

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЁТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОВИБРАТОРА НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНО-ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Голенков Г.М., к.т.н., доцент, Бондар Р.П., Макогон С.А.,
Київський національний університет будівництва і архітектури
Україна, 03037, Київ, пр. Повітрофлотський 31, КНУБА, кафедра Електротехніки та електроприводу
тел. (044) 241-55-65

Подольцев А.Д., д.т.н.,
Ин-т электродинамики НАН Украины, 03680, Киев, пр. Победы 56,
тел. (044) 454-25-68

Богаєнко М.В., Попков В.С.
Науково-впроваджувальне підприємство "Промелектрообладнання"
Україна, 03179, Київ, вул. Ірпінська, 63а/125 тел. (044) 459-52-42

Розглянуто конструкцію електровібратора, створеного на базі коаксіально-лінійного двигуна з постійними магнітами, і проведено розрахунок методом кінцевих елементів магнітного поля та електромагнітної сили. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують достовірність одержаних розрахунків.

Рассмотрена конструкция электровибратора, созданного на основе коаксиально-линейного двигателя с постоянными магнитами, и выполнен расчет методом конечных элементов магнитного поля и электромагнитной силы, действующей на якорь двигателя. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность полученных расчетных данных.

ВВЕДЕНИЕ

Вибрационные установки широко используются в строительстве, горной промышленности и на транспорте в таких технологических процессах, как погружение свай, анкеров, шпунтов, уплотнение бетона или грунта и др. [1, 2]. В настоящее время создание таких установок идет на базе использования гидро- и электроэнергии. Каждый тип установок имеет свои преимущества и недостатки, а также рациональную область применения.

Одно из перспективных направлений – создание виброустановок на основе линейных двигателей с постоянными магнитами, что обусловлено появлением на рынке относительно недорогих постоянных магнитов с высокими удельными энергетическими характеристиками [3]. Целью данной работы является исследование распределения магнитного поля и электромагнитных сил в коаксиально-линейном электродви-

гателе с постоянными магнитами (ПМ), который положен в основу создания вибрационной установки.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Схематическое изображение конструкции линейного двигателя с ПМ и гладким статором (отсутствуют зубцы) показано на рис. 1 и содержит магнитопровод статора 1 с обмотками возбуждения 2 и движущийся якорь 3 с ПМ 4 и магнитными полюсами 5 [4-6]. Магнитопровод имеет форму гладкого цилиндра, выполненного из магнитного материала – стальной изолированной проволоки, намотанной в несколько рядов. На внутренней поверхности магнитопровода укреплена обмотка, состоящая из катушек. Якорь состоит из стержня, на котором закреплены постоянные магниты с полюсными концентраторами.

При подаче переменного тока на обмотку статора возникает пульсирующее магнитное поле, которое,

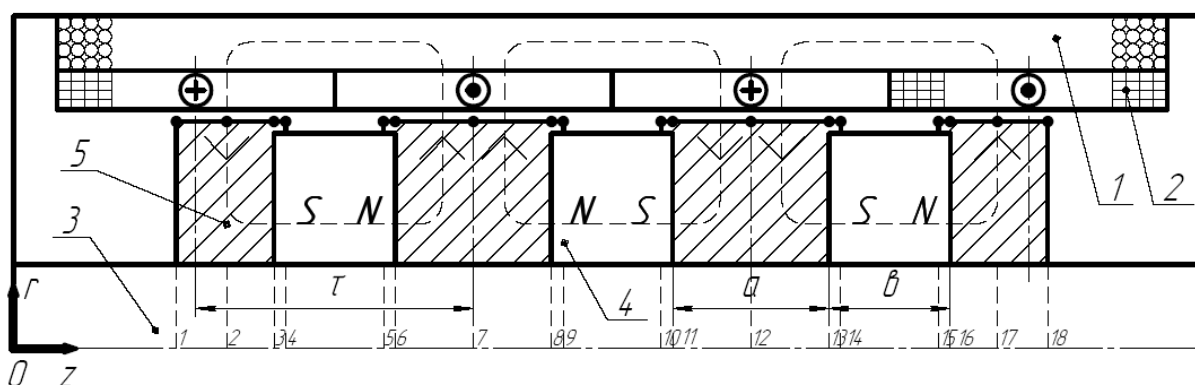


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции линейного двигателя с ПМ:

