

В. В. Суханов

## Электромагнитный привод

для очистки фильтра сушильного барабана

### **1. Общие соображения по обоснованию и выбору варианта конструктивного исполнения электромагнитного привода**

Исходными данными для расчёта электромеханических характеристик исполнительного механизма являются три группы параметров. Это:

1. усилие, прилагаемое к фильтру сушильного барабана;
2. диапазон рабочих частот, в котором развивается заданное усилие;
3. максимальные радиальные и осевые габариты подвижной и неподвижной частей исполнительного механизма.

Нетрудно предположить, что все перечисленные характеристики взаимосвязаны между собой, поскольку, так или иначе, влияют друг на друга. Рассмотрим эти связи на основе простых понятий из области электрических и магнитных явлений, протекающих в разнородных средах.

В качестве одного из возможных вариантов конструктивного исполнения рассматривается осесимметричная конструкция (смотри рис. 1), состоящая из постоянного магнита (подвижная часть) и катушки индуктивности в виде соленоида с ферромагнитным сердечником или без него (неподвижная часть), которая питается переменным током от специального амплитудно-частотного преобразователя. Фильтр сушильного барабана располагается в зазоре  $\delta$  и жёстко связан с постоянным магнитом ПМ.

Усилие, возникающее в результате взаимодействия постоянного магнитного поля магнита и переменного магнитного поля соленоида, будет зависеть от габаритов магнита ( $R_{\max,м}$  – максимальный радиус постоянного магнита,  $b_{\max,м}$  – максимальная осевая толщина постоянного магнита) и его коэрцитивной силы  $H_c$ , измеряемой в амперах на метр, а также от габаритов соленоида ( $R_{\max,к}$  – максимальный наружный радиус катушки соленоида,  $l_{\max,к}$  – максимальная осевая длина катушки соленоида) и

амплитуды намагничивающей силы катушки  $F_{m,k} = I_{m,k} \cdot w_k$  ( $I_{m,k}$  – амплитудное значение тока катушки,  $w_k$  – число витков в катушке). Вышеперечисленные габаритные размеры заданы следующими величинами:  $R_{max,m} = 20$  мм,  $b_{max,m} = 40$  мм;  $R_{max,k} = 30$  мм,  $l_{max,k} = 100$  мм.

Очевидно, что для создания знакопеременного усилия, изменяющегося во времени по гармоническому закону, необходимо, чтобы магнитное поле постоянного магнита было соизмеримо по абсолютной величине с переменным магнитным полем соленоида, когда ток в катушке достигает своего максимального или минимального значения. Характеристикой магнитного поля постоянного магнита и катушки с током может служить функция потока в зазоре  $\Phi_{\delta}(r)$  между магнитом и соленоидом, а также среднее значение магнитной индукции  $B_{\delta,ср}$ . При этом, желательно иметь:

$$\Phi_{\delta}^{(m)}(r) \approx \Phi_{m\delta}^{(k)}(r) \text{ или } B_{\delta,ср}^{(m)} = \frac{\Phi_{\delta}^{(m)}(R_{\delta})}{S_{\delta}} = \frac{\Phi_{\delta}^{(m)}(R_{\delta})}{\pi R_{\delta}^2} \approx B_{\delta,ср}^{(k)} = \frac{\Phi_{m\delta}^{(k)}(R_{\delta})}{S_{\delta}} = \frac{\Phi_{m\delta}^{(k)}(R_{\delta})}{\pi R_{\delta}^2} \quad (1)$$

где  $\Phi_{\delta}^{(m)}(r)$  – магнитный поток в функции радиальной координаты  $r$  на уровне середины зазора, создаваемый постоянным магнитом при отсутствии соленоида;  $\Phi_{m\delta}^{(k)}(r)$  – магнитный поток в функции радиальной координаты  $r$  на уровне середины зазора, создаваемый соленоидом при отсутствии постоянного магнита,  $R_{\delta}$  и  $S_{\delta}$  – радиус и поперечное сечение зазора.

Предварительные исследования стационарного магнитного поля, когда катушка соленоида запитывается постоянным током (решается магнитостатическая задача, пакет «ELCUT»), показали, что приближённые условия (1) выполняются, если намагничивающая сила постоянного магнита:

$$F_m = H_c \cdot b_m \quad (2)$$

равна намагничивающей силе катушки соленоида:

$$F_k = I_k \cdot w_k = j_{расч} \cdot S_k = j_{расч} \cdot (h_k \cdot l_k), \quad (3)$$

где  $j_{расч}$  – расчётное значение плотности тока в катушке при моделировании магнитного поля соленоида.

Из равенства выражений (2) и (3) следует, что:

$$j_{расч} = \frac{H_c \cdot b_m}{h_k \cdot l_k} \quad (4)$$

Величина  $j_{расч}$  не должна превышать некоторых допустимых значений, которые определяются потерями, условиями охлаждения и классом изоляции провода, из которого намотана катушка соленоида.

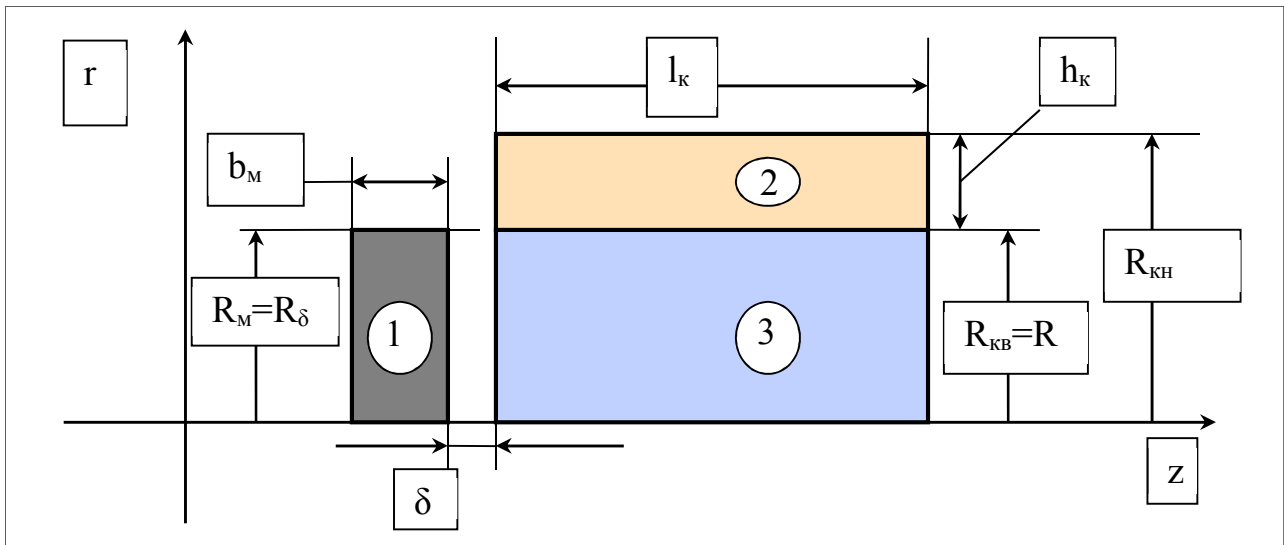


Рис. 1. Конструкция, цифрами обозначены: 1 – постоянный магнит (ПМ); 2 – катушка соленоида (КС); 3 – сплошной ферромагнитный сердечник (СФС)

Последовательность действий по построению расчётной модели для решения магнитостатической задачи, которая даёт возможность убедиться в справедливости предположения (1) при выполнении условий (2) - (4), следующая:

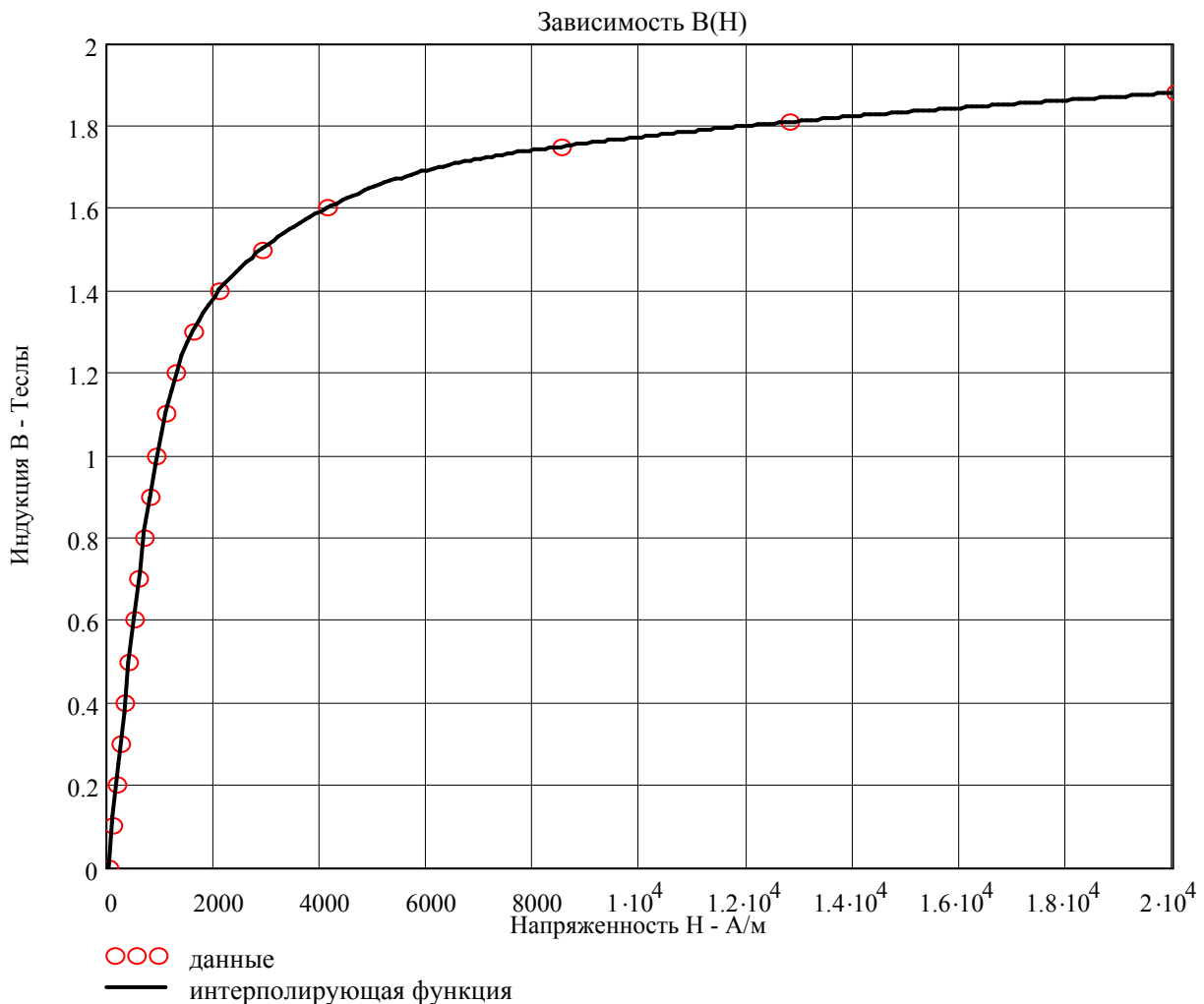
1. Выбираем относительно недорогой магнит (феррит) с коэрцитивной силой  $H_c = 3 \times 10^5 \text{ A/м}$ . Кривая размагничивания такого магнита практически линейна.
2. Задаем размер магнита  $R_m = R_{max,m} = 20 \text{ мм}$ ,  $b_m = 10 \text{ мм}$ . При этом, намагничивающая сила постоянного магнита будет равна  $F_m = (3 \times 10^5) \cdot 0,01 = 3000 \text{ A}$ .
3. Принимаем зазор  $\delta = 5 \text{ мм}$ .
4. Согласно рис. 1 размер  $R_m$  однозначно определяет размеры  $R_\delta = R_{кв} = 20 \text{ мм}$ . При этом, поперечное сечение зазора будет равно  $S_\delta = \pi \cdot R_m^2 = \pi \cdot 20^2 = 1256,6 \text{ мм}^2$ .
5. Задаем размер катушки  $R_{кн} = R_{max,к} = 30 \text{ мм}$ .
6. Согласно рис. 1 размеры  $R_{кн}$  и  $R_{кв}$  однозначно определяют толщину катушки  $h_k = R_{кн} - R_{кв} = 30 - 20 = 10 \text{ мм}$ .

