

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Татевосян А.А.

ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», karo1@mail.ru

В статье рассмотрено решение задачи оптимального проектирования магнитной системы линейного магнитоэлектрического привода для испытания вязкоупругих свойств эластомеров. Общий подход к оптимальному проектированию магнитоэлектрического привода требует учета комплекса факторов, определяющих значения параметров привода, которые удовлетворяли бы различным критериям оптимальности [1, 2, 5, 7]. При разработке устройства для исследования реологических характеристик вязкоупругих материалов наиболее жесткие требования предъявляются к создаваемому на прижимном штоке рабочему усилию, регламентируемого стандартом испытаний ASTM, поэтому в случае проектного расчета магнитоэлектрического привода, предусматривающего решение задачи оптимизации, исходными данными будут выходные параметры, то есть значение тягового усилия на штоке якоря. При этом определению подлежат конфигурация магнитной системы, геометрические размеры, материал магнитопровода и постоянного магнита, обмоточные данные и другие параметры, при которых значение тягового усилия может быть реализовано наилучшим способом. Очевидно, наилучшим из множества вариантов конструктивного исполнения магнитной системы привода следует считать тот, который реализует заданные технические условия и удовлетворяет определенному критерию оптимальности.

Ключевые слова: магнитная система, электромагнитное поле, схема замещения, реология, оптимизация.

OPTIMIZATION PARAMETERS MAGNETIC SYSTEM FOR LINEAR MAGNETOELECTRIC ACTUATOR

Tatevosyan A.A.

Omsk State Technical University, Russia, 644050, Omsk, Mira Avenue, 11. E-mail: karo1@mail.ru

The paper considers the problem of optimal design of the magnetic system of linear magnetoelectric drive for testing the viscoelastic properties of elastomers. A general approach to optimal design of magnetoelectric drive, requires consideration of factors that determine the parameter settings that meet various criteria of optimality [1, 2, 5, 7]. When designing devices for the study of the rheological properties of viscoelastic materials, the most stringent requirements for creating presser rod operating force, regulated by the standard test ASTM, so in the case of design calculation magnetoelectric drive, providing a solution of the optimization problem, the original data will be output parameters, ie value of the driving force to the anchor rod. Thus, subject to the definition of the configuration of the magnetic system, geometry, material and the permanent magnet magnetic circuit, winding the data and other parameters, under which the value of the traction force may be realized best way. Obviously, the best of the many variants of embodiment of the magnetic drive system should be considered as one that implements the given specifications and meets the specific criteria of optimality.

Keywords: magnetic system, the electromagnetic field, equivalent circuit, rheology, optimization.

Конфигурация магнитных цепей магнитоэлектрических, так же как и электромагнитных устройств разнообразна и зависит от их назначения. Существуют два основных типа магнитных систем: разветвленные и неразветвленные (последовательные). В неразветвленных магнитных цепях основной магнитный поток проходит последовательно через все участки. В разветвленной цепи основной магнитный поток разделяется на несколько отдельных параллельных потоков. Магнитные цепи магнитоэлектрических устройств могут при этом формироваться с использованием постоянных магнитов, намагниченных как в аксиальном, так и в радиальном направлении.

Применительно к магнитоэлектрическому приводу (МЭП), предназначенному для проведения испытаний вязкоупругих свойств эластомеров, для оптимизации его магнитной системы выбрать максимум силы тяги, руководствуясь следующими причинами:

- вязкоупругие свойства опытного образца эластомера определяются в условиях статического и динамического нагружения, при которых общим параметром выступает тяговое усилие, развиваемое приводом;
- значением тягового усилия устанавливается конечная деформация сжатием опытного образца эластомера. Осуществляя ступенчатое увеличение нагрузки с постоянным приращением напряжения (или деформации) на каждом шаге и производя остановку нагружения, можно наблюдать падение напряжения вследствие явления релаксации, отражающего процессы аккомодационной перестройки дефектной (дислокационной) структуры опытного образца эластомера под действием внешних и внутренних напряжений.

На рис. 1 приведены различные виды конструкций магнитных систем МЭП, выполненных с использованием магнитов намагниченных в радиальном направлении (рис. 1 а, б) и с магнитами, намагниченными в аксиальном направлении (рис. 2.1 в, г).