1 – магнитопровод статора; 2 – обмотка возбуждения магнитного потока; 3 – стержень якоря из немагнитного материала ; 4 – постоянные магниты; 5 – полюса якоря.

взаимодействуя с постоянным магнитным полем якоря, создает электромагнитную силу, вызывающую колебательное движение якоря. Амплитуда колебаний зависит от напряженности поля, полюсного деления и других факторов, а частота колебаний определяется частотой переменного тока в обмотке статора.

Для анализа основных характеристик исследуемого двигателя в работе выполнялся численный расчет магнитного поля методом конечных элементов с помощью программы FEMM [7]. Задача решалась в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат в плоскости roz для векторного потенциала A , имеющего единственную ϕ -компоненту - $A = (0, A_\phi, 0)$ в магнитоэлектростатическом приближении.

Из системы дифференциальных уравнений Максвелла для стационарного магнитного поля

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad (1)$$

и уравнения состояния магнитного материала, записанного в виде

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (2)$$

получим следующее уравнение для векторного потенциала:

$$\text{rot}[(\mu_0 \cdot \mu_r)^{-1} \text{rot} \mathbf{A} - (\mu_0 \cdot \mu_r)^{-1} \mathbf{B}_r] = \mathbf{J}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{H} - напряженность магнитного поля, \mathbf{B} - магнитная индукция, \mathbf{A} - векторный потенциал, \mathbf{J} - плотность тока в обмотке статора – полагается известной величиной, μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, $\mu_r(\mathbf{B})$ - относительное значение магнитной индукции (скалярная величина), зависящее от модуля вектора магнитной индукции.

Расчет величины электромагнитной силы, действующей на якорь, выполнялся на основании тензора натяжения Максвелла \mathbf{T} согласно следующему выражению [8]:

$$\mathbf{F}_{\text{ЭМ}} = \int_S 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \mathbf{n} \cdot \mathbf{T} \cdot dS, \quad (4)$$

причем вычислялась осевая компонента силы. Здесь \mathbf{n} - единичный вектор внешней нормали к поверхности якоря S .

Постоянные магниты выполнены из материала NdFeB марки 38SH, характеризующегося остаточной индукцией $B_r = 1,26$ Тл и коэрцитивной силой $H_{CB} = 950$ кА/м. Отсюда для уравнения состояния индукции магнита из выражения (2) после подстановки этих значений получим $\mu_r = 1,08$.

Полюса якоря выполнены из стали Ст.3 и имеют радиальные разрезы, уменьшающие вихревые токи. Магнитная характеристика данного материала согласно [9] имеет вид, показанный на рис. 2.

Так как при расчетах параметров магнитного поля необходимо знать зависимость магнитной проницаемости от магнитной индукции, то такая характеристика была получена путем пересчета и приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что насыщение магнитопровода начинает проявляться при магнитной индукции $B > 1$ Тл. При меньшем значении поля магнитная проницаемость принимает приблизительно постоян-

ное значение, равное $\mu_r = 995$.

Для расчета эквивалентной магнитной проницаемости магнитопровода статора, выполненного из стальной проволоки, в работе проанализирована вспомогательная задача.

