

5. *Насонова Н.В.* Автоматизированная система комплексного мониторинга факторов риска хронических неинфекционных заболеваний: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2006.

Поступила 25.01.2010р.

УДК 681.3:519.711.3:517.958:621.313

А.В. Жильцов, к.т.н., Д.С. Сорокин

СИНТЕЗ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Основные допущения. Расчётная модель. Будем рассматривать конструкцию двухстороннего линейного асинхронного двигателя (ЛАД) с постоянными магнитами, в зазоре которого движется 3-х фазная обмотка. На рис.1 приведена конструктивная схема двухстороннего ЛАД и указаны основные размеры: воздушный зазор $2d$; высота и ширина постоянных магнитов (полюсных) соответственно a и $2b$; полупериод магнитной системы τ . Там же показана правовинтовая система координат, направление намагниченности однородно намагниченных постоянных магнитов, положение полюсных и межполюсных магнитов. Активная длина магнитопровода $L = (p+1)\tau$, $p+1$ – число полюсных участков. На рис.2 изображена схема 3-х фазной обмотки, в простейшем случае с $2p=1$, рассматриваемого двигателя.

Модель машины является бесконечно широкой (размер вдоль координаты z). Это допущение исключает необходимость учёта поперечного краевого эффекта и позволяет решать двумерную задачу.

Магнитная проницаемость пластин, на которые крепятся постоянные магниты (рис.1), $\mu = \infty$. При этом допущении высота каждой пластины не имеет значения; магнитное насыщение отсутствует.

Требуется синтезировать магнитную систему рассматриваемого линейного двигателя из условия максимума тягового усилия и минимума требуемого значения её пульсации.

Расчет магнитного поля постоянных магнитов линейного электродвигателя методом зеркальных отображений. Для расчета магнитного поля воспользуемся зарядовой моделью [1]. Заменим первичные источники магнитного поля (постоянные магниты) вторичными – простым слоем магнитных зарядов с линейной плотностью $\sigma(P) = J_n(P)$ на их поверхности, где $J_n(P)$ – проекция намагниченности постоянных магнитов на нормаль \vec{n} , восстановленную в точке P поверхности магнитов (направлена

из магнита (рис.3)). В силу того, что магнитная проницаемость магнитопровода принимаем равной бесконечности, то его границу можно считать эквипотенциальными. Тогда для расчета магнитного поля постоянных магнитов в линейном электродвигателе (рис.1) можно воспользоваться методом зеркальных отображений.

Расчёт поля от полюсных магнитов. Так как все полюсные магниты намагничены однородно вдоль оси Oy , то, очевидно, что линейная плотность зарядов $\sigma(P)$ отлична от нуля только при $P \in l_{1i}, l_{2i}$, так как здесь $J_n(P) \neq 0$

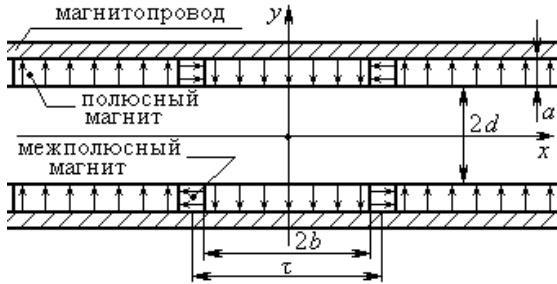


Рис.1. Магнитная система линейного двигателя с постоянными магнитами

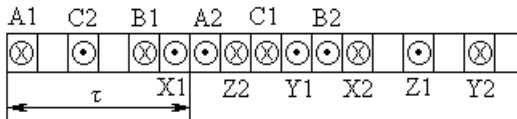


Рис.2. Схема 3-х фазной обмотки линейного двигателя с $2p = 1$

(рис.3). Заряды на l'_i и l''_i компенсируются зарядами, наведёнными ими же на эквипотенциальных линиях L_1 и L_2 соответственно. Таким образом, задача сводится к расчету поля зарядов на отрезках l_{1i} и l_{2i} между параллельными эквипотенциальными поверхностями L_1 и L_2 ($i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm p$; $p+1$ – число полюсных участков). Проведя зеркальные отображения соответствующих зарядов из условия постоянства магнитного потенциала ϕ ($\vec{H} = -\text{grad}\phi$) на L_1 и L_2 , получаем систему из заряженных отрезков (рис.4), поле от которых и надо рассчитать.