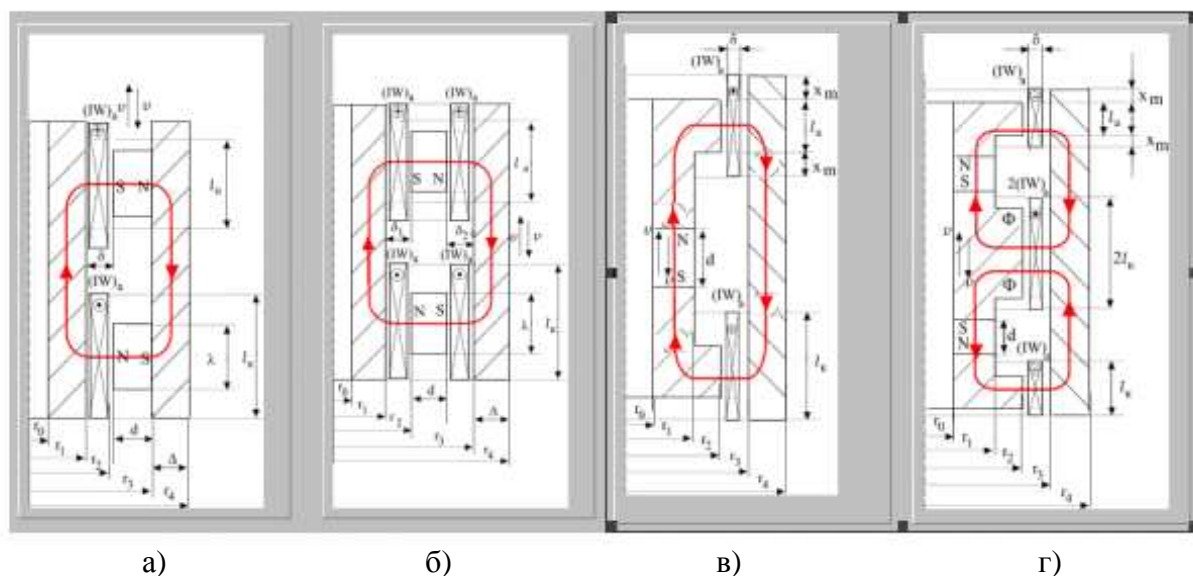


Рис. 1. Магнитные системы МЭП с магнитами, намагниченными в радиальном (а, б) и аксиальном направлении (в, г): а – МЭП с одним воздушным каналом; б – МЭП с двумя воздушными каналами; в – МЭП с одной парой полюсов; г – МЭП с двумя парами полюсов

Проведем оптимизацию МЭП по максимуму силы тяги со следующими допущениями:

1. Магнитное сопротивление стали мало, и им можно пренебречь вследствие значительного рабочего зазора на пути основного магнитного потока;
2. Высота активной части обмотки, расположенной на пути основного магнитного потока, определяется посредством операции умножения высоты полюса на значение поправочного коэффициента, учитывающего выпучивание магнитного потока в зазоре;

3. В пределах активной части обмотки индукция магнитного поля постоянна и равна среднему значению индукции в зазоре;
4. Плотность тока по сечению обмотки распределяется равномерно;
5. Магнитные потоки реакции и рассеяния не учитываются.

Принятые допущения при решении задачи оптимизации поэтапно могут сниматься результатами численного расчета магнитного поля привода с использованием МКЭ [3, 6].

Магнитная система МЭП с одним воздушным каналом и магнитами, намагниченными в радиальном направлении (рис. 1, а).

С учетом принятых допущений сила тяги МЭП определяется выражением:

$$F_{ЭМ} = 2 B_{cp} \ell_{cp.обм} (IW)_a = 2 B_{cp} \ell_{cp.обм} \ell_a \delta k_z J = 2 B_{cp} Q_{\delta} \delta k_z J = 2 B_m Q_m \delta k_z J, \quad (1)$$

где B_{cp} – среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре; $\ell_{cp.обм}$ – средняя длина витка обмотки; $(IW)_a$ – активная часть ампервитков обмотки в зоне действия основного магнитного потока; ℓ_a – высота активной части обмотки; δ – рабочий зазор; k_z – коэффициент заполнения обмотки; J – плотность тока; Q_{δ} – площадь рабочего зазора; B_m – индукция в нейтральном сечении постоянного магнита; Q_m – площадь нейтрального сечения постоянного магнита.