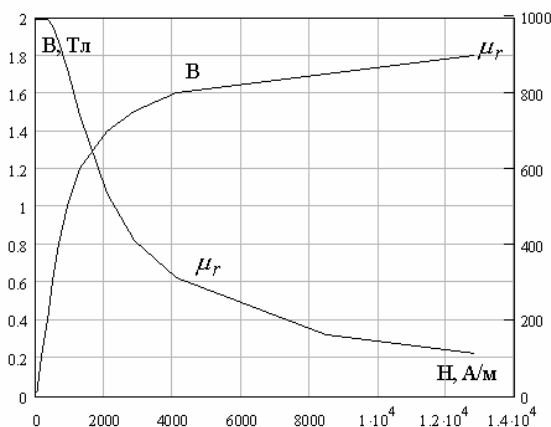


Рис. 2. Магнитная характеристика материала полюсов якоря (сталь Ст. 3)

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОПРОВОДА СТАТОРА

Магнитный поток в магнитопроводе статора изменяется во времени вследствие протекания переменного тока в обмотке статора и возвратно-поступательного движения якоря, имеющего постоянные магниты. Для уменьшения потерь электрической энергии, магнитопровод статора необходимо в общем случае выполнять из шихтованной электротехнической стали. В данной работе с целью упрощения конструкции статора он был выполнен из стальной отожженной проволоки диаметром 1 мм, навитой на специальный шаблон. Для расчета эквивалентной магнитной характеристики такой композиционной структуры магнитопровода в работе рассматривалась следующая вспомогательная полевая задача.

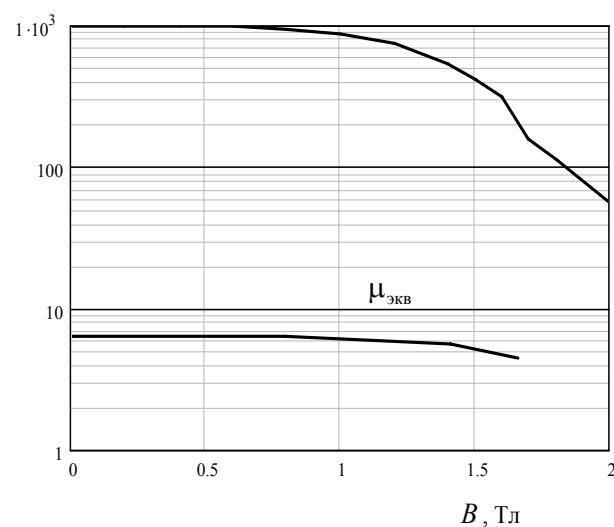


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости (относительное значение) от магнитной индукции для стали Ст3 ($\mu_{\text{ЭКВ}}$) и для магнитопровода статора ($\mu_{\text{ЭКВ}}$)

Предполагается, что намотка стальной проволоки выполнена с постоянным шагом так, что структура в сечении является периодической. Для расчета поля в такой структуре выделим элементарную ячейку в окрестности отдельного проводника (рис. 4).

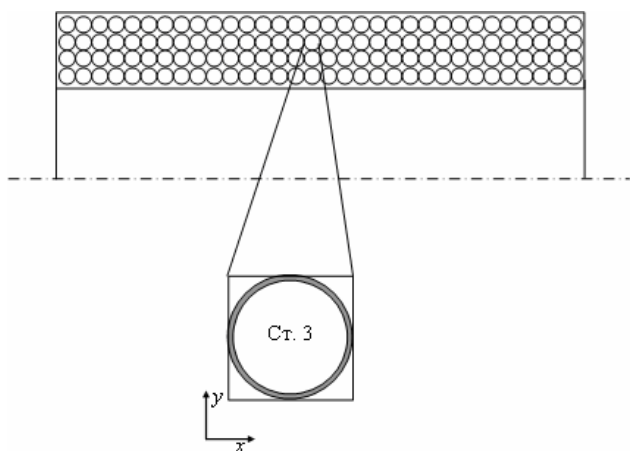


Рис. 4. Элементарная ячейка для расчета эффективной характеристики намагничивания намотанного из стальной проволоки магнитопровода статора