Так как поле – плоскопараллельное, то для нахождения напряженности магнитного поля можем воспользоваться формулой [1]:

$$\vec{H} = \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{\sigma(P) \vec{r}_{PM}}{r_{PM}^2} dl_P, \quad (1)$$

где $L = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-p}^p l_{1ik} + l_{2ik}$ – контур интегрирования, $p+1$ – число полюсных

участков; $\sigma(P) = J_n(P)$ – линейная плотность простого слоя магнитных зарядов; \vec{r}_{PM} – вектор, проведённый из точки интегрирования $P(x_P, y_P)$ в точку $M(x, y)$, в которой ищется поле (рис.4). Распишем вектор напряжённости магнитного поля (1) через проекции на оси Ox и Oy :

$$\vec{H}(x, y) = \vec{e}_x H_x + \vec{e}_y H_y, \quad (2)$$

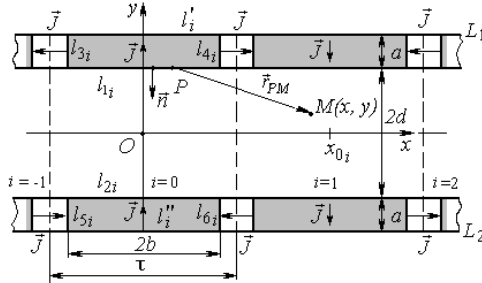


Рис.3. Период магнитной системы линейного двигателя

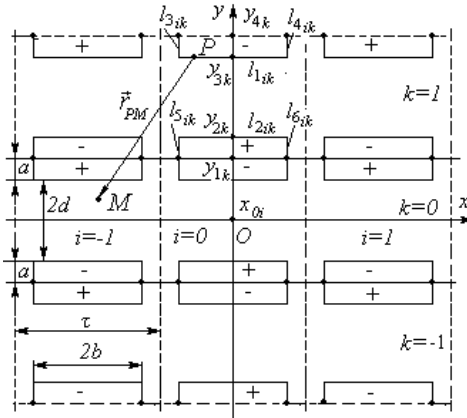


Рис. 4

где \vec{e}_x , \vec{e}_y – единичные векторы соответственно осей Ox и Oy . Принимая во внимание, что $\vec{r}_{PM} = (x - x_P)\vec{e}_x + (y - y_P)\vec{e}_y$, запишем (1) в проекциях

$$H_x^{ik}(x, y) = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{x_{0i}-b}^{x_{0i}+b} \frac{x - x_P}{(x - x_P)^2 + (y - y_{2k})^2} dx_P, \quad (3)$$

$$H_y^{ik}(x, y) = \frac{\sigma}{2\pi} \int_{x_{0i}-b}^{x_{0i}+b} \frac{y - y_{2k}}{(x - x_P)^2 + (y - y_{2k})^2} dx_P, \quad (4)$$

где $H_x^{ik}(x, y)$, $H_y^{ik}(x, y)$ – проекции напряжённости магнитного поля соответственно на оси Ox и Oy от зарядов на линии l_{2ik} ; $x_{0i} = \tau \cdot i$ – координата середины i -го полюсного участка, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm p$; $p+1$ – число полюсных участков; $y_{2k} = -d + 2(d+a)k$ – y -координата k -тых отрезков, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ – определяет число зеркальных отображений (рис.4). Принимая во внимание, что $\sigma(P) = J_n(P)$, после интегрирования (3) и (4), получаем:

$$H_x^{ik}(x, y) = -\frac{(-1)^i J}{4\pi} \ln \frac{(x - x_{0i} - b)^2 + (y - y_{2k})^2}{(x - x_{0i} + b)^2 + (y - y_{2k})^2}, \quad (5)$$

$$H_y^{ik}(x, y) = -\frac{(-1)^i J}{2\pi} \left(\arctg \frac{x - x_{0i} - b}{y - y_{2k}} - \arctg \frac{x - x_{0i} + b}{y - y_{2k}} \right), \quad (6)$$

$i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm p, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$

здесь J – модуль намагничённости постоянных магнитов.