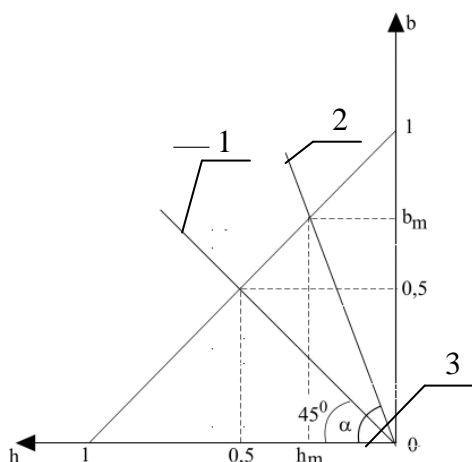


Рис. 2. К расчету магнитной цепи МЭП. 1 – характеристика размагничивания постоянного магнита; 2 – луч проводимости рабочего зазора ($\lambda_{\delta}^* = \text{const}$); 3 – луч проводимости рабочего зазора для оптимальной геометрии магнитной системы МЭП $\lambda_{\delta \text{ опт}}^* = 1$.

Индукция в нейтральном сечении постоянного магнита определяется координатами точки пересечения кривой размагничивания магнита из материала фенибор и луча, соответствующего относительной проводимости воздушного зазора Λ_{δ}^* (рис. 2), которую можно определить путем решения системы уравнений [2, 4]:

$$\begin{cases} b = 1 - h \\ b = h \Lambda_{\delta}^* \end{cases}, \quad (2)$$

где $h = \frac{H}{H_c}$ и $b = \frac{B}{B_r}$ – соответственно относительная напряженность и индукция; H_c – коэрцитивная сила магнита; B_r – остаточная индукция;

$$\Lambda_{\delta}^* = \frac{\Lambda_{\delta}}{\Lambda_m}; \quad \Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2 \delta}$$

проводимость рабочего зазора на пару полюсов; $\Lambda_m = \frac{B_r Q_m}{2 H_c d}$ – проводимость магнита на пару полюсов; d – длина магнита по оси намагничивания.

Решение системы (2) имеет вид:

$$b_m = \frac{B_m}{B_r} = \frac{\Lambda_\delta^*}{1 + \Lambda_\delta^*}. \quad (3)$$

Подставляя решение (3) в выражение силы тяги (1), получим:

$$F_{\text{ЭМ}} = 2B_r \frac{\Lambda_\delta^*}{1 + \Lambda_\delta^*} Q_m \delta k_z J, \quad (4)$$

где $\Lambda_\delta^* = \mu_0 \frac{H_c}{B_r} \frac{Q_\delta}{Q_m} \frac{d}{\delta}$.

Удельное тяговое усилие магнитоэлектрического привода определяется отношением силы тяги к суммарной массе активной части обмоток и постоянных магнитов, то есть:

$$F_{\text{ЭМ.уд}} = \frac{F_{\text{ЭМ}}}{m_{\text{акт.обм.}} + m_M} = B_r \frac{\Lambda_\delta^*}{1 + \Lambda_\delta^*} \frac{Q_m \delta k_z J}{(\gamma_{\text{обм}} \delta Q_\delta + \gamma_M d Q_M)}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{обм}}, \gamma_M$ – соответственно плотности используемых материалов для изготовления обмоточного провода и постоянного магнита, принимающие значения $\gamma_{\text{обм}} = 8900 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_M = 7500 \text{ кг/м}^3$.

Используем обозначения $n = \frac{d}{\delta}$ и $k_M = \frac{m_{\text{акт.обм.}}}{m_M}$ для преобразования выражения (5) к виду:

$$F_{\text{ЭМ.уд}} = \frac{\mu_0 H_c k_z J}{\gamma_{\text{обм}}} \frac{k_M}{(1 + k_M)} \frac{n}{\left(1 + \frac{\mu_0 H_c}{B_r} \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}}} n^2 k_M\right)}, \quad (6)$$

Из полученного выражения видно, что удельная сила тяги МЭП является функцией двух независимых переменных n и k_M . Другие параметры в выражении (6) являются постоянными величинами, зависящими от характеристик используемых активных материалов и ограничений по плотности тока и коэффициенту заполнения обмотки при проектировании магнитной системы привода.