7. Выбираем приемлемое значение  $j_{расч} = 6 \text{ A/мм}^2$
8. Из выражения (4) находим длину катушки соленоида. Она равна:

$$l_k = \frac{H_c \cdot b_m}{h_k \cdot j_{расч}} = \frac{3 \cdot 10^5 \times 0,01 \text{ м}}{0,01 \text{ м} \times 6 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}} = 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ м} = 50 \text{ мм} \quad (5)$$

При этом, поперечное сечение катушки будет равно  $S_k = 10 \cdot 50 = 500 \text{ мм}^2$ , а её намагничивающая сила  $F_k = j_{расч} \cdot S_k = (6 \text{ A/мм}^2) \cdot (500 \text{ мм}^2) = 3000 \text{ A}$ .

9. Рассматривая вариант конструкции исполнительного механизма с ферромагнитным сердечником, выбираем для материала сердечника Сталь 3, которая имеет кривую намагничивания  $B(H)$ , показанную на рис. 2.



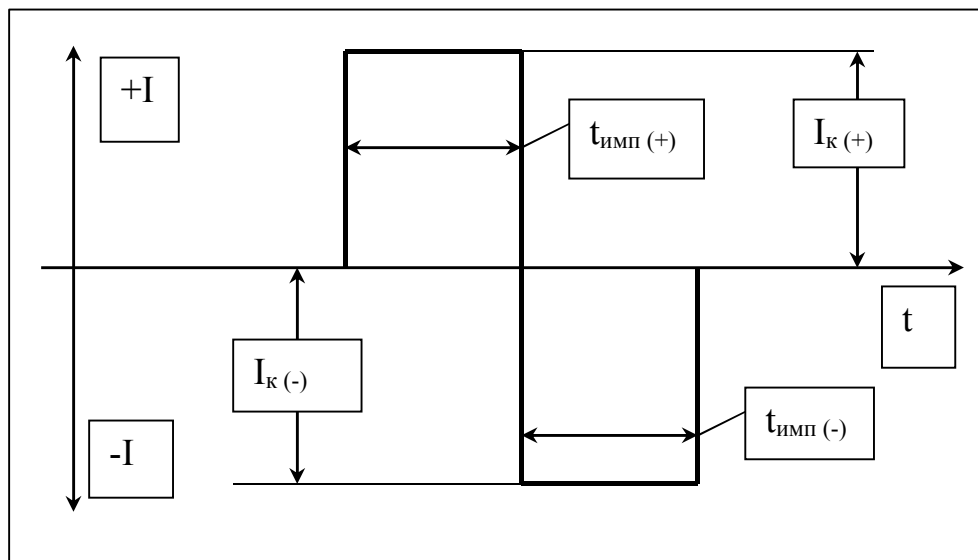
**Рис. 2.** Кривая намагничивания  $B(H)$  для материала сердечника. Сталь 3

Расчёт стационарного магнитного поля в магнитной системе исполнительного механизма (смотри рис. 1) для вышеприведённых условий (смотри пункты 1-9) выполнен с помощью конечно-элементного программного комплекса «ELCUT». При этом, было рассмотрено четыре типа следующих магнитостатических задач:

1. Магнитное поле постоянного магнита ( $H_c \neq 0$ ) при отсутствии соленоида с ферромагнитным сердечником ( $j_{расч}=0, \mu_{серд}=\mu_0$ ).
2. Магнитное поле соленоида с ферромагнитным сердечником [ $j_{расч}\neq 0, \mu_{серд}=\mu(H)$ ] при отсутствии постоянного магнита ( $H_c = 0$ ).
3. Результирующее магнитное поле постоянного магнита и соленоида с ферромагнитным сердечником [ $H_c \neq 0, j_{расч}\neq 0, \mu_{серд}=\mu(H)$ ], когда их магнитные поля в зазоре направлены согласно. В этом случае постоянный магнит будет притягиваться к соленоиду.

4. Результирующее магнитное поле постоянного магнита и соленоида с ферромагнитным сердечником [ $H_c \neq 0, j_{расч} \neq 0, \mu_{серд} = \mu(H)$ ], когда их магнитные поля в зазоре направлены встречно. В этом случае постоянный магнит будет отталкиваться от соленоида.

Следует отметить, что задачи 3 и 4 можно рассматривать, когда катушка соленоида запитывается одинаковыми по длительности импульсами постоянного тока прямоугольной формы, но разной полярности, как это показано на рис. 3.



**Рис. 3.**  $t_{имп(+)} = t_{имп(-)}$ ,  $I_{к(+)} = -I_{к(-)}$ ,  $J_{расч} = \pm |I_{к}| \cdot w_{к} / S_{к} = \pm |I_{к}| \cdot w_{к} / h_{к} \cdot l_{к}$

Основные результаты решения задач (1 – 4) приведены в таблице 1. Это картины магнитных полей (рис. 4-7), графики функций потока  $\Phi_{\delta}(r)$  для середины зазора (рис. 8 и 9), значения потоков  $\Phi_{\delta}(R_{\delta})$  на уровне середины зазора, средние значения магнитной индукции  $B_{\delta,ср}$  в середине зазора, а также значения осевых сил  $f_{z,нм}$ , действующих на постоянный магнит. Графики потоков  $\Phi_{\delta}(r)$ , значения потоков  $\Phi_{\delta}(R_{\delta})$  и сил  $f_{z,нм}$  получены непосредственно из расчёта магнитостатических полей (пакет «ELCUT»), а значения индукций  $B_{\delta,ср}$  рассчитаны по выражениям (1).

Таблица 1

Намагничивающая сила ПМ и КС $F_M = F_K = 3000 \text{ A}$	Поле пост.магн. (задача 1)	Поле соленоида (задача 2)	Результирующее магнитное поле (задача 3)	Результирующее магнитное поле (задача 4)
Картина магнитного поля	Рис. 4	Рис. 5	Рис. 6	Рис. 7
Функция потока $\Phi_{\delta}(r)$ в середине зазора	Рис. 8-а	Рис. 8-б	Рис. 9-а	Рис. 9-б
Поток в зазоре $\Phi_{\delta}(R_{\delta})$ -Веберы	$0,92 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$2,34 \cdot 10^{-4}$	$0,242 \cdot 10^{-4}$
Индукция в зазоре	0,0732	0,0836	0,1863	0,0193

$B_{\delta,cp}$ -Теслы				
Сила $f_{z,нм}$ -Ньютоны (расчёт по полю, «ELCUT»)	-	-	<b>14,98</b>	-7,67
Сила $f_{z,нм}$ -Ньютоны (аналитический расч.)	-	-	<b>17,35</b>	-

В таблице 1 для задачи №3, когда магнитные поля постоянного магнита и соленоида действуют согласно, приведен также результат аналитического расчёта усилия  $f_{z,нм}$  по следующей формуле:

$$f_{z,нм} = \frac{B_{\delta,cp}^2 \cdot S_{\delta}}{2 \cdot \mu_0} = \frac{0.1863^2 \cdot 0.1256.6 \times 10^{-6}}{2 \cdot 4\pi \times 10^{-7}} = 17.35H \quad , \quad (6)$$

где значение  $B_{\delta,cp}$  берется из решения задачи №3.

Строго говоря, формула (6) справедлива тогда, когда магнитное поле в зазоре однородно и когда допустимо применение закона Ома для магнитной цепи. Тем не менее, возможность использования её в данном случае следует из рассмотрения картины магнитного поля в задаче №3 (смотри рис. 6), где поле может быть принято условно однородным, о чем также свидетельствует результат (6) в сравнении со значением  $f_{z,нм} = 14,98 H$  из таблицы 1.

В целом, анализ результатов таблицы 1 в отношении зависимостей  $\Phi_{\delta}(r)$ , а также значений  $\Phi_{\delta}(R_{\delta})$  или  $B_{\delta,cp}$  показывает, что точное удовлетворение условиям (2)-(4) приводит к приближённому выполнению условий (1). Более того, появляется возможность использования формулы (6) для приближённой оценки среднего значения индукции результирующего магнитного поля в зазоре, если задано требуемое усилие  $f_{z,нм}$  и известна геометрия зазора  $S_{\delta} = \pi R_{\delta}^2$ . Таким образом, исходя из формулы (6), можно получить, что:

$$B_{\delta,cp}^{(рез)} = \sqrt{\frac{2\mu_0 f_{z,нм}}{S_{\delta}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot f_{z,нм}}{\pi R_{\delta}^2}} = \sqrt{\frac{0.8 \cdot f_{z,нм}}{R_{\delta}}} \quad , \quad (7)$$

где единицы измерения  $[f_{z,нм}] = H$ ,  $[R_{\delta}] = мм$ ,  $[B_{\delta,cp}] = T$ .

Теперь можно оценить среднее значение индукции в зазоре, которое обусловлено либо только полем постоянного магнита, либо только полем соленоида. Эти значения должны быть равны и будут определяться, как-

$$B_{\delta, \text{cp}}^{(м)} = B_{\delta, \text{cp}}^{(к)} = \frac{B_{\delta, \text{cp}}^{(\text{рез})}}{2} \quad (8)$$

Далее, выбирая параметры магнита ( $H_c$  и  $b_m$ ) и задавая расчётной плотностью тока катушки ( $j_{\text{расч}}$ ), можно из выражения (4) найти сечение катушки  $S_k = h_k \cdot l_k$ , после чего легко определить величину  $l_k$ .

Из данных таблицы 1 следует отметить ещё один результат. Это неравенство сил притяжения и отталкивания постоянного магнита, то есть:

$$f_{z, \text{пм}}^{(\text{прит})} \neq f_{z, \text{пм}}^{(\text{отт})}$$

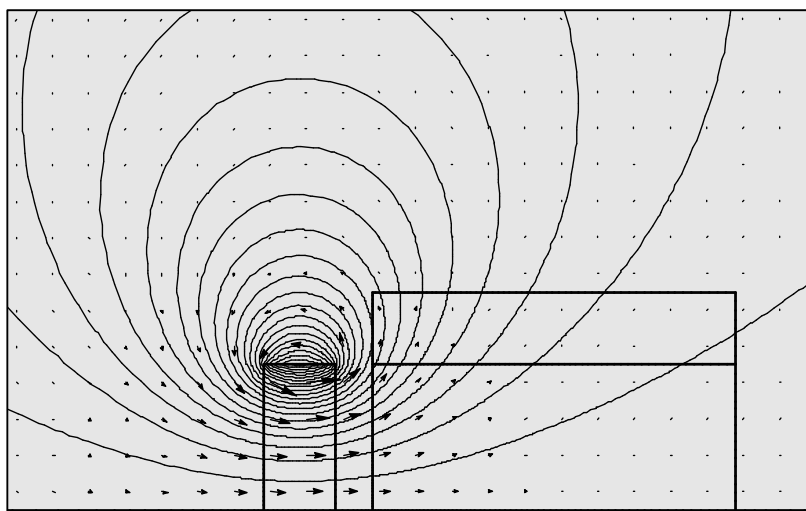
Указанное обстоятельство объясняется тем, что структура магнитных полей для этих двух случаев различна, о чем свидетельствуют картины полей, изображенные на рис. 6 и рис. 7. В конечном итоге отмеченный факт будет приводить к тому, что в зависимости  $f_{z, \text{пм}}(t)$  окажется нежелательная постоянная составляющая силы, которую впрочем, можно, как будет показано ниже, исключить за счет соответствующим образом организованного источника питания.

На основании вышеизложенного можно сделать первый и очень важный практический вывод, суть которого в следующем. Для получения значительных усилий при ограниченных радиально-осевых размерах подвижной части устройства требуются более сильные магнитные поля (формулы 6-8). Этого можно достичь, используя лишь более сильные постоянные магниты. Таковыми в настоящее время являются постоянные магниты типа Sm-Co (Самарий-Кобальт) и Nd-Fe-B (Ниодим-Железо-Бор), коэрцитивная сила которых  $H_c$  имеет значения от 700 до 1000  $KA/m$ . Однако, эти магниты очень дорогие и могут оказаться невыгодными с экономической точки зрения. Кроме того, при использовании таких магнитов потребуются и более мощные соленоиды. Но при ограниченных радиально-осевых размерах неподвижной части устройства в рамках конструктивного исполнения по рис. 1 может оказаться недопустимо высокой расчётная плотность тока (формула 4). Снижение расчётной плотности тока за счет уменьшения радиального размера ферромагнитного сердечника невозможно, так как это ведет к уменьшению площади поперечного сечения полезного зазора, а следовательно, и к снижению усилия (формула 6).