От зарядов на l_{1ik} выражения для проекций напряжённости магнитного поля получаются из (5) и (6) заменой в них $(-1)^i J$ на $-(-1)^i J$ и y_{2k} на y_{3k} , где $y_{3k} = d + 2(d+a)k$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (рис.4). После суммирования (5) и (6) по всем заряженным отрезкам, получаем для компонент напряжённости магнитного поля от полюсных участков следующие выражения

$$H_x(x, y) = -\frac{J}{4\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-p}^p (-1)^i \sum_{m=1}^2 (-1)^{m+1} \ln \frac{(x - x_i^+)^2 + (y - y_{mk})^2}{(x - x_i^-)^2 + (y - y_{mk})^2}; \quad (7)$$

$$H_y(x, y) = -\frac{J}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-p}^p (-1)^i \sum_{m=1}^2 (-1)^{m+1} \left\{ \arctg \frac{x - x_i^+}{y - y_{mk}} - \arctg \frac{x - x_i^-}{y - y_{mk}} \right\}, \quad (8)$$

где $x_i^+ = \tau \cdot i + b$; $x_i^- = \tau \cdot i - b$; $y_{mk} = (-1)^m d + 2(d+a) \cdot k$

Расчёт поля от межполюсных магнитов. Для оптимального использования объёма, который могут занимать постоянные магниты в линейном двигателе (полоса шириной a , рис.2), введем в пространство между полюсными магнитами межполюсные (рис.1), геометрические размеры которых могут быть определены из условия максимума тягового усилия, что будет показано ниже. Расчёт магнитного поля от них проведем также по формуле (1), то есть, применив зарядовую модель [1] и метод зеркальных отображений.

Учитывая, что в этом случае в формуле (1) $L = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-p}^p l_{3ik} + l_{4ik} + l_{5ik} +$

$+l_{6ik}$ (рис.4), нормаль \vec{n} направлена из магнита, для проекций напряжённости магнитного поля от зарядов на l_{3ik} , l_{4ik} , l_{5ik} , l_{6ik} ($i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm p$; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $p+1$ – число полюсных участков) запишем следующие выражения:

$$H_x^{*ik}(x,y) = \frac{(-1)^i J}{2\pi} \sum_{q=1}^2 \left[\int_{y_{1k}}^{y_{2k}} \frac{x-x_{iq}}{(x-x_{iq})^2 + (y-y_p)^2} dy_p - \int_{y_{3k}}^{y_{4k}} \frac{x-x_{iq}}{(x-x_{iq})^2 + (y-y_p)^2} dy_p \right]; \quad (9)$$

$$H_y^{*ik}(x,y) = \frac{(-1)^i J}{2\pi} \sum_{q=1}^2 \left[\int_{y_{1k}}^{y_{2k}} \frac{y-y_p}{(x-x_{iq})^2 + (y-y_p)^2} dy_p - \int_{y_{3k}}^{y_{4k}} \frac{y-y_p}{(x-x_{iq})^2 + (y-y_p)^2} dy_p \right], \quad (10)$$

где; J – намагничённость постоянных магнитов; $2b$ – их ширина; $x_{iq} = x_{0i} + (-1)^q b$; $x_{0i} = \tau \cdot i$ – координата середины i -го полюсного магнита, $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm p$; $y_{1k} = 2(d+a) - (d+a)$; $y_{2k} = 2(d+a) - d$; $y_{3k} = 2(d+a) + d$; $y_{4k} = 2(d+a) + (d+a)$; $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $2d$ – ширина рабочего зазора, a – высота магнита (рис.4)