Для отыскания экстремума целевой функции приравняем нулю ее частные производные и решим систему уравнений для определения неизвестных $n_{\text{опт}}$ и $k_{M,\text{опт}}$

$$\frac{\partial F_{\text{Эм.уд}}}{\partial n} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial F_{\text{Эм.уд}}}{\partial k_M} = 0. \quad (7)$$

При записи корней системы можно убедиться, что система уравнений в положительной полуплоскости пространства определена и имеет единственное решение:

$$n_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_{\text{обм}}}{\gamma_M}}, \quad k_{M,\text{опт}} = 1. \quad (8)$$

Подставляя полученные значения независимых переменных в выражение (6), можно найти максимальное значение удельной силы тяги для исследуемой магнитной системы МЭП:

$$F_{\text{Эм.уд.макс.}} = \frac{k_Z J}{4} \sqrt{\frac{\mu_0 H_c B_r}{\gamma_{\text{обм}} \gamma_M}}. \quad (9)$$

При этом оптимальное отношение площадей рабочего зазора и нейтрального сечения постоянного магнита будет:

$$\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \frac{\gamma_M}{\gamma_{\text{обм}}}}. \quad (10)$$

Числовой расчет отношения $\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{опт}}$ для различных марок сплавов постоянного магнита

показывает, что его значение приближается к единице. Так, например, для марки сплава постоянного магнита Nd₁₅Fe₇₇B₈ типа фенибор [1] на основе железа (Fe), неодима (Nd) и бора (B) имеем: $B_r = 1,23$ Тл, $H_c = 880$ кА/м, удельная энергия постоянного магнита

$\varpi_{M,\text{макс.}} = 145$ кДж/м³, отношение $\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{опт}} = 0,968$, значение $n_{\text{опт}} = 1,149$. Для других

марок сплавов постоянного магнита значения $\left(\frac{Q_\delta}{Q_M} \right)_{\text{опт}}$ и $n_{\text{опт}}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные геометрические соотношения размеров магнитной системы МЭП

Марка сплава	$\varpi_{M,\text{макс.}}, \text{кДж/м}^3$	$B_r, \text{Тл}$	$H_c, \text{кА/м}$	$(Q_\delta/Q_M)_{\text{опт}}$	$n_{\text{опт}}$
Nd ₂ Fe ₁₄ B	120	1.18	744	1.031	1.224
КСП 37 А	72.5	0.9	500	1.099	1.304
КС 37	55	0.77	540	0.978	1.160

В оптимальной конструкции магнитной системы привода относительная индукция в нейтральном сечении магнита удовлетворяет условию:

$$b_{m,опт} = 0.5 \quad (11)$$

Магнитная система МЭП с двумя воздушными каналами и магнитами, намагниченными в радиальном направлении (рис. 1,б).

Тяговое усилие привода определяется выражением:

$$F_{эм} = 2 B_m Q_m k_z J (\delta_1 + \delta_2). \quad (12)$$

Магнитная индукция в нейтральном сечении магнита согласно решению системы уравнений (2) будет:

$$B_m = \mu_0 \frac{Q_{\delta 1} Q_{\delta 2}}{Q_m} \frac{H_c d}{\left[Q_{\delta 1} \delta_2 + Q_{\delta 2} \delta_1 + \frac{\mu_0 H_c d}{B_r} \frac{Q_{\delta 1} Q_{\delta 2}}{Q_m} \right]}, \quad (13)$$

где $Q_{\delta 1}$ и $Q_{\delta 2}$ – соответственно площади рабочих зазоров δ_1 и δ_2 .

