.3
4	-10	1430.6	5270.8	-288.2	5270.8
5	-7	1010.8	5264.8	-1581.9	5264.8
6	-5	606.4	4804.2	-2295.3	4804.2
7	-3	306.2	4336	-2894.5	4336
8	-1	72.3	3962.2	-3512.2	3962.2
9	0	16.4	3711.9	-3707.9	3711.9
10	1	-32.7	3527.6	-3904.7	3527.6
11	3	-332.3	3018.3	-4460.8	3018.3
12	5	-603.2	2226.6	-5084.2	2226.6
13	7	-984.4	1685	-5322.4	1685
14	10	-1476.9	231.2	-5296.7	231.2
15	13	-624	-33.4	-2583.7	-33.4
16	16	-253	-386	-1017.6	-386
17	18	-420.3	-1080.1	-576.1	-1080.1

Таблица 2. Результаты расчёта параметров катушки обмотки статора ЭВД

№ п/п	S (мм)	Индуктивность катушки L_K -Генри			L_{cp} (Гн), X_L (Ом), U_K (В)		
		$t_1=0.005$ сек	$t_2=0.015$ сек	$t_3=0.025$ сек	L_{cp}	X_L	U_K
		L_K	L_K	L_K			
1	-18	0.00272	0.02067	0.00272	0.0117	3.675	167
2	-16	0.00324	0.0209	0.00324	0.0121	3.801	172.8
3	-13	0.00477	0.02092	0.00477	0.01284	4.034	183.3
4	-10	0.00735	0.02055	0.00735	0.01395	4.382	199.2
5	-7	0.0104	0.01972	0.01 04	0.01506	4.731	215
6	-5	0.0123	0.019	0.0123	0.01565	4.916	223.4
7	-3	0.01406	0.01809	0.01406	0.01608	5.052	229.6
8	-1	0.01563	0.01698	0.01563	0.01631	5.124	232.9
9	0	0.0163	0.0163	0.0163	0.0163	5.121	232.7
10	1	0.01698	0.01563	0.01698	0.01631	5.124	232.9
11	3	0.01809	0.01406	0.01809	0.01608	5.052	229.6
12	5	0.019	0.0123	0.019	0.01565	4.916	223.4
13	7	0.01972	0.01038	0.01972	0.01505	4.728	214.9
14	10	0.02055	0.00733	0.02055	0.01394	4.379	199
15	13	0.0209	0.00476	0.0209	0.01283	4.031	183.2
16	16	0.0209	0.00324	0.0209	0.0121	3.801	172.8
17	18	0.02067	0.00273	0.02067	0.0117	3.675	167

Об авторах

Суханов Виктор Васильевич, Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, кафедра «Электрические машины»

Нетеса Юрий Дмитриевич, Научно-производственное предприятие «Вибро-резонансные технологии»