Рассмотрим задачу для векторного потенциала в такой ячейке как плоскопараллельную, удовлетворяющую следующему дифференциальному уравнению:

$$\text{rot}[(\mu_0 \cdot \mu_r)^{-1} \text{rot}A] = 0. \quad (5)$$

Здесь $\mu_r(B)$ - магнитная проницаемость стали Ст. 3, изменяющаяся от величины поля согласно рис. 3. В качестве граничных условий на боковых границах расчетной области (рис. 4) задавалась напряженность электрического поля $H_y = H_0$, где H_0 - известное значение напряженности поля, изменяющееся в широких пределах. Так как свойства проволочного магнитопровода нелинейные, то на верхней и нижней границах расчетной области касательная компонента поля была принята равной нулю.

После нахождения векторного потенциала значение эквивалентной магнитной проницаемости композиционной структуры определяется из выражения:

$$\mu_{\text{ЭКВ}} = \frac{a^{-1} \cdot \int_0^a B_x(y) \cdot dy}{\mu_0 \cdot H}, \quad (6)$$

где a - размер расчетной области.

На рис. 5 показано распределение относительно значения магнитной проницаемости (в цвете) и вектора магнитной индукции (с помощью стрелок) при различном значении напряженности магнитного поля H_0 . Из рисунка видно, что при малом значении $H_0 = 10^4$ А/м весь материал во всем сечении проволоки является ненасыщенным и магнитная проницаемость равномерно распределена по сечению и $\mu = 995$. С ростом H_0 происходит частичное насыщение участков входа и выхода магнитного потока из проволоки - здесь магнитная проницаемость уменьшается до $\mu = 200$. При увеличении H_0 до значения $2 \cdot 10^5$ А/м материал всей проволоки насыщен и среднее значение магнитной проницаемости уменьшается до $\mu = 140$, а на участках входа и выхода магнитного потока - до $\mu = 20$.

Результаты расчета эффективного значения магнитной проницаемости согласно выражению (6) приведены на рис. 3 и иллюстрируют то обстоятельство, что при индукции магнитного поля $B < 1,5$ Тл относительное значение эквивалентной магнитной проницаемости статора можно полагать равным $\mu_{\text{ЭКВ}} = 6,35$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНЕЙНОГО ДВИГАТЕЛЯ

На рис. 6 показано распределение магнитного поля в осевом сечении линейного двигателя, а также тензора натяжения Максвелла (величины nT) на поверхности якоря и статора. Из картины распределения