Суммарную массу активных частей обмоток и постоянных магнитов можно записать в виде:

$$m_{сум.} = m_{акт.обм.1} + m_{акт.обм.2} + m_m = 2[\gamma_{обм} (Q_{\delta 1} \delta_1 + Q_{\delta 2} \delta_2) + \gamma_m Q_m d]. \quad (14)$$

Выразим удельную силу тяги привода через независимые переменные:

$$n = \frac{d}{\delta_1}, \quad r = \frac{d}{\delta_2}, \quad k_{M1} = \frac{m_{обм1}}{m_m}, \quad k_{M2} = \frac{m_{обм2}}{m_m}. \quad (15)$$

Тогда после преобразований, принимая во внимание соотношения (15) – (18), получим:

$$F_{эм.уд.} = \frac{\mu_0 H_c k_z J}{\gamma_{обм}} \left(\frac{k_{M1} k_{M2}}{1 + k_{M1} + k_{M2}} \right) \frac{(n + r)}{\left(k_{M1} \frac{n}{r} + k_{M2} \frac{r}{n} + \frac{\mu_0 H_c}{B_r} \frac{\gamma_m}{\gamma_{обм}} k_{M1} k_{M2} r n \right)}. \quad (16)$$

Найдем экстремум целевой функции (15), подчинив ее следующим условиям:

$$\frac{\partial F_{эм.уд.}}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial F_{эм.уд.}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial F_{эм.уд.}}{\partial k_{M1}} = 0, \quad \frac{\partial F_{эм.уд.}}{\partial k_{M2}} = 0. \quad (17)$$

Решая систему уравнений (16), найдем значения независимых переменных, обеспечивающие ему максимальное значение силы тяги:

$$F_{эм.уд.макс.} = \frac{k_z J}{4} \sqrt{\frac{\mu_0 H_c B_r}{\gamma_{обм} \gamma_m}}. \quad (18)$$

Критериальные соотношения имеют вид:

$$n_{опт} = \frac{1}{k_{M1.опт}} \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обм}}{\mu_0 H_c \gamma_m}}, \quad r_{опт} = \frac{1}{k_{M2.опт}} \sqrt{\frac{B_r \gamma_{обм}}{\mu_0 H_c \gamma_m}}, \quad k_{M1.опт} + k_{M2.опт} = 1. \quad (19)$$

В оптимальной конструкции магнитной системы привода (рис. 1, б) выполняется равенство (11).

Магнитная система МЭП с магнитами, намагниченными в аксиальном направлении и одной парой полюсов (рис. 1, в).

Относительная магнитная проводимость рабочего зазора на пару полюсов определяется выражением:

$$\Lambda_{\delta}^* = \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta} \frac{H_c d}{B_r Q_m}. \quad (20)$$

Подставляя выражение (23) в решение системы (6), преобразуем выражение тягового усилия (2.4) к виду:

$$F_{\text{эм}} = \frac{\mu_0 Q_{\delta} H_c d k_z J}{\left(1 + \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta} \frac{H_c d}{B_r Q_m}\right)}. \quad (21)$$

Введем независимые переменные:

$$n = \frac{d}{\delta}, \quad k_M = \frac{m_{\text{акт.обм.}}}{m_m}, \quad (22)$$

где $m_{\text{акт.обм.}} = 2Q_{\delta} \delta \gamma_{\text{обм}}$; $m_m = Q_m \gamma_m d$ – составляющие массы магнитной системы.

Через независимые переменные удельная сила тяги определяется выражением:

$$F_{\text{эм.уд.}} = \frac{\mu_0 H_c k_z J}{2 \gamma_{\text{обм}}} \frac{k_M}{(1+k_M)} \frac{n}{\left(1 + \frac{\mu_0 H_c}{4B_r} \frac{\gamma_m}{\gamma_{\text{обм}}} n^2 k_M\right)}. \quad (23)$$

При отыскании экстремума целевой функции (23) используем условия (10). Из решения системы уравнений для определения оптимальных значений независимых переменных и подстановки их в выражение (26) получим выражение для определения максимального значения удельной силы тяги привода, идентичное выражению (21). Экстремум целевой функции достигается при оптимальных параметрах:

$$n_{\text{опт}} = 2 \sqrt{\frac{B_r \gamma_{\text{обм}}}{\mu_0 H_c \gamma_m}}, \quad k_{M\text{опт}} = 1. \quad (24)$$

Для оптимальной геометрии магнитной системы привода справедливо соотношение (11).

Магнитная система МЭП с магнитами, намагниченными в аксиальном направлении и двумя парами полюсов (рис. 1, г).