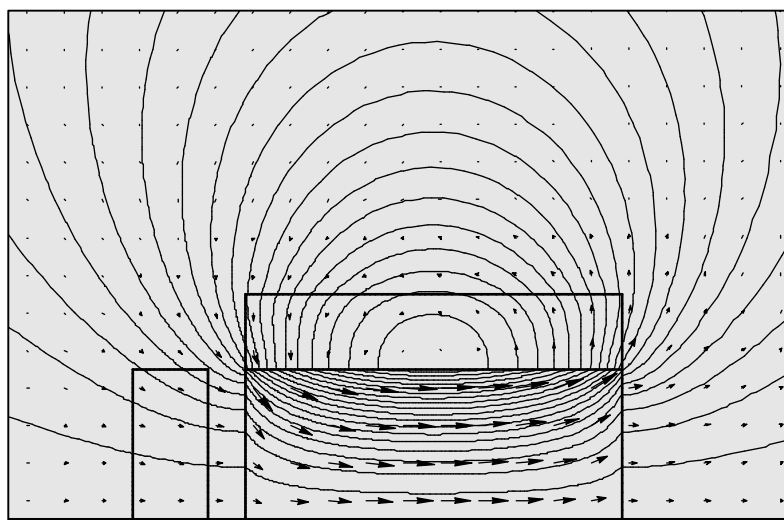
Поэтому, выбирая в качестве основной конструктивную схему, показанную на рис. 1, возможен следующий путь решения проблемы в целом.

При максимально ограниченных габаритах устройства и приемлемом значении расчётной плотности тока в катушке соленоида сначала надо определить требуемые характеристики и тип постоянного магнита и только после этого рассчитать усилие, которое может быть реализовано при заданных условиях. Результаты выполненных таким образом расчётов следует считать предельными и на их основе в дальнейшем можно уже будет вести оптимизацию всей конструкции по любым параметрам.

Тем не менее, при дальнейших исследованиях для возможности сравнения вновь получаемых результатов с уже имеющимися все выбранные и вышеприведенные исходные данные сохранены.

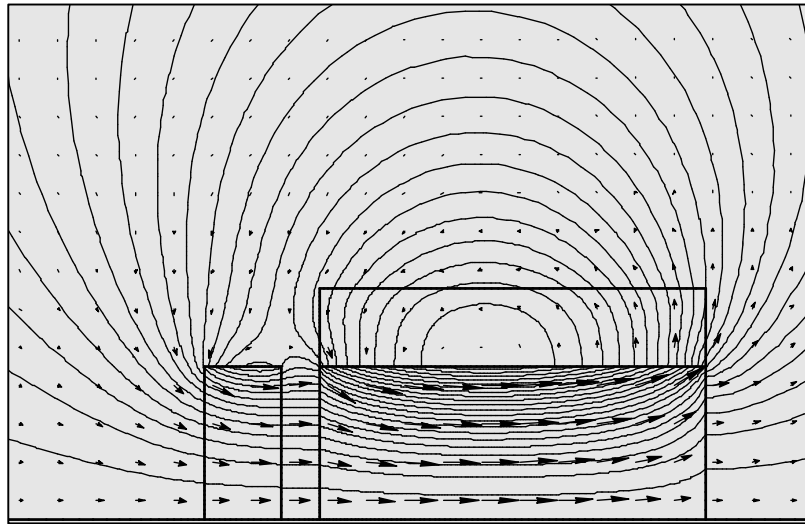


**Рис. 4.** Картина магнитного поля постоянного магнита.  
Задача №1,  $H_c = 3 \cdot 10^5 \text{ A/m}$ ,  $F_m = 3 \cdot 10^3 \text{ A}$ ,  $J_{\text{расч}} = 0$ ,  $\mu_{\text{серд}} = \mu_0$ .

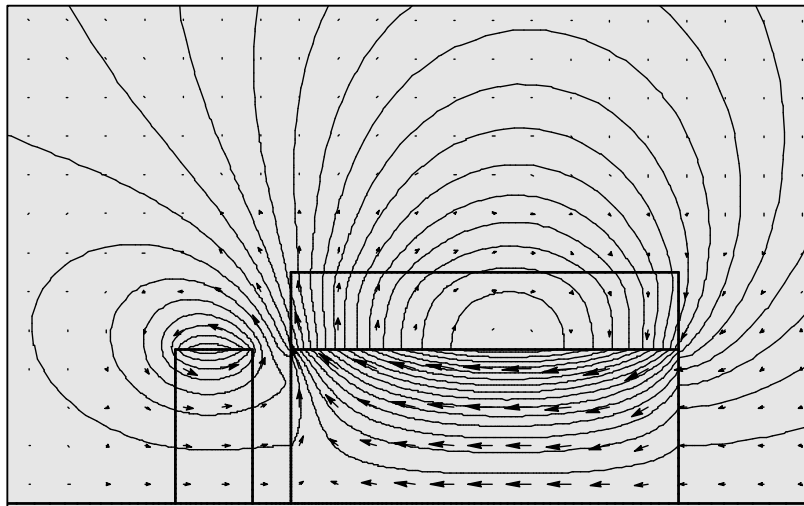


**Рис. 5.** Картина магнитного поля катушки соленоида с ферромагнитным сердечником. Задача №2,  $J_{\text{расч}} = 6 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ ,  $F_k = 3 \cdot 10^3 \text{ A}$ ,  $\mu_{\text{серд}} = \mu(H)$ ,  $H_c = 0$ .

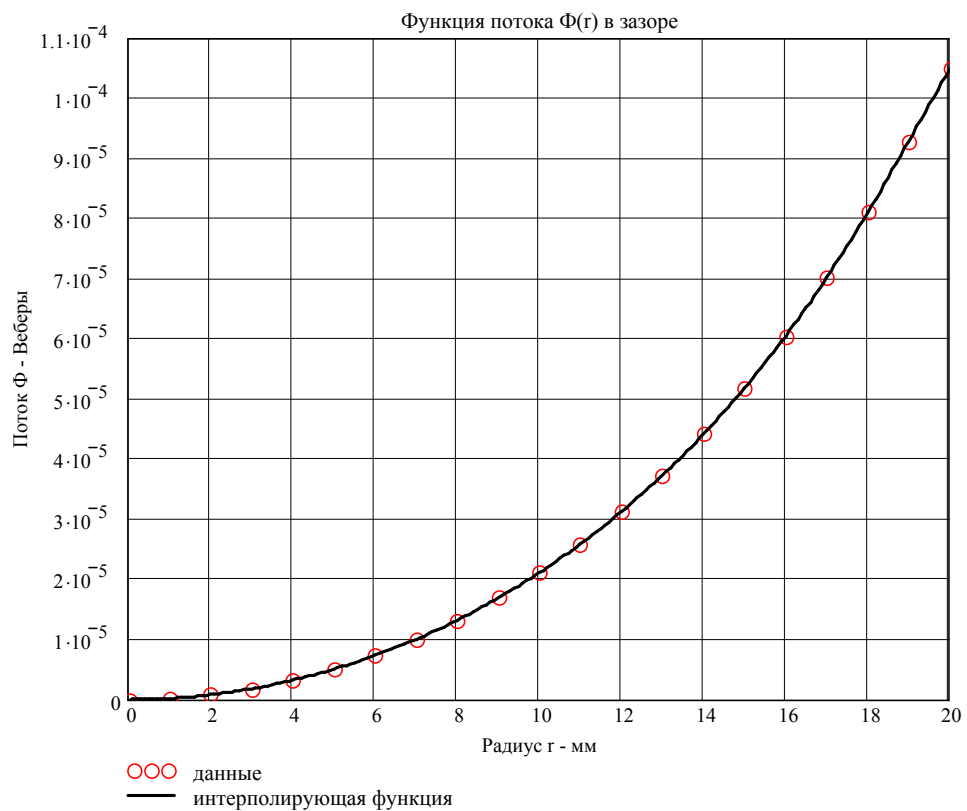
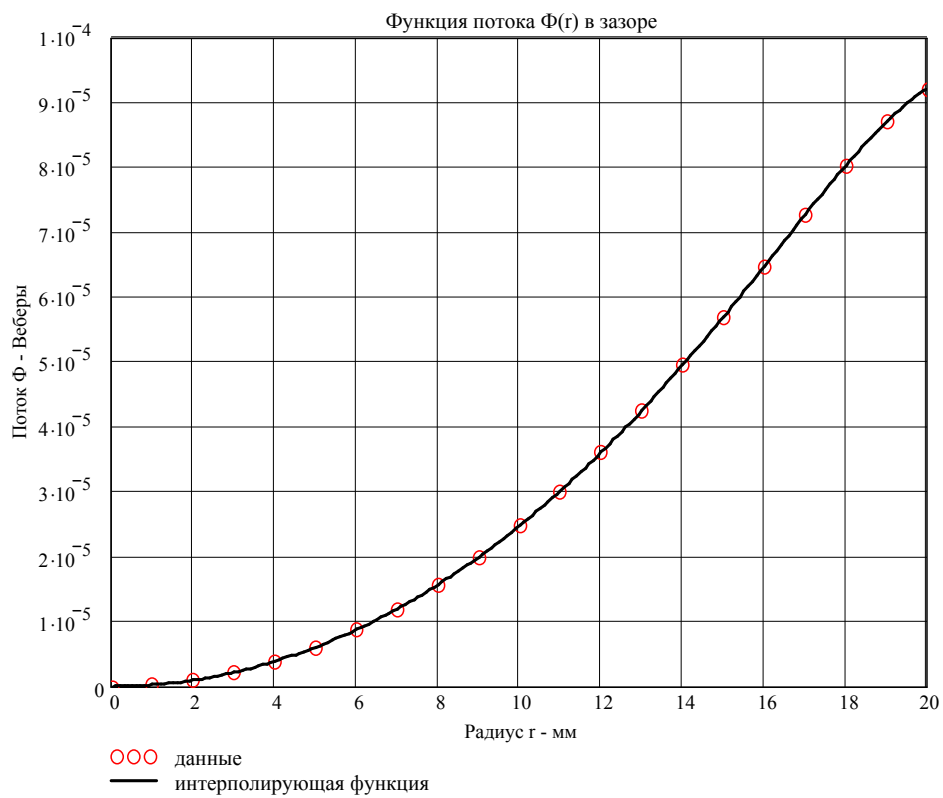




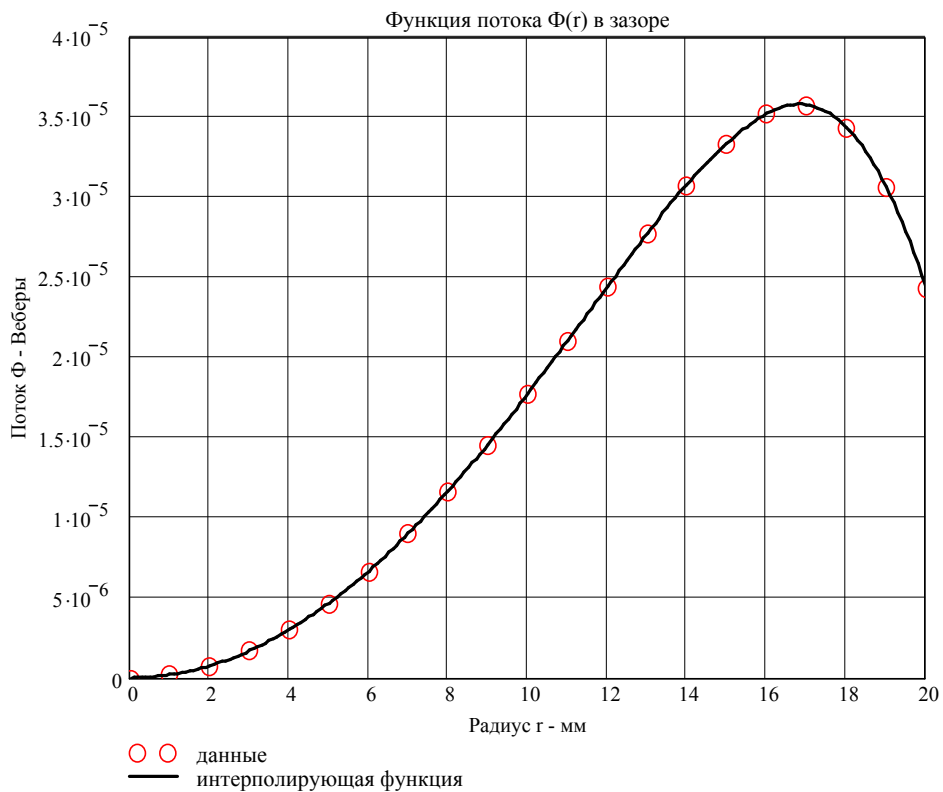
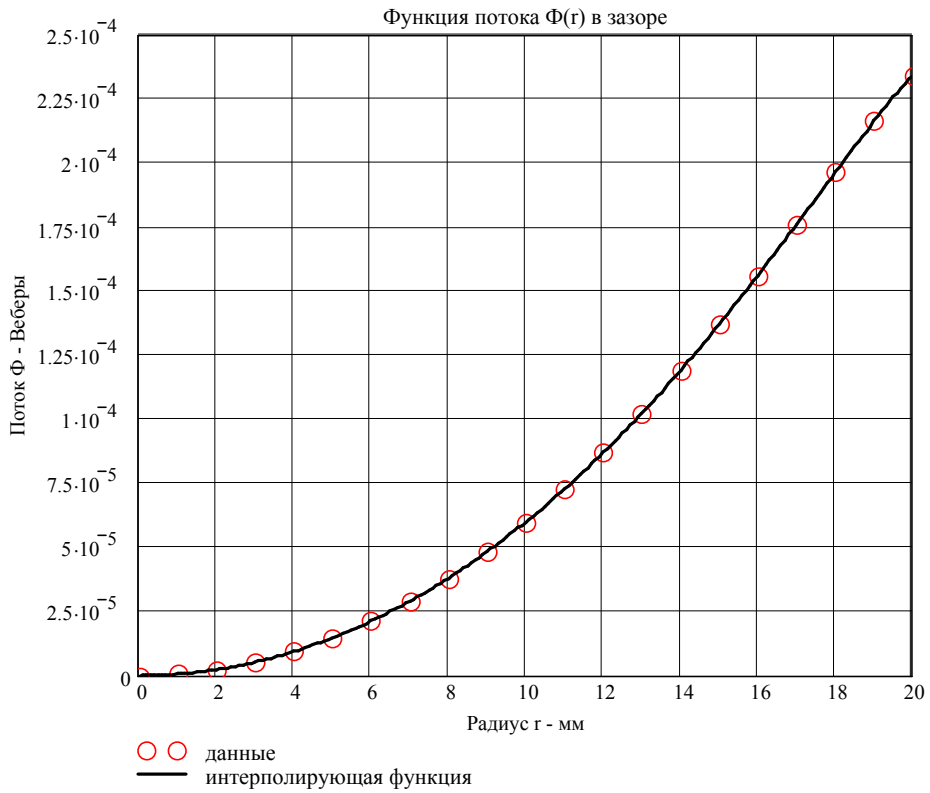
**Рис. 6.** Картина результирующего магнитного поля, когда поля постоянного магнита и катушки соленоида направлены согласно. Задача №3,  $H_c = 3 \cdot 10^5$  А/м,  $J_{расч} = 6 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>,  $\mu_{серд} = \mu(H)$ ,  $f_{пм} = 14.98$  Н



