

Ф. Р. Исмагилов, И. Х. Хайруллин, М. В. Охотников

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты математического моделирования линейного шагового электромагнитного двигателя на базе электромагнита с учетом геометрических особенностей воздушного зазора. На основе результатов моделирования проведен расчет электромагнитных сил и результирующего момента, действующих на подвижный элемент линейного шагового электромагнитного двигателя. Отражены данные сравнительного анализа результатов расчета силы одностороннего магнитного притяжения и результирующего момента. *Линейный шаговый электромагнитный двигатель*

Линейные шаговые двигатели (ЛШД) являются весьма распространенными в качестве приводов подвижных элементов позиционеров, передающих механизмов, раздаточных столов и т. д. Как и у любых двигателей, у ЛШД есть ряд недостатков ограничивающих область их применения.

Рассматриваемая в данной работе конструкция ЛШЭД устраняет один из главных недостатков ЛШД: рабочий момент данного двигателя значительно выше, что обусловлено изменением его конструкции.

Конструктивно ЛШЭД в зависимости от области применения могут быть выполнены в одностороннем и двухстороннем вариантах работы, с продольным или поперечным контуром замыкания основного магнитного потока.

На рис. 1 показано возможное конструктивное исполнение ЛШЭД с внутренним подвижным элементом, где корпус неподвижен и жестко закреплен. Возможна также конструкция с внешним опорным элементом, в этом случае перемещаться будет целиком двигатель, опорой для движения будет служить внешний направляющий контур, например труба.

В качестве приводного механизма для ЛШЭД выступает Ш-образный электромагнит с ломаной формой якоря и полюса, обеспечивающей неравномерность зазора. Неравномерность зазора (рис. 2) позволяет сконцентрировать магнитный поток, создаваемый катушкой электромагнита на участке l_2 , что в свою очередь приводит к значительному увеличению тяговой характеристики и результирующего момента представляемой конструкции электромагнита по сравнению с классическим типом клапанных электромагнитов.

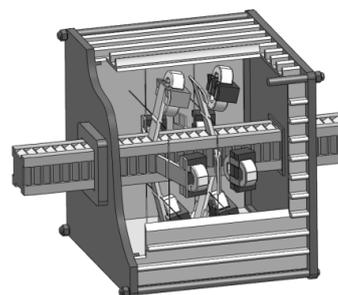


Рис. 1. Конструкция ЛШЭД с внутренним подвижным элементом

В виду сложности расчетов, в работе принимаются ряд допущений:

- магнитная проницаемость зазора равна проницаемости вакуума μ_0 , магнитная проницаемость стали сердечника равна бесконечности $\mu_r = \infty$;
- потоки выпучивания отсутствуют.
- смещение якоря в горизонтальном положении, по координате x , при отклонении якоря от полюса относительно оси, незначительно.

Погрешность, вызванная принимаемыми допущениями при расчете электротехнических и рабочих характеристик ЛШЭД, может составить до 17% от номинального значения.

Расчет характеристик электромагнита с ломаной формой якоря и полюса производится по стандартным формулам [1], но с учетом геометрических особенностей воздушного зазора.

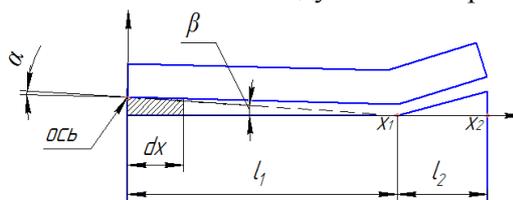


Рис. 2. Схема расчета ломаной формы зазора

Индукция магнитного поля определяется как

$$B_x = \frac{IwG}{S}; \quad (1)$$

где I – ток катушки электромагнита, w – число витков катушки электромагнита, S – площадь полюса.

Проводимость зазора при учете ломаной формы полюса и якоря

$$G = \frac{\mu_0 S}{\delta_{\text{ср}}}; \quad (2)$$

где $\delta_{\text{ср}}$ – средняя величина зазора.

$$\delta_{\text{ср},l_1} = \frac{f_1(x)}{2}; \quad \delta_{\text{ср},l_2} = \frac{f_2(x)}{2}; \quad (3)$$

где $f_1(x)$ и $f_2(x)$ – функции, описывающие зазор, образующийся между якорем и полюсом электромагнита соответственно на участках l_1 и l_2 .

$$f_1(x) = (l_1 - x) \tan(180 - \beta) + \frac{2x \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos(\beta)}; \quad (4)$$

$$f_2(x) = \delta_{\text{const},l} + \frac{2(x - l_1) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\cos(\beta)}; \quad (5)$$

где l_1 – длина участка l_1 ; β – угол, образующийся между полюсом на участке l_1 и якорем электромагнита, неизменный; α – угол, образующийся при отклонении якоря относительно оси, от исходного положения; $\delta_{\text{const},l}$ – постоянный зазор, сохраняемый на участке l_2 , при исходном положении якоря (притянутом).