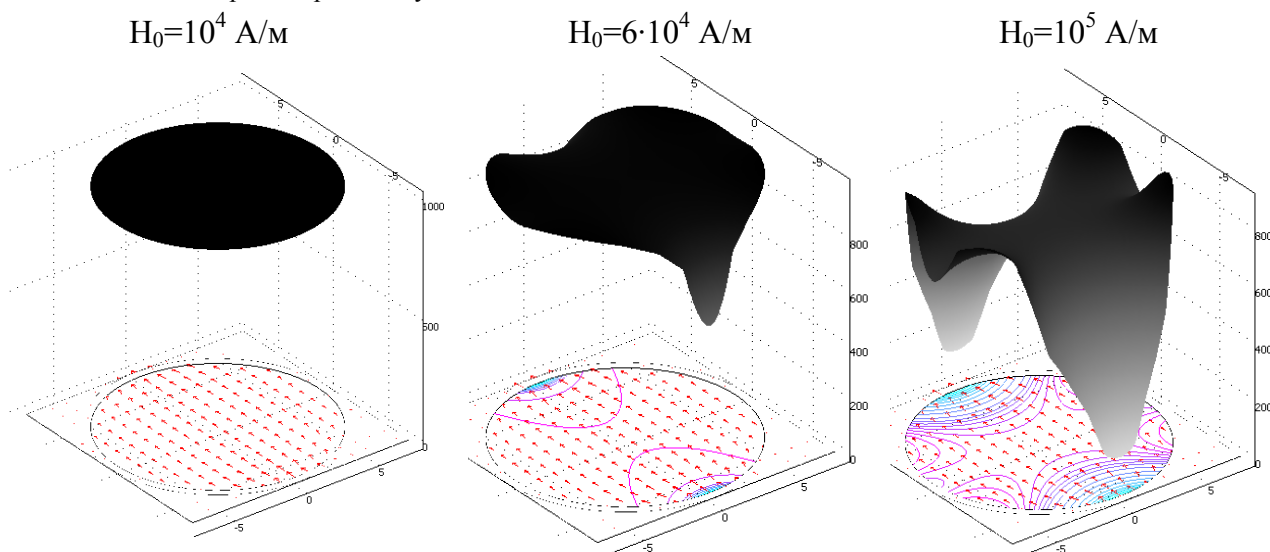


Рис. 5. Распределение относительного значения магнитной проницаемости материала проволоки (большей насыщенностью и изолиниями), а также вектора магнитной индукции в расчетной области (стрелками) при различных значениях напряженности приложенного магнитного поля H_0

поля видно, что максимальное значение поля достигается в угловых зонах полюсов и составляет около 1,5 Тл (зона М). Существует небольшой магнитный поток рассеяния, замыкающийся по немагнитному стержню якоря. На практике необходимо стремиться уменьшить этот поток, что достигается выбором оптимальной конфигурации и геометрических размеров магнитов и полюсов якоря. Наибольшее значение тензора натяжения приложено к поверхности полюсов якоря,

а также к поверхности обмотки, расположенной непосредственно под этими полюсами – см. рис. 6 б) и в). Причем радиальная составляющая силовой нагрузки значительно превышает осевую. Отсюда следует, что в случае несимметричного расположения якоря с небольшим радиальным смещением по отношению к статору величина действующей на него радиальной силы может значительно превышать величину полезной осевой силы.

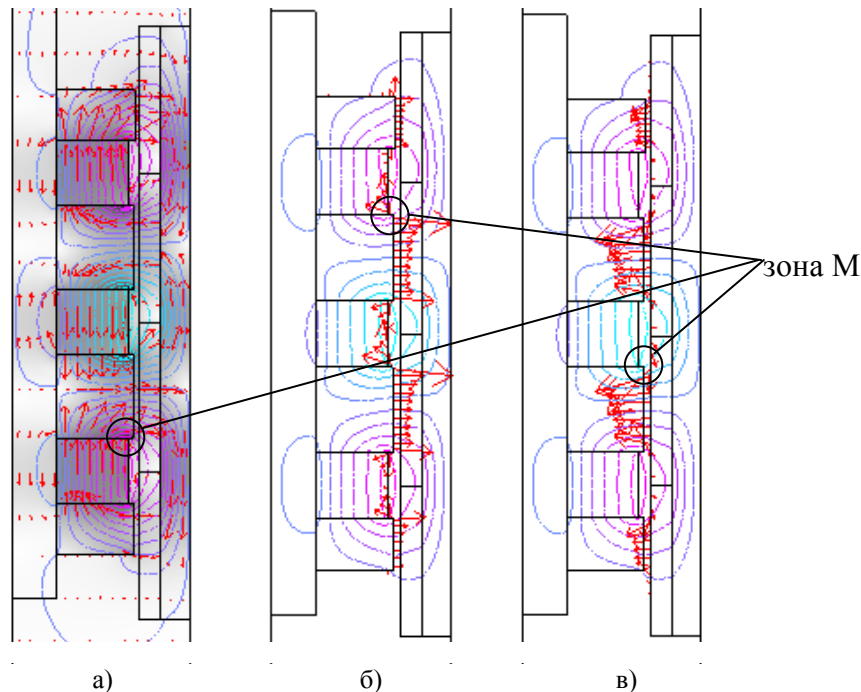


Рис. 6. Распределение в осевом сечении линейного двигателя расчетных значений векторного потенциала (изолинии) и вектора магнитной индукции (стрелками и с большей насыщенностью) (а), а также тензора натяжения Максвелла – величины nT по поверхности якоря (б) и статора (в)