**Рис. 7.** Картина результирующего магнитного поля, когда поля постоянного магнита и катушки соленоида направлены встречно. Задача №4,  $H_c = 3 \cdot 10^5$  А/м,  $J_{расч} = -6 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>,  $\mu_{серд} = \mu(H)$ ,  $f_{пм} = -7.67$  Н



**Рис. 8.** Функции потока  $\Phi_{\delta}(r)$  в середине зазора: сверху (а) – поле постоянного магнита; внизу (б) – поле соленоида



**Рис. 9.** Функции потока  $\Phi_{\delta}(r)$  в середине зазора. Результирующие поля ПМ и КС: вверху (а) – поля ПМ и КС действуют согласно; внизу б) – поля ПМ и КС действуют встречно

В заключение, рассмотрим ещё один аспект, связанный с необходимостью использования внутри катушки соленоида сплошного ферромагнитного сердечника. В частности, при питании соленоида постоянным током наличие ферромагнитного сердечника уменьшает магнитное сопротивление (или увеличивает магнитную проводимость) для магнитного потока, создаваемого катушкой соленоида, что благоприятно сказывается как на структуре поля внутри катушки и в рабочем зазоре, так и на величине самого магнитного поля. Кроме этого, наличие ферромагнитного сердечника ведет к увеличению индуктивности катушки, что немаловажно, если по условиям задачи требуется иметь катушку с высоким импедансом. Вышесказанное иллюстрируется полевыми расчётами (пакет «ELCUT»), приведенными в таблице 2 (расчёт катушки - витки и ток - смотри ниже, в разд. 3).

Таблица 2

Катушка соленоида ( $w_k=245$ , $I_k=12,245 A$ , $F_k=w_k \cdot I_k=3000 A$ )	$\Phi_{k,max}$	$B_{k,cp}$	$\Phi_{\delta,max}$	$B_{\delta,cp}$	$L_k$
	$B\delta$	$T$	$B\delta$	$T$	$\Gamma H$
Ферромагнитный сердечник есть	$3,65 \cdot 10^{-4}$	0,29	$1,05 \cdot 10^{-4}$	0,0836	0,00595
Ферромагнитного сердечника нет	$0,706 \cdot 10^{-4}$	0,0562	$0,358 \cdot 10^{-4}$	0,0285	0,0017

Результаты таблицы 2 показывают, что наличие ферромагнитного сердечника усиливает поле внутри катушки в пять раз, поле в зазоре в три раза, а индуктивность катушки увеличивается в три с половиной раза.

С другой стороны, при питании катушки соленоида переменным током с широким диапазоном изменения частоты, наличие сплошного ферромагнитного сердечника сопровождается проявлением в нем резко выраженного поверхностного эффекта, особенно при высоких частотах. При этом магнитное поле вытесняется на наружную поверхность сердечника, а плотность индуцированного вихревого тока может достичь предельных значений, вызывая дополнительные потери в виде тепла.

Для оценки в чистом виде явлений поверхностного эффекта, когда поле постоянного магнита отсутствует, были выполнены расчёты нелинейного нестационарного переменного магнитного поля соленоида с ферромагнитным сердечником при частоте переменного тока в катушке  $f = 50$  и  $500 \Gamma\text{ц}$  (пакет «ELCUT»). Результаты таких расчётов приведены в таблице 3 и на рисунках 10-13.

Таблица 3

f	j <sub>m,расч</sub>	J <sub>вихр(0)</sub>	μ <sub>e</sub> = μ(0)	Δ <sub>a</sub>	Затухание поля	
					Численный расчёт	Плоская волна λ/2 = π · Δ <sub>a</sub>
Гц	A/мм <sup>2</sup>	A/мм <sup>2</sup>	o.e.	мм	мм	мм
50	6	6,33	293	1,5	4,5	4,7
500	6	44,2	89	0,86	2,5	2,7

На рис. 10 и 12 показано изменение во времени и соотношение расчётного значения сторонней плотности тока в катушке и плотности индуктированного вихревого тока на поверхности ферромагнитного сердечника в его центральной части, а на рис. 11 и 13 – процесс затухания плотности вихревого тока по мере проникновения магнитного поля вглубь сердечника.

Из рис. 10 и 12 следует, что плотность вихревого тока на поверхности ферромагнитного сердечника запаздывает относительно плотности тока в катушке на четверть периода, то есть на ту же величину, что и в процессе распространения плоской электромагнитной волны в проводящую ферромагнитную среду. Поэтому в таблице 3 произведено сравнение результатов численного расчёта поля в реальной конструкции с известными аналитическими решениями для плоской электромагнитной волны.

В частности, для плоской электромагнитной волны эквивалентная глубина проникновения поля Δ<sub>a</sub> равна:

$$\Delta_a = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_e \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \cdot \mu_e \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{f \mu_e \gamma \cdot 10^{-7}}}, \quad (9)$$

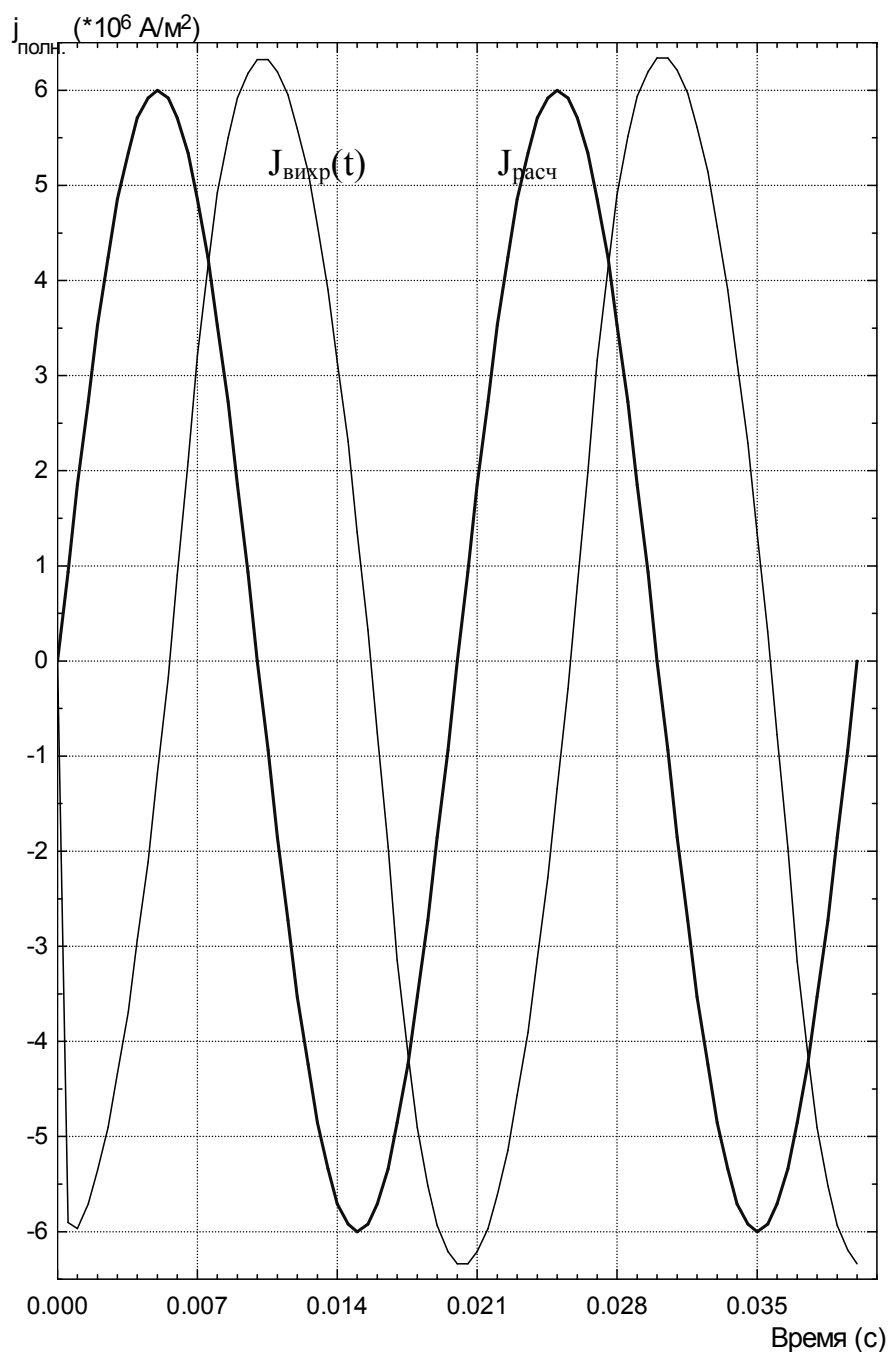
где μ<sub>e</sub> = μ(0) – относительное значение магнитной проницаемости на поверхности ферромагнитного сердечника (определяется из расчёта поля); γ – удельная электрическая проводимость материала сердечника (для Ст.3 γ = 7,69 · 10<sup>6</sup> 1/Ом·м).

При этом, плоская электромагнитная волна, проникая вглубь среды, затухает практически до нуля, как известно, на половине длины волны λ, которая равна 2π · Δ<sub>a</sub>.