Тяговое усилие, развиваемое приводом, вычисляется по формуле:

$$F_{\text{эм}} = \frac{2\mu_0 Q_{\delta} H_c d k_z J}{\left(1 + \frac{\mu_0 Q_{\delta}}{2\delta} \frac{H_c d}{B_r Q_m}\right)}. \quad (25)$$

Суммарная масса активных частей обмоток и постоянных магнитов будет:

$$m_{\text{сум.}} = m_{\text{акт.обм.}} + m_{\text{м}} = 4\gamma_{\text{обм}} Q_{\delta} \delta + 2\gamma_{\text{м}} Q_{\text{м}} d. \quad (26)$$

Введение независимых переменных (22) в выражение удельной силы тяги, определяемое по отношению (25) к (26), позволяет исследовать полученную функцию цели на экстремум. Максимальное значение удельной силы тяги находится из выражения, идентичного выражению (19). Для оптимальной геометрии магнитной системы привода выполняется равенство (11) и справедливы соотношения (24), при которых сила тяги достигает максимума.

Полученные соотношения из решения задачи оптимизации исследуемых магнитных систем МЭП по максимуму тягового усилия были использованы при разработке программы «Выбор» для ПК, написанной на языке виртуального программирования Borland Delphi 6.0 под управлением Microsoft Windows 2000.

Сравним результаты расчета оптимальных конструкций магнитных систем МЭП по программе «Выбор» на основе задания следующих исходных данных.

Максимальное электромагнитное усилие, Н.....	100
Индукция в сердечнике, Тл.....	1.6
Плотность тока в обмотке, А/м ²	2e+6
Марка сплава постоянного магнита.....	Нм30Ди6Р
Остаточная индукция, Тл.....	1
Коэрцитивная сила, кА/м.....	750
Коэффициент заполнения по меди.....	0.4
Коэффициент рассеяния магнитного потока.....	1.1
Амплитуда хода якоря, м.....	0.005
Радиус штока, м.....	0
Соотношение массы внутренней обмотки к массе магнита на пару полюсов (рис. 2., б).....	0.4
Результаты расчета приведены в табл. 2	

Таблица 2

Расчетные параметры магнитных систем МЭП, полученные при помощи программного обеспечения «Выбор»

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Значение параметра			
			Рис. 1, а	Рис. 1, б	Рис. 1, в	Рис. 1, г
1	Масса магнита на одну пару полюсов	кг	1.052	2.103	2.103	1.052
2	Масса активной части обмотки на одну пару полюсов	кг	1.052	1.052	2.103	1.052
3	Суммарная масса магнита и активной части обмотки	кг	4.207	4.207	4.207	4.207
4	Индукция в нейтральном сечении магнита		0.500	0.578	0.5	0.5
5	Индукция в зазоре	Тл	0.530	во внут. 0.586 во внеш. 0.474	0.529	0.528
6	Высота магнита	м	$\lambda = 0.532$	$\lambda = 0.532$		

7	Высота полюса	м			$\lambda = 0.015$	$\lambda = 0.012$
7	Длина магнита по оси намагничивания	м	$d = 0.008$	$d = 0.008$	$d = 0.042$	$d = 0.033$
8	Высота активной части обмотки	м	$\ell_a = 0.059$	$\ell_a = 0.059$	$\ell_a = 0.016$	$\ell_a = 0.013$
9	Высота обмотки	м	$\ell_k = 0.069$	$\ell_k = 0.069$	$\ell_k = 0.027$	$\ell_k = 0.022$
10	Толщина обмотки	м	$\delta = 0.007$	$\delta_1 = 0.002$ $\delta_2 = 0.003$	$\delta = 0.019$	$\delta = 0.015$
11	Толщина стенки внешнего сердечника	м	$\Delta = 0.014$	$\Delta = 0.015$	$\Delta = 0.050$	$\Delta = 0.035$
12	Средний радиус магнита	м	0.053	0.052	0.023	0.018
13	Средний радиус обмотки	м	0.046	внут. обм. 0.046 внеш. обм. 0.57	0.060	0.048
14	Радиус внутреннего сердечника магнитопровода	м	$r_1 = 0.042$	$r_1 = 0.045$	$r_1 = 0.007$	$r_1 = 0.036$
15	Радиус обмотки	м	$r_2 = 0.044$	внут. обм. $r_2 = 0.048$ внеш. обм. $r_4 = 0.059$	внут. рад. $r_2 = 0.051$ внеш. рад. $r_3 = 0.069$	внут. рад. $r_2 = 0.041$ внеш. рад. $r_3 = 0.056$
16	Радиус магнита	м	$r_3 = 0.057$	$r_3 = 0.055$		
17	Радиус внешнего сердечника магнитопровода	м	$r_4 = 0.07$	$r_5 = 0.074$	$r_4 = 0.0743$	$r_4 = 0.059$
18	Удельное электромагнитное усилие	Н/м ³	23.77 0	23.765	23.77	23.77
19	Намагнич. сила акт. части обм. на одну пару полюсов	А	329.3 80	287.022	249.268	154.271
20	Проводимость магнита на одну пару полюсов	Гн	3.0e-6	2.96e-6	2.1e-7	1.6e-7
21	Относительная проводимость воздушного зазора		1	1.373	1	1