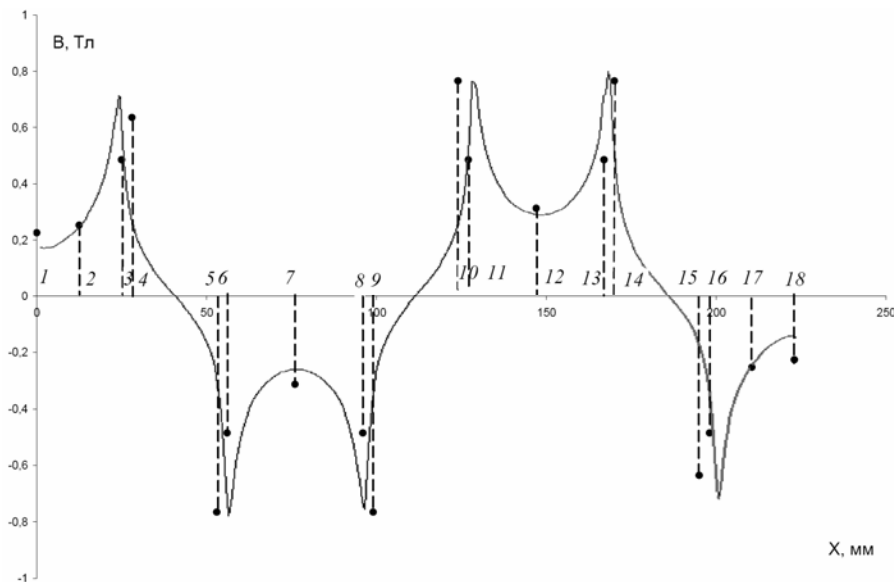


Рис. 7. График зависимости магнитной индукции в воздушном зазоре на расстоянии 1 мм от поверхности в зависимости от положения якоря (линией показаны расчётные значения, точками - эксперимент)