После интегрирования (9) и (10) и последующего преобразования, получаем

$$H_x^{*ik}(x,y) = -\frac{J}{2\pi} (-1)^i \sum_{m=1}^2 \sum_{q=1}^2 \left[\operatorname{arctg} \frac{y-y_{km}''}{x-x_{iq}} - \operatorname{arctg} \frac{y-y_{km}'}{x-x_{iq}} \right]; \quad (11)$$

$$H_y^{*ik}(x,y) = -\frac{J}{4\pi} (-1)^i \sum_{m=1}^2 \sum_{q=1}^2 \ln \frac{(x-x_{iq})^2 + (y-y_{km}'')^2}{(x-x_{iq})^2 + (y-y_{km}')^2}. \quad (12)$$

Здесь: $y_{km}' = (-1)^m [(d+a)(2k+1) - a]$, $y_{km}'' = (-1)^m (d+a)(2k+1)$ при $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; $m=1$ для линий l_{5ik} , l_{6ik} и $m=2$ для линий l_{3ik} , l_{4ik} (рис.4). Таким образом, с учётом (11) и (12) для проекций напряжённости магнитного поля от межполюсных участков получаем следующие выражения

$$H_x^*(x,y) = -\frac{J}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-p}^p (-1)^i \sum_{m=1}^2 \sum_{q=1}^2 \left\{ \operatorname{arctg} \frac{y-y_{km}''}{x-x_{iq}} - \operatorname{arctg} \frac{y-y_{km}'}{x-x_{iq}} \right\}, \quad (13)$$

$$H_y^*(x,y) = -\frac{J}{4\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-p}^p (-1)^i \sum_{m=1}^2 \sum_{q=1}^2 \ln \frac{(x-x_{iq})^2 + (y-y_{km}'')^2}{(x-x_{iq})^2 + (y-y_{km}')^2} \quad (14)$$

или

$$\vec{H}^*(x, y) = \vec{e}_x H_x^*(x, y) + \vec{e}_y H_y^*(x, y) \quad (15)$$

Магнитную индукцию поля в рабочем зазоре линейного двигателя (рис.1) найдём по формуле:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{H}^*, \quad (16)$$

где \vec{H} и \vec{H}^* – напряженность, создаваемая полюсными и межполюсными магнитами, соответственно.

Расчёт тягового усилия линейного электродвигателя. В первом приближении пренебрегаем пространственным распределением тока в каждой катушке (фазе), считая его бесконечным, прямым и расположенного на оси катушки вдоль Oz (рис.5) (как показывает численный анализ такое допущение допустимо).

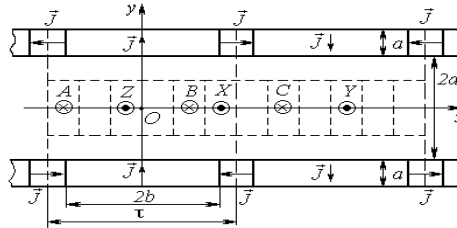


Рис.5. Положение обмотки относительно магнитов в начальный момент времени.

Рис. 5. Положение обмотки относительно магнитов в начальный момент времени

Пространственно токи в фазах сдвинуты на 120 эл. град. и изменяются во времени по законам:

$$i_A(t) = i_m \sin \omega t, \quad i_B(t) = i_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad i_C(t) = i_m \sin(\omega t + 120^\circ),$$

i_m – амплитуда, ω – частота электрического тока.