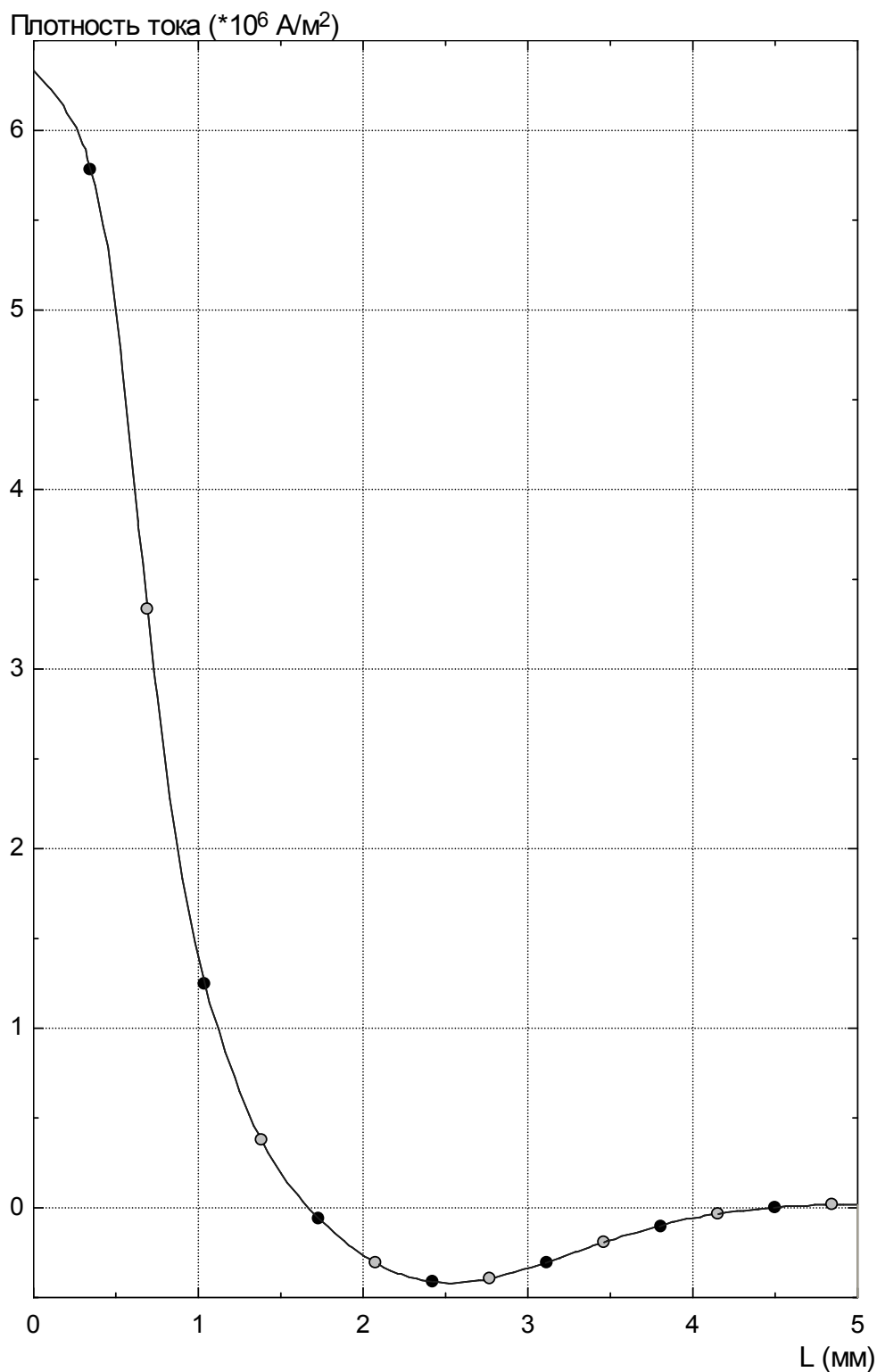
Таким образом, следует отметить, что результаты численных расчётов по затуханию поля, приведённые на рис. 11, 13 и в таблице 3, дают хорошее совпадение с аналогичными аналитическими решениями.

Однако, следует иметь ввиду, что, если на частоте 50 Гц плотность вихревого тока  $J_{\text{вихр}}(0)$  на поверхности ферромагнитного сердечника имеет ещё приемлемое значение ( $6,33 \text{ А/мм}^2$ ), то при  $f = 500 \text{ Гц}$  она недопустимо велика ( $44,2 \text{ А/мм}^2$ ). Для борьбы с этим нежелательным явлением предлагается следующее конструктивное решение в отношении ферромагнитного сердечника. Так, если на поверхности сердечника в осевом направлении профрезеровать узкие щели на глубину затухания поля, то возможность протекания вихревых токов в тангенциальном направлении будет ограничена или вовсе сведена на нет. При этом полезные свойства сердечника для проведения осевого магнитного потока сохранятся. С физической точки зрения при моделировании в пакете «ELCUT» такой конструкции в зоне расположения щелей достаточно задать значение  $\gamma = 0$ , сохранив при этом магнитную характеристику материала сердечника  $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ .

Выше отмечалось, что при питании катушки соленоида постоянным током различного направления сила притяжения постоянного магнита не равна силе отталкивания. Очевидно, что подобный эффект будет наблюдаться и при питании катушки соленоида переменным током. Для устранения данного эффекта предлагается в источник питания переменного тока вводить постоянную составляющую тока, причем такого направления, при котором небаланс сил притяжения и сил отталкивания сводился бы к нулю. Технически это осуществимо, хотя несколько и усложняет источник питания.

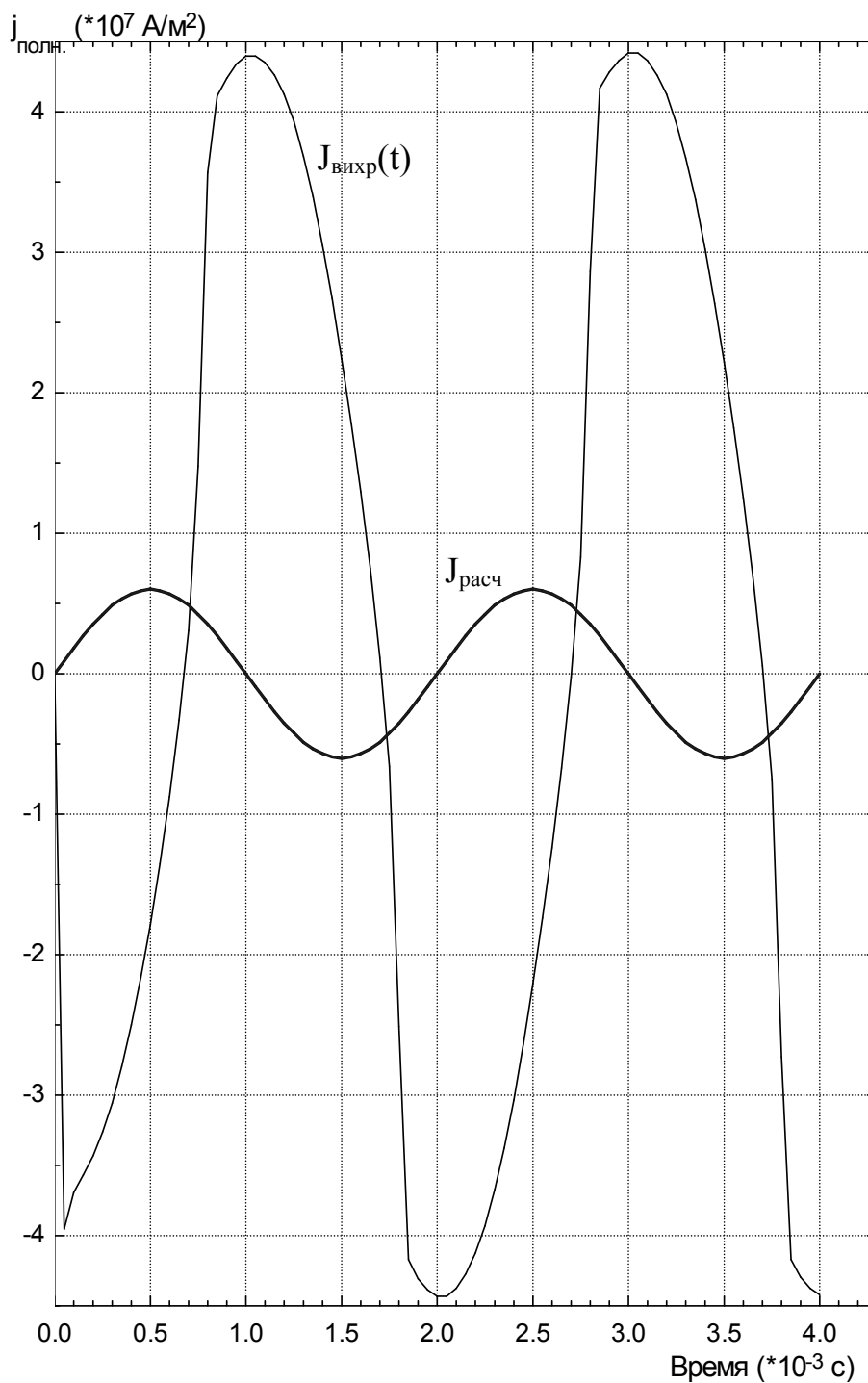


**Рис. 10.** Изменение во времени мгновенного значения плотности вихревого тока  $J_{\text{вихр}}(t)$  на поверхности ферромагнитного сердечника ( $r = 20$  ,) в его центральной части при питании катушки соленоида переменным током с расчётной плотностью тока  $J_{\text{расч}}(t) = j_{\text{м,расч}} \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t)$ .  $j_{\text{м,расч}} = 6$  A/мм<sup>2</sup>,  $f = 50$  Гц,  $T = 1/f = 0,02$  сек. Поле постоянного магнита отсутствует.

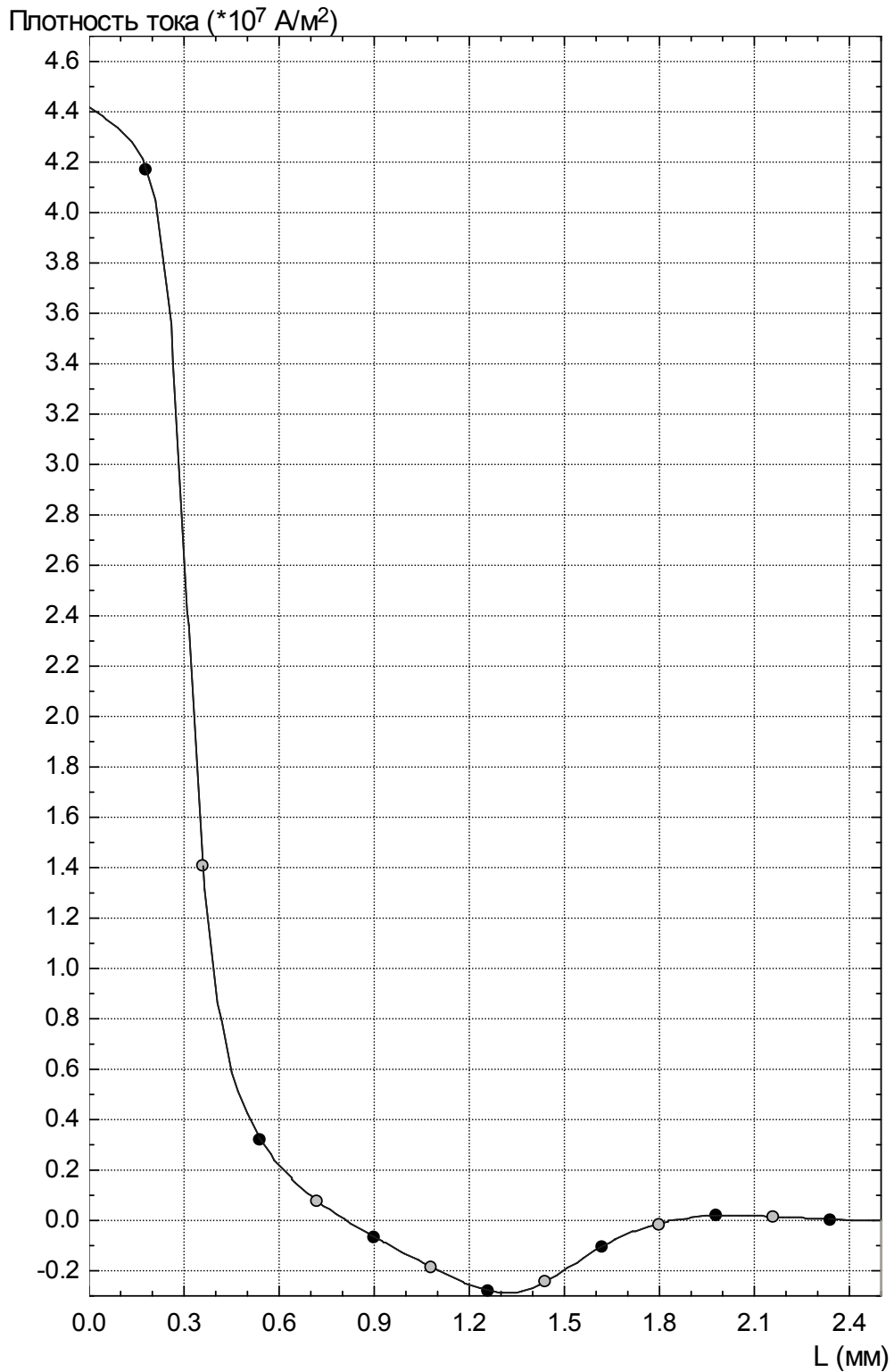


**Рис. 11.** Распределение плотности вихревого тока  $J_{\text{вихр}}(L)$  в центральной части ферромагнитного сердечника при питании катушки соленоида переменным током с расчётной плотностью  $J_{\text{расч}}(t)=6 \cdot \sin(360 \cdot 50 \cdot t)$  А/мм<sup>2</sup> для момента времени  $t=0,03$  сек. Координата  $L$  отсчитывается от поверхности сердечника к оси.  $J_{\text{вихр}}(0)=6,33$  А/мм<sup>2</sup>. Поле постоянного магнита отсутствует.