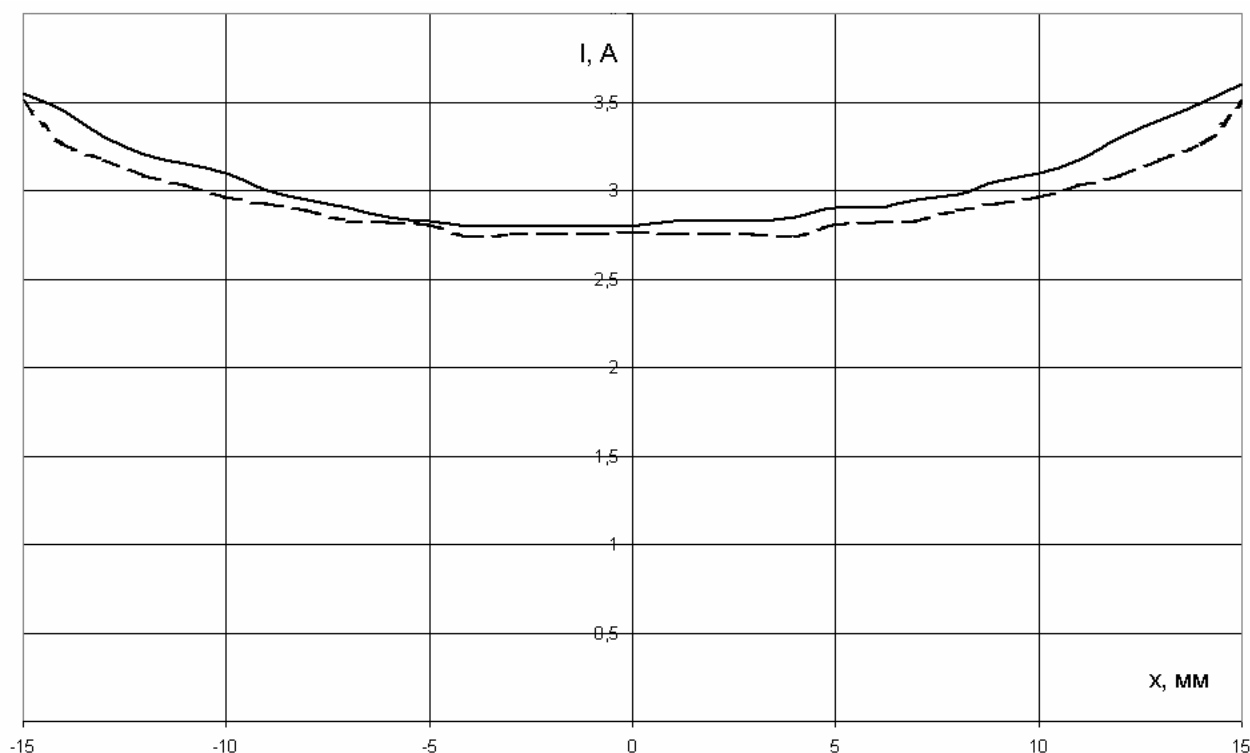


Рис. 8. Ходо-амперная статическая характеристика при нагрузке $F=1030$ Н:
черная сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчётная

Для подтверждения достоверности результатов численного расчета поля и электромагнитной силы в работе выполнялись экспериментальные исследования, приведенные на рис. 7 и 8. На рис. 7 показаны расчетные и экспериментальные значения магнитной индукции на поверхности якоря при отсутствии статора. Индукция измерялась в точках, отмеченных на рис. 1. Из рис. 7 видно: 1) хорошее совпадение результатов расчета и измерения; 2) неравномерность распределения поля вдоль полюсов якоря – на краях полюсов происходит значительная концентрация поля. Для уменьшения этой концентрации могут использоваться специальные полюсные наконечники.

Измеренная ходо-амперная статическая характеристика линейного двигателя при нагрузке $F=1030$ Н показана на рис. 8. Ошибка между расчетом и экспериментом не превышает 7%. Из рис. 8 также видно, что на участке длиной приблизительно 20 мм на якорь действует постоянное тяговое усилие.

ВЫВОДЫ

В работе разработана методика расчета основных характеристик линейного двигателя с ПМ, составляющего основу электровибратора. В основу методики положен численный расчет магнитного поля методом конечных элементов. Получено хорошее совпадение результатов расчетов и экспериментов для магнитного поля в зазоре и тягового усилия.

Данная методика позволяет выполнить исследования, направленные на усовершенствование конструкции линейного двигателя и, как следствие, электровибратора в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бауман В.А., и др. Вибрационные машины в строительстве и производстве строительных материалов. М.: Машиностроение, 1970.
- [2] Савинов О.А., Лускин А.Я. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве. М.: Л.: Госстройиздат, 1960.
- [3] Gieras J.F., Piech Z.J. Linear Synchronous Motors. CRC Press, 2000.
- [4] Голенков Г.М., Макогон С.А. Вибропогружатель с индукционным линейным двигателем. - Харьков.: "Электротехника и электромеханика" №4, 2004.
- [5] Богаенко М.В., Голенков Г.М., Голуб В.П., Павленко П.В., Попков В.С., Чомкалова І.О. Вібросанурювач. Деклараційний патент на винахід №20031213225 від 17.01.2005.
- [6] Богаенко М. В., Бондар Р.П., Голенков Г.М., Голуб В.П., Макогон С.А., Павленко П.В., Попков В.С. Вібросбуджувач. Деклараційний патент на корисну модель №14111 заявка № а 2005 10789 від 15.11.2005.
- [7] <http://femm.foster-miller.net>
- [8] Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир, 1964, 774 с.
- [9] Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин. М. Высшая школа, 1984, 432 с.

Поступила 23.06.2006