Сила, действующая на элемент тока idl_Q , определяется, согласно закону Ампера, следующим выражением

$$d\vec{F} = id\vec{l}_Q \times \vec{B}. \quad (17)$$

Принимая во внимание, что ток направлен вдоль оси Oz ($d\vec{l}_Q = dz$), а также, что поле \vec{B} плоскопараллельное, перепишем (17) в виде,

$$d\vec{F} = -iB_y dz \vec{e}_x + iB_x dz \vec{e}_y, \quad (18)$$

здесь: \vec{e}_x, \vec{e}_y – орты осей Ox и Oy соответственно. Так как обмотка перемещается вдоль оси Ox (рис.5), то искомое тяговое усилие определяется только x -компонентой силы $d\vec{F}$. Из (18) имеем:

$$dF_x = -iB_y dz, \quad (19)$$

откуда для проекции силы на ось Ox , действующей на единицу длины линейного тока, получаем выражение:

$$f_x = \frac{dF_x}{dz} = -iB_y, \quad (20)$$

и для всей 3-х фазной обмотки линейного двигателя с активной длиной последней равной l (вдоль Oz):

$$F = (f_A + f_B + f_C) \cdot lN, \quad (21)$$

где f_A, f_B, f_C – модуль силы, действующей на единицу длины тока фаз A, B, C соответственно – определяются из (20); N – число 3-х фазных катушек в обмотке двигателя (на рис.5 приведена схема обмоток с $N=1$ для полупериода).

Если учитывать пространственное распределение тока в катушках, считая поверхностную плотность тока равной $\vec{\delta}$, то тяговое усилие может быть найдено по формуле:

$$\vec{F} = \int_S \vec{\delta} \times \vec{B} dS,$$

учитывая, что $\vec{\delta}$ имеет только z -компоненту, то искомая проекция силы на ось Ox определяется выражением:

$$F_x = - \int_S \delta_z B_y dS.$$

При численном расчёте, заменим интегрирование суммированием. Разбив площадь интегрирования S на элементы ΔS , получим

$$F_x = - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \delta_z B_y(x_i, y_j) \Delta S = - \delta_z \Delta S \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_y(x_i, y_j),$$

где $m \times n$ – число точек разбиения; (x_i, y_j) – координаты точек, по которым проходит суммирование; δ_z – поверхностная плотность тока в катушке, определяемая выражением:

$$\delta_z = \frac{iw}{S},$$

i, w – ток и число витков в катушке соответственно, S – её поперечное сечение.

Для достижения максимального тягового усилия смещение магнитных осей токов и постоянных магнитов, очевидно, должно составлять угол 90 эл. град. (рис.5).

Для характеристики пульсации силы введём величину ε , определяемую как отношение разности максимального и минимального значения силы при движении обмотки вдоль полупериода её магнитной системы к среднему её значению на этом отрезке, выраженную в процентах:

$$\varepsilon = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{cp}} \cdot 100\%, \quad (22)$$

где среднее значение силы находится по формуле

$$F_{cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} F_x dx, \quad (23)$$

где F_x – определяется формулой (21).

Численный расчет и экспериментальная проверка полученных результатов. Первоначально было рассчитано магнитное поле от полюсных участков по формулам (7), (8). Зная его распределение в рабочем зазоре линейного двигателя, по формуле (21) рассчитывалось тяговое усилие при движении обмотки за полпериода магнитной системы, одновременно проводился расчёт пульсаций силы по формуле (22) в зависимости от ширины $2b$ полюсного магнита вдоль оси Ox . Результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7, где изображены соответственно графики зависимости среднего значения тягового усилия и пульсации силы. Расчет проведён для двигателя со следующими параметрами: ширина рабочего зазора $2d = 10,34$ мм; высота магнитов $a = 6,35$ мм; полупериод магнитной системы $\tau = 30,48$ мм; число полюсных участков $p+1=21$; эффективная длина обмотки (вдоль Oz) $l = 44$ мм; число секций 3-х фазных катушек $N = 4$; амплитуда тока в катушке $i_m = 1$ А; намагничённость постоянных магнитов $J = 875352$ А/м; количество витков в катушке $w=90$. Как показывают расчеты, оптимальное значение ширины полюсного магнита $2b$ целесообразно выбрать в интервале 25 мм – 30 мм из условия требуемого максимума силы и ограничения её пульсации (рис.6). Из этих соображений было выбрано значение $2b = 27,93$ мм. Для линейного двигателя с вышеуказанными параметрами, как показал расчёт, среднее значение тягового усилия равно $F_{\text{теор.ср.}} = 30,12$ Н, пульсация $\varepsilon = 1,5$ %. Эксперимент дал следующее значение тягового усилия $F_{\text{эксп.ср.}} = 30,3$ Н, что отличается на 0,6 % от полученного теоретически.