Анализ результатов расчета оптимальных магнитных систем МЭП для испытаний вязкоупругих свойств эластомеров показывает, что для всех типов исследуемых магнитных систем привода при заданных технических условиях, конструкция которых удовлетворяет критерию оптимальности – максимуму тягового усилия, сохраняются одинаковые значения следующих основных параметров.

Суммарная масса постоянных магнитов и активной части обмотки, кг.....4.21

Оптимальное отношение массы активной части обмотки к массе постоянных магнитов..... 1.0

Магнитная индукция в нейтральном сечении магнита $B_m = 0.5B_r$, Тл.....0.58.

Для создания максимального значения тягового усилия МЭП $F_{эм} = 100$ Н (условие технического задания) конструктивно реализуемы магнитные системы МЭП с постоянными магнитами, намагниченными в радиальном направлении (рис. 1 а, б). В магнитной системе МЭП, приведенной на рис. 1 б, для обеспечения больших значений радиусов постоянного магнита (средний радиус магнита $r_{ср} = 0.052$ м) наиболее эффективно применение постоянных магнитов, изготовленных в виде сегментов.

Список литературы

1. Бахвалов Н.С., Численные методы: [учебное пособие для студентов физико-математических специальностей вузов] / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков; Московский государственный университет им. М.В. Ломаносова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 6-е изд. – 636 с: ил. 23 см. ISBN 978-5-94774-815-4.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: [учебное пособие для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов]. – М.: Высшая Школа, 1990. Изд. 2-е перераб. и доп. – 416 с. ISBN 5-06-000719-7
3. Дементьев Ю.Н. Математическое описание электроприводов переменного тока с вентильным преобразователем в нормальном и аварийном режимах [Электронный ресурс] / Ю. Н. Дементьев // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ] / Томский политехнический университет (ТПУ). – 2012. – Т. 321. – № 4: Энергетика. – [С. 131-136] . – Заглавие с титульного листа. – Электронная версия печатной публикации.
4. Косулин В.Д. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов [Текст] / В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко и др. – Л.: Энергоатом издат, Ленингр. отд., 1988. – 184 с.
5. Лысенко О.А. Режимы энергосбережения электромеханического комплекса: центробежный насос – асинхронный двигатель [Текст] / О.А. Лысенко, А.И. Мирошник // Омский научный вестник. – Омск, 2011. – № 2 (98). – С. 145–148. ISSN 1813-8225.
6. Ряшенцев Н.П. Динамика электромагнитных импульсных систем. [Текст] / Н.П. Ряшенцев, Ю.З. Ковалев; Отв. ред. д-р техн. наук, проф. В.В. Ивашин. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1974. – 187 с.
7. Татевосян А.С. Программное обеспечение по исследованию моделей электромагнитных устройств [Текст] / А.С. Татевосян, А.А. Татевосян // Омский научный вестник. – Омск, – 2001. – Вып. 14. – С. 133-135.

Рецензенты:

Федоров В.К., д.т.н., профессор кафедры «Электротехники и электрификации» ОмГАУ им. П.А. Столыпина, г. Омск;

Харламов В.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения, г. Омск.