**Рис. 12.** Изменение во времени мгновенного значения плотности вихревого тока  $J_{\text{вихр}}(t)$  на поверхности ферромагнитного сердечника ( $r = 20 \text{ мм}$ ) в его центральной части при питании катушки соленоида переменным током с расчётной плотностью тока  $J_{\text{расч}}(t) = j_{\text{м,расч}} \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t)$ .  
 $j_{\text{м,расч}} = 6 \text{ А/мм}^2$ ,  $f = 500 \text{ Гц}$ ,  $T = 1/f = 0,002 \text{ сек}$ . Поле постоянного магнита отсутствует.



**Рис. 13.** Распределение плотности вихревого тока  $J_{\text{вихр}}(L)$  в центральной части ферромагнитного сердечника при питании катушки соленоида переменным током с расчётной плотностью  $J_{\text{расч}}(t)=6 \cdot \sin(360 \cdot 500 \cdot t)$  A/мм<sup>2</sup> для момента времени  $t=0,003$  сек. Координата  $L$  отсчитывается от поверхности сердечника к оси.  $J_{\text{вихр}}(0)=44,2$  A/мм<sup>2</sup>. Поле постоянного магнита отсутствует.

## Математическое моделирование электромагнитных полей и расчёт основных характеристик электромагнитного привода

На основании рассуждений и выводов, изложенных в разделе 1 настоящей статьи и в соответствии с расчётной схемой на рис. 1, дальнейшему исследованию подлежали три варианта конструкции электромагнитного привода, которые отличаются друг от друга системой питания катушки соленоида и исполнением ферромагнитного сердечника. Это следующие варианты:

1. Конструкция со сплошным ферромагнитным сердечником. Катушка соленоида запитывается током с расчётной плотностью по закону:

$$J_{\text{расч}}(t) = j_{\text{м,расч}} \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t), \quad j_{\text{м,расч}} = 6 \text{ А/мм}^2, \quad f = 50500 \text{ Гц}$$

2. Конструкция со сплошным ферромагнитным сердечником. Катушка соленоида запитывается током с расчётной плотностью по закону:

$$J_{\text{расч}}(t) = J_c + j_{\text{м,расч}} \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t), \quad j_{\text{м,расч}} = 6 \text{ А/мм}^2, \quad f = 50500 \text{ Гц}, \quad J_c \neq 0$$

3. Конструкция со сплошным ферромагнитным сердечником и осевыми шлицами. Катушка соленоида запитывается током с расчётной плотностью по закону:

$$J_{\text{расч}}(t) = J_c + j_{\text{м,расч}} \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t), \quad j_{\text{м,расч}} = 6 \text{ А/мм}^2, \quad f = 50500 \text{ Гц}, \quad J_c \neq 0,$$

где  $J_c$  – постоянная составляющая расчётной плотности тока, величина и знак которой определяются экспериментально.

Во всех вариантах:

- постоянный магнит – феррит с коэрцитивной силой  $H_c = 3 \cdot 10^5 \text{ А/м}$ ,
- ферромагнитный сердечник – Сталь 3 с кривой намагничивания  $\mathbf{B(H)}$  по рис. 2 и удельной электрической проводимостью  $\gamma_{\text{ст}} = 7,69 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ ,
- геометрические размеры конструкции по данным раздела 1 и рис. 1

$$R_{\text{м}} = 20 \text{ мм}, \quad b_{\text{м}} = 10 \text{ мм};$$

$$R_{\text{кв}} = 20 \text{ мм}, \quad R_{\text{кн}} = 30 \text{ мм}, \quad h_{\text{к}} = 10 \text{ мм}, \quad l_{\text{к}} = 50 \text{ мм};$$

$$\delta = 5 \text{ мм}, \quad R_{\delta} = 20 \text{ мм}.$$

В вариантах с осевыми шлицами в сердечнике высота шлица или толщина шлицевой зоны выбрана в соответствии с результатами рис. 11 и составила 5 мм. Магнитные свойства  $\mathbf{B(H)}$  в этой зоне те же, что и для сплошного ферромагнитного сердечника, а удельная электрическая проводимость  $\gamma_{\text{ст}}$  принимается равной нулю.

Все результаты расчётов, которые приводятся ниже, получены путем решения нелинейной задачи нестационарного магнитного поля с помощью конечно-элементного программного комплекса «ELCUT» (файлы модели см. на диске или на

сайте [www.elcut.ru](http://www.elcut.ru)). Решаемое уравнение поля, записанное через тангенциальную составляющую векторного магнитного потенциала, для осесимметричного случая в плоскости  $r, z$  имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r\mu(H)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{\mu(H)} \frac{\partial A}{\partial z} \right\} - \gamma_{ст} \frac{\partial A}{\partial t} = -J_{расч}(t) + \left( \frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right),$$

где зависимость  $\mu(\mathbf{H})$  задаётся кривой намагничивания  $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ , а  $H_{cr}$  и  $H_{cz}$  составляющие коэрцитивной силы  $H_c$  постоянного магнита.

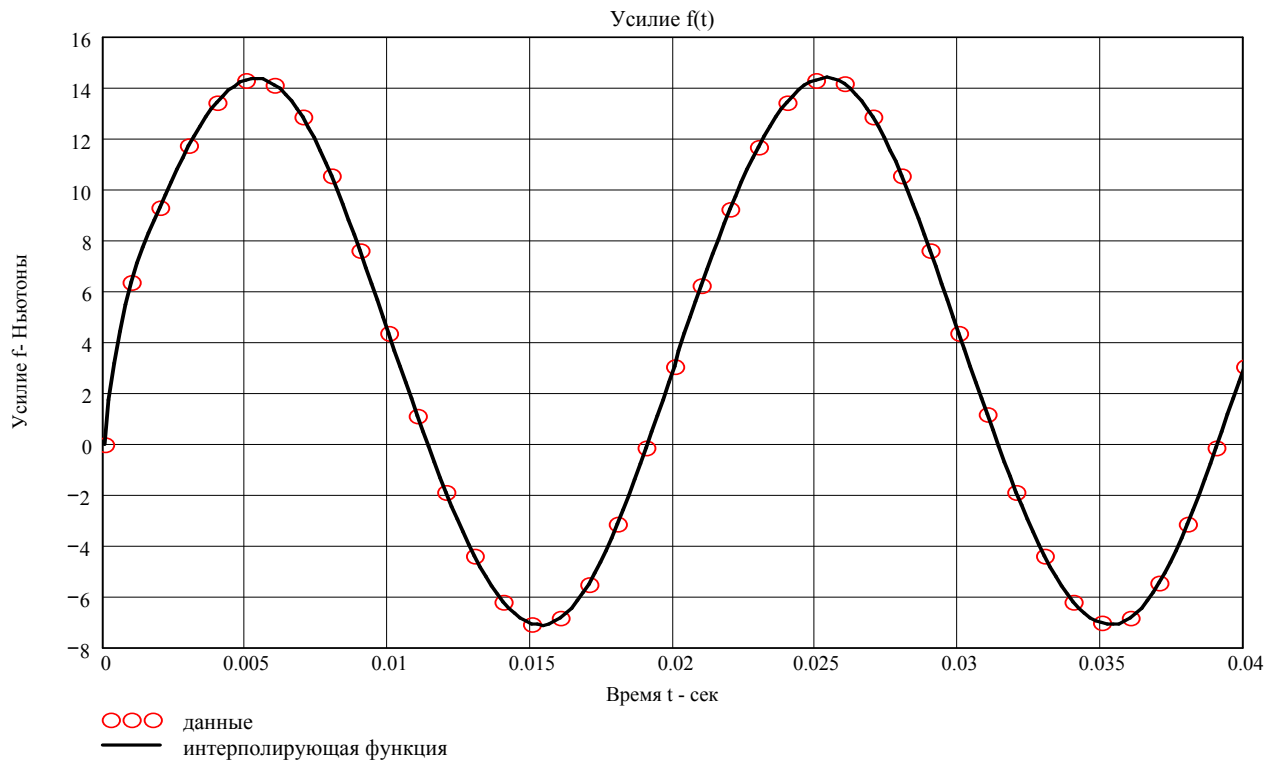
Основные результаты расчётов представлены на рис. 14-19 (это зависимости усилия  $f_{z,пм}$  в функции времени) и в таблице 4.

Таблица 4

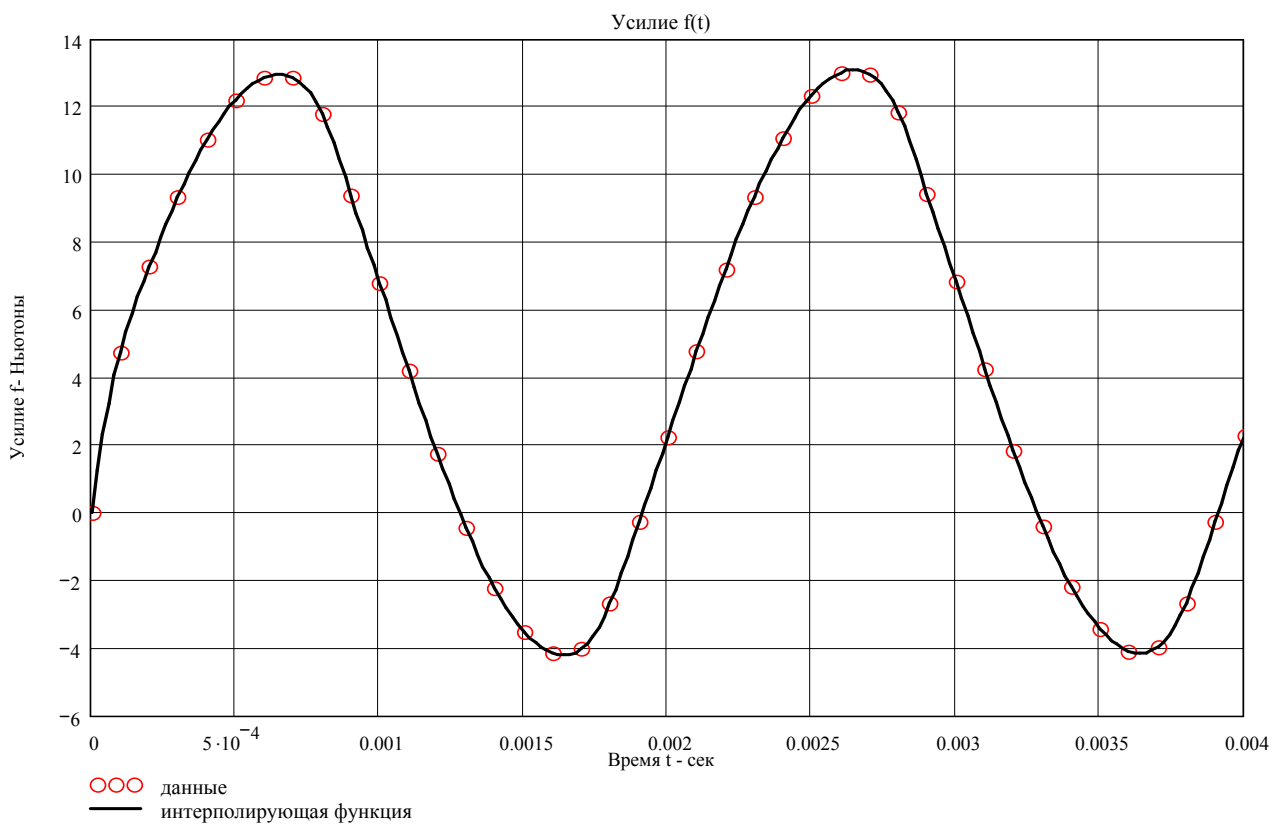
	Ед. изм.	Вариант 1 $J_c = 0$		Вариант 2 $J_c = -2 \text{ А/мм}^2$		Вариант 3 $J_c = -2 \text{ А/мм}^2$	
Частота $f$	$Гц$	50	500	50	500	50	500
Усилие $f_{z,пм}(t)$	-	Рис. 14	Рис. 15	Рис. 16	Рис. 17	Рис. 18	Рис. 19
Максимальное положительное усилие $f_{z,пм, max} = F_{прит}$	$H$	14,3	13,0	10,6	8,18	11,2	11,1
Минимальное отрицательное усилие $f_{z,пм, min} = F_{отг}$	$H$	-7,06	-4,08	-10,7	-8,18	-11,3	-11,3
Среднее значение индукции в зазоре $B_{\delta,ср}$ при $F_{прит}$	$T$	0,181	0,161	0,154	0,136	0,158	0,158
Среднее значение индукции в зазоре $B_{\delta,ср}$ при $F_{отг}$	$T$	0,0236	0,0419	0,0038	0,0154	0,0081	0,008
Индукция на поверхности сердечника в его центральной части $B_{z,серд,пов}$ при $F_{прит}$	$T$	1,62	1,92	1,588	1,829	0,538	0,563