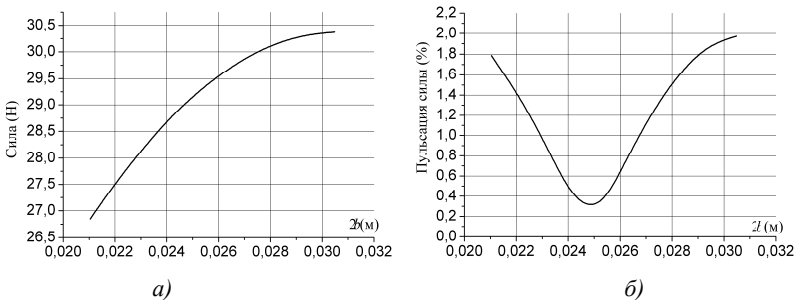


Рис. 6. График зависимости тягового усилия (а) и пульсаций (б) от ширины $2b$ полюсного магнита без введения межполюсных магнитов

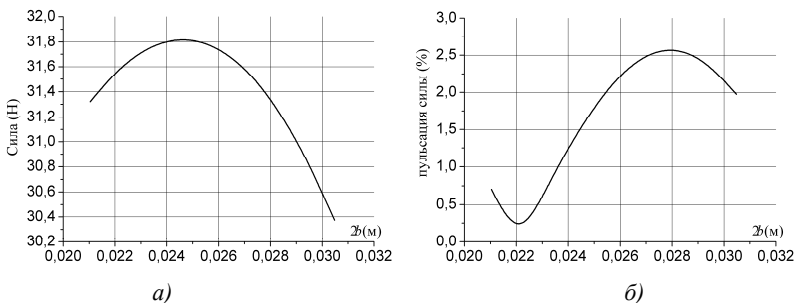


Рис. 7. График зависимости тягового усилия (а) и пульсаций (б) от ширины $2b$ полюсного магнита без введения межполюсных магнитов

Дальнейшим шагом является увеличение тягового усилия за счет введения однородно намагниченных постоянных магнитов в межполюсные участки (рис. 1). Магнитное поле в этом случае рассчитывалось по формуле (16), учитывающей наличие межполюсных магнитов, а тяговое усилие, как и в предыдущем случае, по формуле (21). Результаты расчётов среднего значения тягового усилия и его пульсации для линейного двигателя с теми же параметрами, что и выше, но при наличии межполюсных участков, представлены на рис. 7.

Как показал расчёт, максимальное среднее значение тягового усилия соответствует ширине полюсного магнита $2b \approx 24,6$ мм и равно $F_{\text{теор.ср.}} = 31,9$ Н, пульсация $\varepsilon = 1,59$ %. Таким образом, увеличение тягового усилия по сравнению с магнитной системой, состоящей только из полюсных магнитов с $2b = 27,93$ мм, составляет 6 %.

1. Тозони О. В. Маергойз И. Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. – К.: Техніка, 1974. – 352 с.

Поступила 1.03.2010г.

УДК 004.056:004.274

Ю.М. Коростиль, А.Н. Давиденко, С.Я. Гильгурт, М.М. Панченко

АНАЛИЗ ВНЕШНИХ АТАК НА ЛОКАЛЬНУЮ СЕТЬ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЗАЩИТЫ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

The utilization of programmable logic for defense of local area network from external attacks is investigated. Specific threats from internet to local computers and possibilities of FPGA-based digital equipment to parry them are discussed.