С учетом (2) и (3) выражение (1) принимает вид

$$B_x = \frac{3Iw\mu_0}{f_1(x) + f_2(x)}. \quad (6)$$

Тяговое усилие электромагнита [2], характеризующееся индукцией на элементарном участке dx (рис. 2)

$$dF = \frac{B_x^2}{\mu_0} dS. \quad (7)$$

Интегрируя данное выражение, с учетом уравнения (6)

$$\sum F = \int_0^{x_1} \frac{\left(\frac{3Iw\mu_0}{f_1(x)}\right)^2}{\mu_0} dS + \int_{x_1}^{x_2} \frac{\left(\frac{3Iw\mu_0}{f_2(x)}\right)^2}{\mu_0} dS, \quad (8)$$

определяются характеристики тягового усилия электромагнита с прямой с ломаной формой якоря и полюса (рис. 3), относительно различных соотношений прямого l_1 и наклонного l_2 участков полюса. Значение участка l_1 указано в процентном соотношении относительно общей ширины электромагнита, где $l_1 = 100\%$, график характеризующий тяговую силу электромагнита с прямой формой якоря и полюса.

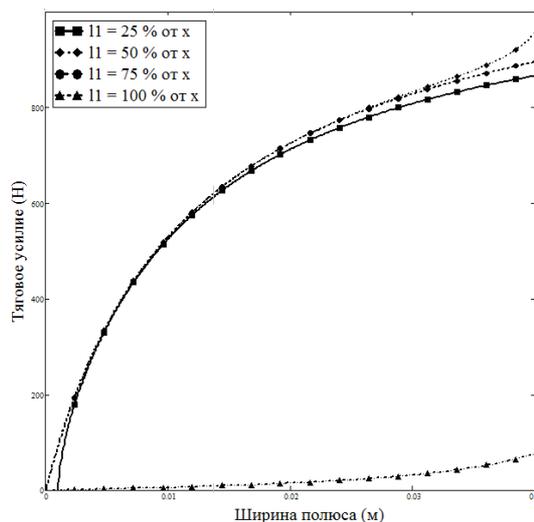


Рис. 3. Распределение тягового усилия по ширине полюса

Момент [3], действующий на элементарный участок dx якоря, определится из выражения:

$$dM = Fdx. \quad (10)$$

Интегрируя данное уравнение, определяется суммарный момент электромагнита с ломаной формой якоря и полюса

$$\sum M = \int_0^{x_1} \frac{9I^2 w^2 \mu_0 S}{[f_1(x)]^2} dx + \int_0^{x_2} \frac{9I^2 w^2 \mu_0 S}{[f_2(x)]^2} dx. \quad (12)$$

С учетом вышеизложенного, путем численного расчета результирующего момента относительно различных соотношений прямого l_1 и наклонного l_2 участков полюса, определяется величина суммарного момента (рис. 4).

В качестве сравнения приведена характеристика момента электромагнита без ломаной части, с шириной полюса равной величине участка $l_1 = 100\%$ от x .

Анализ электромагнита с ломаной формой якоря и полюса показал, что электромагнит, имеющий геометрические особенности воздушного зазора, имеет гораздо большую тяговую силу, чем электромагнит, имеющий классическую форму якоря и полюса. Появляется возможность добиться существенного увеличения

результатирующего момента электромагнита за счет варьирования геометрическими соотношениями участков l_1 и l_2 .

Например, исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что при создании наклонного участка l_2 (рис. 2), на полюсе электромагнита, имеющего длину, равную 50% от общей ширины полюса, наблюдается увеличение результирующего момента в 2 раза.

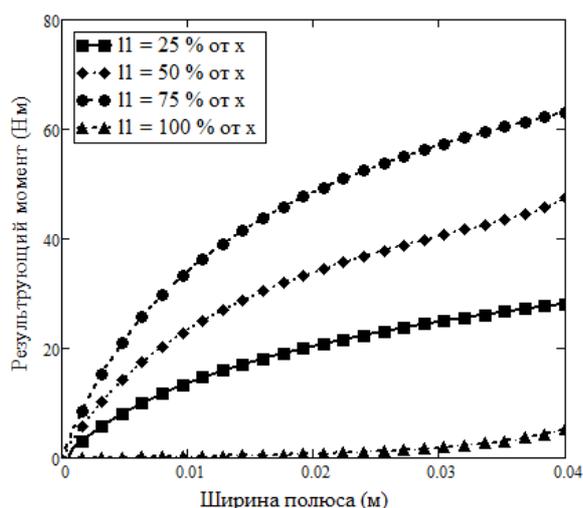


Рис. 4. Результирующий момент по ширине полюса

На основе полученных данных можно сделать вывод о целесообразности использования электромагнита со сложной геометрией воздушного зазора в качестве приводного механизма для ЛШЭД.

Полученные результаты могут служить в дальнейшем основой при проектировании

электромагнитных систем автоматики и силовой электроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 248 с.
2. Байда Е. И. Расчет электромагнитных систем с поперечным движением якоря и ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах // Электротехника и электромеханика. 2003. № 3. С. 7–12.
3. Чепелюк А. А. Экспериментальное исследование влияния формы рабочего зазора на тяговые усилия в электромагните с поперечным движением якоря // Электротехника и электромеханика. 2002. № 1. С. 77–80.

ОБ АВТОРАХ

Исмагилов Флюр Рашитович, проф., зав. каф. электромеханики, проректор УГАТУ. Дипл. инженер-электромеханик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по элементам и устройствам управления (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.

Хайруллин Ирек Ханифович, проф. той же каф. Дипл. инженер-электромеханик (Ивановск. энерг. ин-т, 1963). Д-р техн. наук по элементам и устр. упр. (УАИ, 1981). Иссл. в обл. электромех. преобр. энергии.

Охотников Михаил Валерьевич, асп. той же каф. Дипл. инженер-электромеханик (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. электромех. преобразователей энергии.