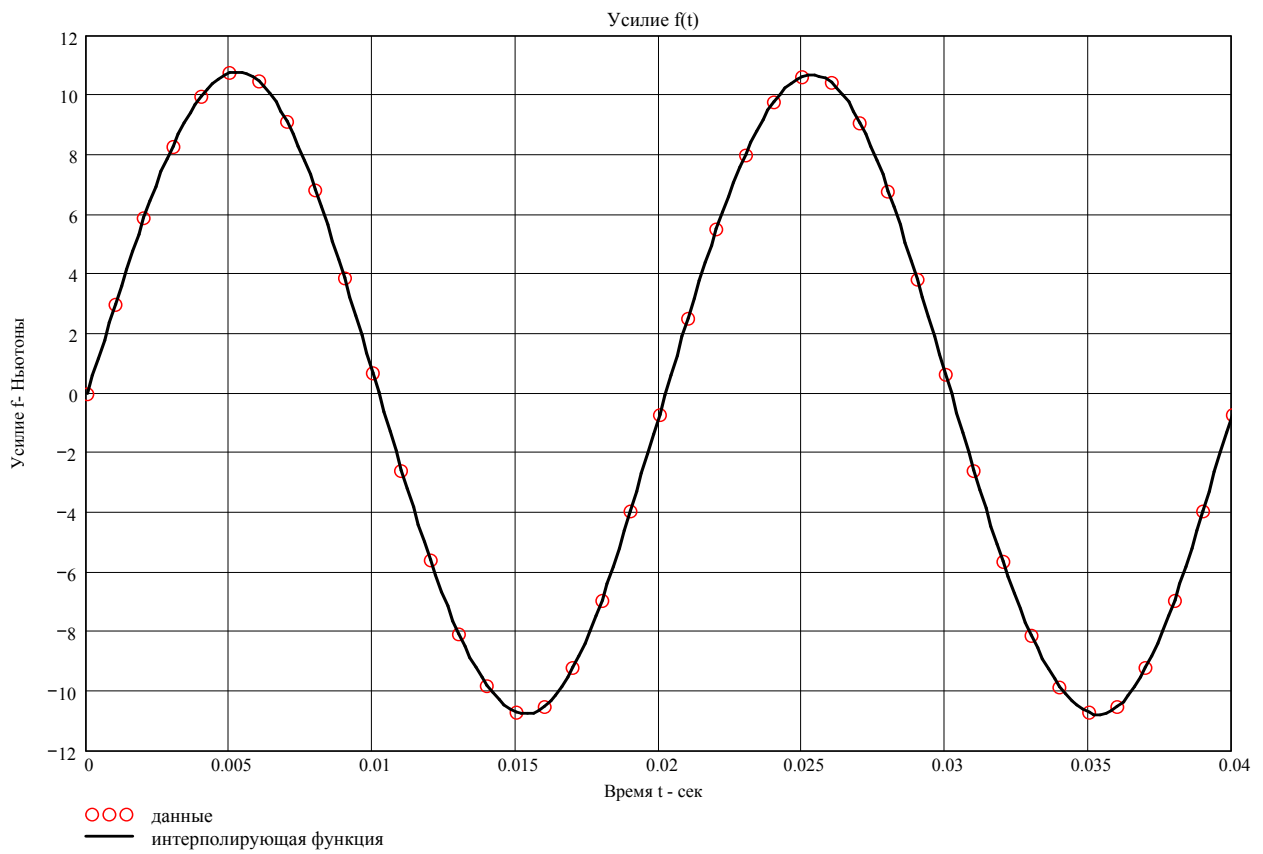
Индукция на поверхности сердечника в его центральной части $V_{z, \text{серд, пов}}$ при $F_{\text{отг}}$	$T$	-1,596	-1,896	-1,623	-1,846	-0,717	-0,77
Плотность вихревого тока в сердечнике $\delta_{\text{в, серд}}(r, t)^*$	$A/\text{мм}^2$	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,03 \text{ сек}$ 6,24	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,003 \text{ сек}$ 43,8	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,03 \text{ сек}$ 6,185	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,003 \text{ сек}$ 59,2	$r=15 \text{ мм}$ $t=0,033 \text{ сек}$ 0,877	$r=15 \text{ мм}$ $t=0,0034 \text{ сек}$ 2,27
Тепловыделение в сердечнике $Q_{\text{серд}}(r, t)^*$	$\text{Вт}/\text{с}$ $\text{м}^3$	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,03 \text{ сек}$ 5,062	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,003 \text{ сек}$ 249,7	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,03 \text{ сек}$ 4,974	$r=20 \text{ мм}$ $t=0,003 \text{ сек}$ 455,2	$r=15 \text{ мм}$ $t=0,033 \text{ сек}$ 0,1	$r=15 \text{ мм}$ $t=0,0034 \text{ сек}$ 0,672

\*)  $r = 20 \text{ мм}$  – наружный радиус сплошного ферромагнитного сердечника (смотри рис. 1);  $r = 15 \text{ мм}$  – радиус ферромагнитного сердечника, начиная с которого появляются осевые шлицы;  $t = 0,03 \text{ сек}$ ,  $0,003 \text{ сек}$  при  $r = 20 \text{ мм}$  и  $t = 0,033 \text{ сек}$ ,  $0,0034 \text{ сек}$  при  $r = 15 \text{ мм}$  – значения времени, при которых значения плотности вихревого тока в сердечнике достигают своего максимального значения (смотри, например, рис. 10 и 12).

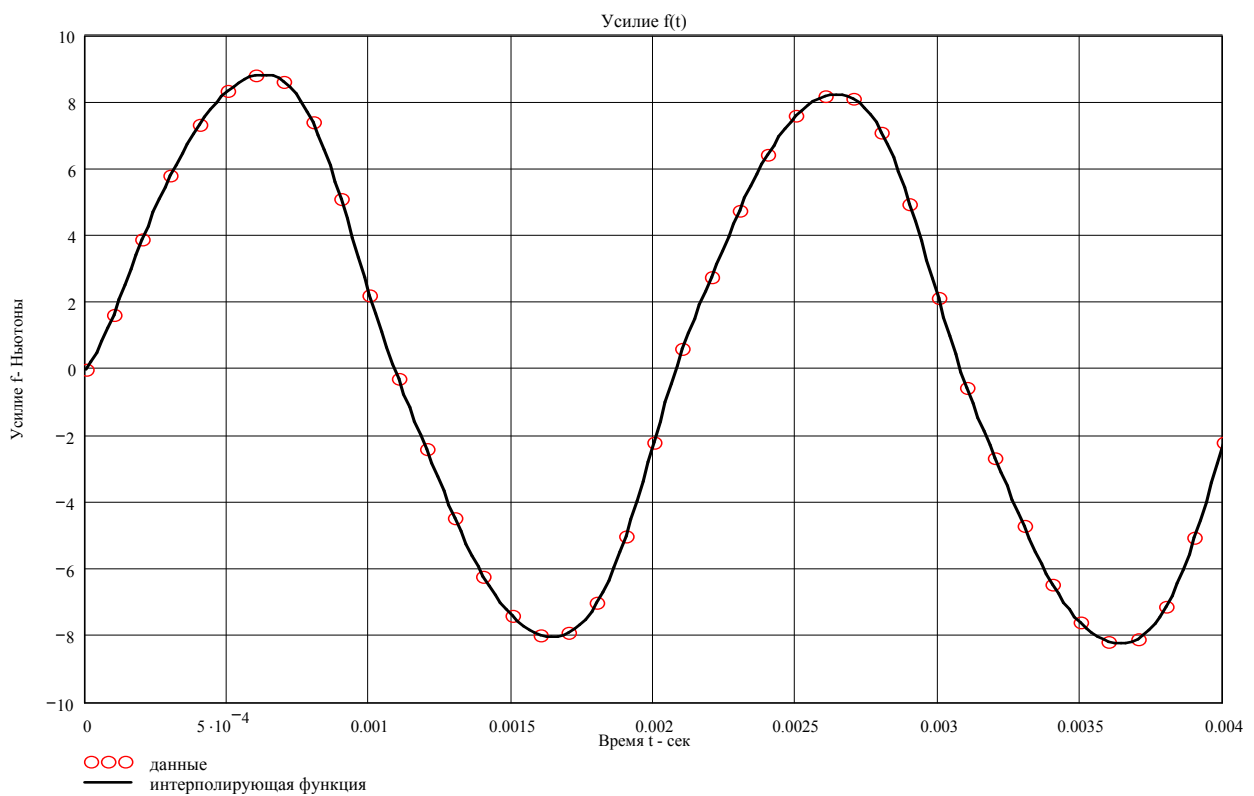


**Рис. 14.** Катушка соленоида со сплошным ферромагнитным сердечником. Вариант 1:  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $J_c = 0$ .

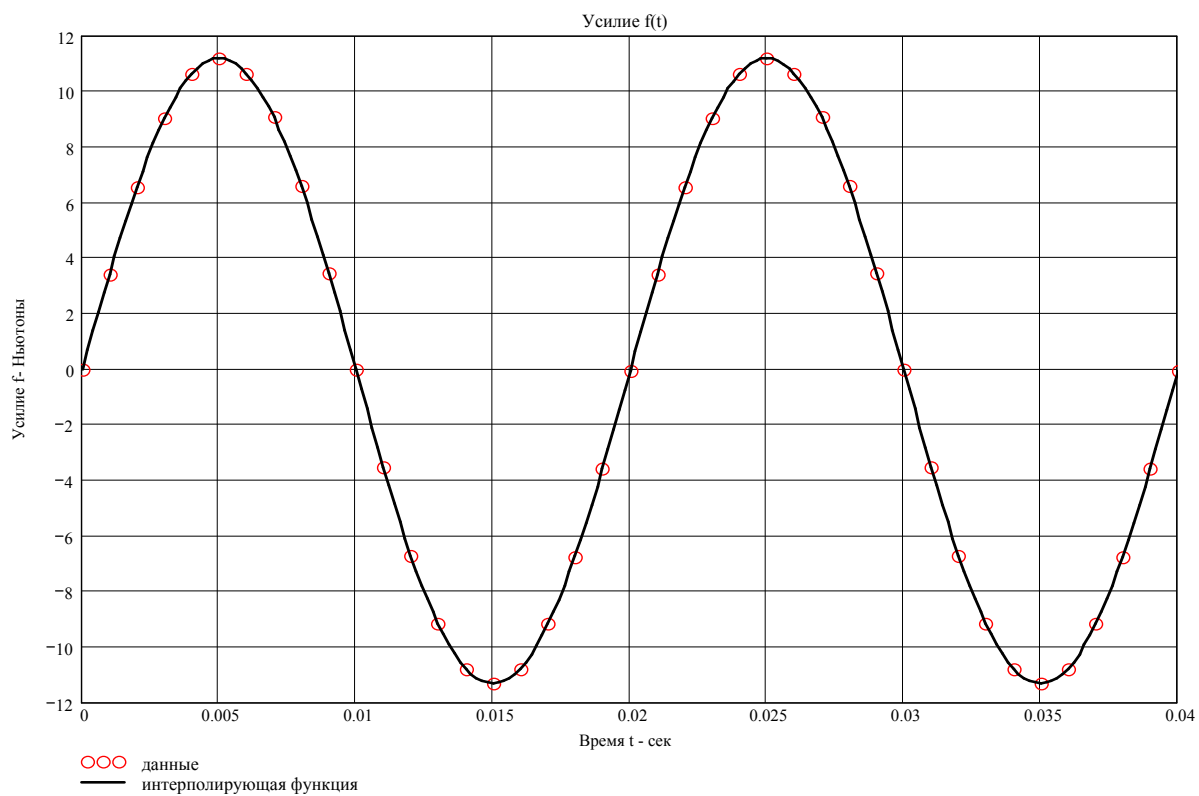




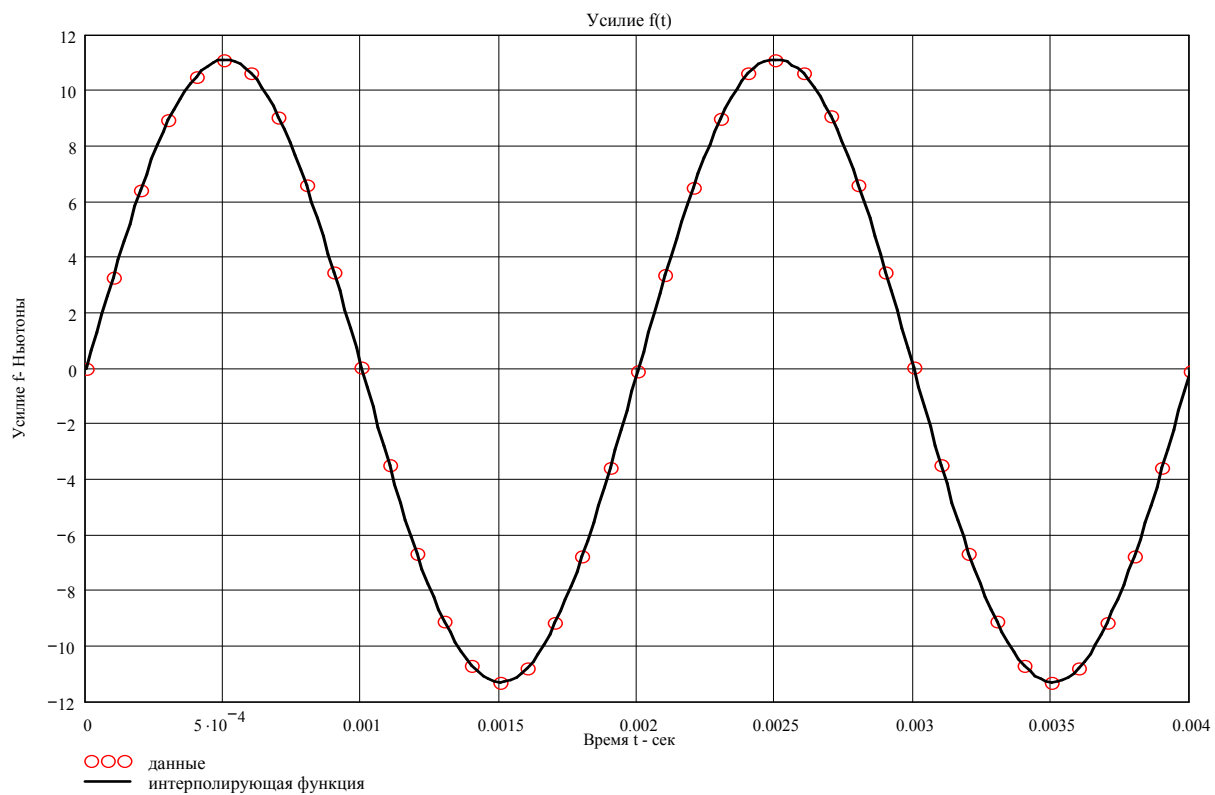
**Рис. 16.** Катушка соленоида со сплошным ферромагнитным сердечником. Вариант 2:  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $J_c = -2 \text{ А/мм}^2$ .



**Рис. 17.** Катушка соленоида со сплошным ферромагнитным сердечником. Вариант 2:  $f = 500 \text{ Гц}$ ,  $J_c = -2 \text{ А/мм}^2$ .



**Рис. 18.** Катушка соленоида с ферромагнитным сердечником и осевыми шлицами. Вариант 3:  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $J_c = -2 \text{ А/мм}^2$ .



**Рис. 19.** Катушка соленоида с ферромагнитным сердечником и осевыми шлицами. Вариант 3:  $f = 500 \text{ Гц}$ ,  $J_c = -2 \text{ А/мм}^2$ .



Анализ полученных результатов моделирования и расчётов позволяет сделать следующие выводы и показывает, что:

1. Во всех трёх вариантах расчёта знакопеременное усилие, действующее на постоянный магнит, уже на втором периоде нестационарного процесса достигает установившихся значений и изменяется по гармоническому (практически синусоидальному) закону.
2. В варианте 1 на обеих крайних частотах сила притяжения постоянного магнита не равна силе отталкивания, в результате чего появляется постоянная составляющая силы, которая тем больше, чем больше частота переменного тока, питающего катушку соленоида электромагнитного привода.
3. В вариантах 2 и 3 введение в цепь питания постоянной составляющей тока определенного направления и значения выравнивает абсолютные значения сил притяжения и отталкивания. Постоянная составляющая силы исчезает, а кривая знакопеременного усилия становится симметричной относительно оси времени.
4. Средние значения магнитной индукции результирующего поля в зазоре, когда магнитные поля постоянного магнита и катушки соленоида действуют согласно и встречно, имеют приемлемые значения, мало отличающиеся от тех величин, которые приведены в таблице 1.
5. В вариантах 1 и 2 значения магнитной индукции на поверхности ферромагнитного сердечника в его центральной части допустимы, хотя и соответствуют колену кривой намагничивания при частоте  $50 \text{ Гц}$  и уровню насыщения ферромагнитного материала при частоте  $500 \text{ Гц}$ . Лучшие результаты здесь получаются в варианте 3.
6. Во всех вариантах расчёта (когда  $f_{z, \text{пм}, \text{max}} = F_{\text{прит}}$ ) значительные различия между индукциями магнитного поля в зазоре и на поверхности сердечника указывают на большие поля рассеяния в этих вариантах, что объясняется относительно большим и тем не менее необходимым зазором между постоянным магнитом и катушкой соленоида. Лучшие результаты в этом плане получаются в варианте расчёта 3.
7. В вариантах 1 и 2 плотности вихревых токов и тепловыделения на поверхности ферромагнитного сердечника имеют приемлемые значения только на частоте

50 Гц и совершенно недопустимы при  $f = 500$  Гц. Опять же лучшие результаты здесь наблюдаются в варианте расчёта 3.

Таким образом, согласно вышеизложенному, по всем показателям наиболее предпочтительным оказывается вариант конструкции под номером 3 и поэтому именно его предлагается использовать для создания опытного образца электромагнитного привода.

### 3. Расчёт обмотки соленоида электромагнитного привода

Выбираем провод марки ПЭТ-155 (ГОСТ 21428-75). Это круглый провод, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости. Ему соответствует:

Класс изоляции – В

Рабочая температура –  $t_p = 130$  °С (длительно)

Перегрев –  $t_{п} = 110$  °С

Температурный коэффициент увеличения сопротивления

$$K_{110^{\circ}} = 1 + 0,004 \cdot t_{п} = 1 + 0,004 \cdot 110 = 1,44$$

В результате ряда последовательных приближений выбранный провод имеет следующие геометрические размеры:

- диаметр неизолированного провода  $d_{неиз} = 1,16$  мм

- диаметр изолированного провода  $d_{из} = 1,24$  мм

- сечение неизолированного провода  $S_{неиз} = 1,057$  мм<sup>2</sup>

Далее расчёт ведётся следующим образом:

1. Окно под обмотку (катушку) соленоида имеет сечение (смотри рис. 1)

$$S_k = h_k \cdot l_k = 10 \cdot 50 = 500 \text{ мм}^2$$

2. Число слоёв  $n_{сл}$  по высоте катушки  $h_k$  при коэффициенте плотности намотки

$$\kappa_{п} = 0,85-0,9 \text{ (}\kappa_{п,ср} = 0,875\text{) равно:}$$

$$n_{сл} = \frac{h_k \cdot \kappa_{п,ср}}{d_{из}} = \frac{10 \cdot 0,85}{1,24} = 7,056$$

принимаем  $n_{сл} = 7$ .

3. Число витков в слое  $w_{сл}$  при  $\kappa_{п,ср}$  равно:  $w_{сл} = \frac{l_k \cdot \kappa_{п,ср}}{d_{из}} = \frac{50 \cdot 0,85}{1,24} = 35,28$

принимаям  $w_{\text{сл}} = 35$ .

4. Общее число витков в катушке  $w_k$  будет равно:  $w_k = n_{\text{сл}} \cdot w_{\text{сл}} = 7 \cdot 35 = 245$

5. Полный ток катушки  $I_{\Sigma, k}$  (или намагничивающая сила обмотки соленоида) определится, как-

$$I_{\Sigma, k} = J_{\text{расч}}(t) \cdot S_k = [J_c + j_{m, \text{расч}} \sin(360 \cdot f \cdot t)] \cdot S_k = [-2 + 6 \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t)] \cdot 500 = \\ = [-1000 + 3000 \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t)] A = I_{\Sigma, k, c} + I_{\Sigma, k, m} \cdot \sin(360 \cdot f \cdot t),$$

где  $I_{\Sigma, k, c} = -1000 A$  - полный ток катушки по постоянной составляющей плотности тока  $J_c$ ,

$I_{\Sigma, k, m} = 3000 A$  - полный ток катушки по амплитуде переменной составляющей плотности тока  $j_{m, \text{расч}}$ .

6. Постоянная составляющая реального тока катушки и амплитуда переменной составляющей реального тока катушки будут равны:

$$I_{c, k} = \frac{I_{\Sigma, k, c}}{w_k} = \frac{-1000}{245} = -4.082 A, \quad I_{m, k} = \frac{I_{\Sigma, k, m}}{w_k} = \frac{3000}{245} = 12.245 A$$

7. Реальные значения плотностей токов катушки по постоянной и переменной составляющим окажутся следующими:

$$j_{c, k} = \frac{I_{c, k}}{S_{\text{неиз}}} = \frac{-4.082}{1.057} = -3.862 A, \quad j_{m, k} = \frac{I_{m, k}}{S_{\text{неиз}}} = \frac{12.245}{1.057} = 11.585 A$$

8. Реальные действующие значения тока и плотности тока катушки по переменной составляющей:

$$I_k = \frac{I_{m, k}}{\sqrt{2}} = \frac{12.245}{\sqrt{2}} = 8.66 A, \quad j_k = \frac{j_{m, k}}{\sqrt{2}} = \frac{11.585}{\sqrt{2}} = 8.19 A$$

9. Средняя длина витка катушки:

$$l_{w, k, \text{cp}} = 2\pi R_{k, \text{cp}} = 2\pi \frac{R_{k, \text{в}} + R_{k, \text{н}}}{2} = \pi(20 + 30) = 157.08 \text{ мм}$$

10. Длина провода катушки:

$$L_{\text{пр}, k} = l_{w, k, \text{cp}} \cdot w_k = 157.08 \cdot 245 = 38.485 \text{ м}$$

11. Активное сопротивление катушки при комнатной температуре  $t = 20^\circ \text{C}$ :

$$R_k^{(20^\circ)} = \frac{L_{\text{пр}, k}(\text{м})}{57 \cdot S_{\text{неиз}}(\text{мм}^2)} = \frac{38.485}{57 \cdot 1.057} = 0.63876 \text{ Ом}$$

12. Активное сопротивление катушки при рабочей температуре  $t_p = 130 \text{ }^\circ\text{C}$  (перегрев  $t_{\text{п}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ):

$$R_k = R_k^{(130^\circ)} = R_k^{(20^\circ)} \cdot K_{110^\circ} = 0.63876 \cdot 1.44 = 0.92 \text{ Ом}$$

13. Индуктивность катушки  $L_k$ . Определяется с помощью «Мастера индуктивностей» программного комплекса «ELCUT» из расчёта магнитостатического поля при питании катушки соленоида постоянным током. Она равна (смотри таблицу 2):  $L_k = 0.00595 \text{ Гн}$

14. Индуктивное сопротивление катушки  $X_k$ :

$$\text{при } f = 500 \text{ Гц} - X_{k,500} = 2\pi \cdot f \cdot L_k = 2\pi \cdot 500 \cdot 0.00595 = 18,71 \text{ Ом}, \text{ при } f = 50 \text{ Гц} - X_{k,50} = 1,871 \text{ Ом}$$

15. Полное сопротивление катушки  $Z_k$  :

$$\text{при } f = 500 \text{ Гц} - Z_{k,500} = \sqrt{R_k^2 + X_{k,500}^2} = \sqrt{0.92^2 + 18.71^2} = 18.73 \text{ Ом}$$

$$\text{при } f = 50 \text{ Гц} - Z_{k,50} = \sqrt{R_k^2 + X_{k,50}^2} = \sqrt{0.92^2 + 1.871^2} = 2.085 \text{ Ом}$$

16. Амплитуды напряжений питания катушки соленоида по переменной и постоянной составляющим будут равны:

$$\text{при } f = 500 \text{ Гц} - U_{m,k,500} = I_{m,k} \cdot Z_{k,500} = 12,245 \cdot 18,73 = 229,3 \text{ В},$$

$$\text{при } f = 50 \text{ Гц} - U_{m,k,50} = I_{m,k} \cdot Z_{k,50} = 12,245 \cdot 2,085 = 25,5 \text{ В},$$

$$U_{c,k} = I_{c,k} \cdot R_k = -4,082 \cdot 0,92 = -3,75 \text{ В}$$

В заключение следует отметить, что адекватность вышеизложенной методики расчёта электромагнитного привода может быть проверена после экспериментальных исследований опытного образца.

### Об авторе

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