

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рымша В.В.

Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"
rimsha@omsp.od.ua

The theoretical base for the design of the linear switched reluctance motors are offered. Equations for the calculation the electromagnetic forces in the linear switched reluctance motors are obtained. The recommendations for the choice the geometrical ratios of the pole zone of the 3-phase linear switched reluctance motor are considered.

ВСТУПЛЕНИЕ

Линейные вентильно-реактивные двигатели (ЛВРД) являются одними из наиболее простых и дешевых линейных электрических машин [1,2]. Конструктивно ЛВРД, в зависимости от сферы применения, могут быть выполнены в одностороннем или двухстороннем вариантах, с продольным или поперечным контуром замыкания основного магнитного потока [1]. Наибольшее распространение получили двигатели с трех- и четырехфазными обмотками, которые расположены на первичном элементе (ПЭ) ЛВРД. Вторичный элемент (ВЭ) является пассивным. На рис. 1 представлен ЛВРД с продольным контуром замыкания основного магнитного потока односторонней конструкции трехфазного исполнения. ПЭ исполнен протяженным, ВЭ - коротким. Однако, двигатель может быть выполнен и в обратном варианте.

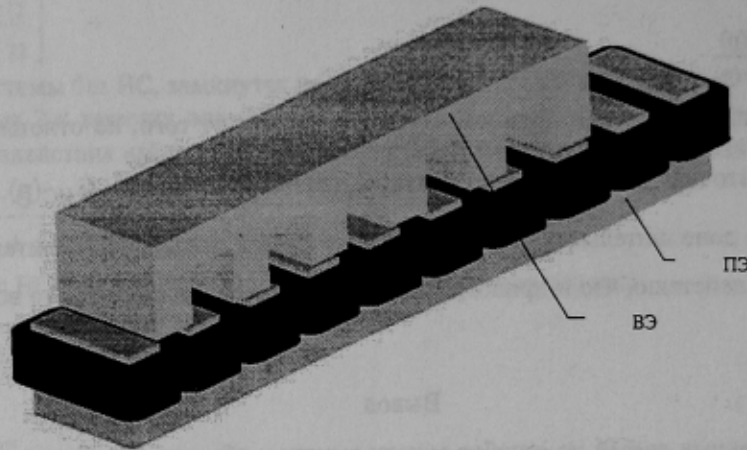


Рис. 1

Наличие многочисленных конструкций ЛВРД и особенности распределения магнитного поля в каждой из них затрудняют разработку единой методики расчета. Кроме того, для ЛВРД, в отличие от электрических машин общепромышленного применения, отсутствует многолетний опыт проектирования и, следовательно, отсутствуют рекомендации по выбору геометрии и электромагнитных нагрузок. В связи с этим задача по разработке методик проектирования различных конструктивных исполнений ЛВРД является актуальной. В настоящей статье рассмотрена методика проектирования трехфазного ЛВРД.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БАЗА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛВРД

Теоретической базой для создания методики проектирования ЛВРД могут служить уравнения для составляющих электромагнитной силы (ЭМС), действующей на первичный и вторичный элементы двигателя. Эти уравнения получены энергетическим методом на основе анализа процесса электромеханического преобразования энергии в ЛВРД при допущениях, правомерность которых обоснована в [3]:

- нелинейная магнитная цепь заменена эквивалентной линейной, в которой насыщение учитывается коэффициентом насыщения K_{μ} ;
- взаимоиндуктивность между катушками фаз обмотки отсутствует;
- индуктивность фазы ЛВРД L при взаимном перемещении ПЭ относительно ВЭ вдоль координаты x изменяется по закону

$$L(x) = L_1 - L_2 \cos\left(2\pi \cdot \frac{x}{\tau_2}\right), \quad (1)$$

где τ_2 - полюсное деление ВЭ; $L_1 = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}$, $L_2 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}$, L_{\max} - индуктивность фазы в согласованном положении, т.е. при совпадении осей зубцов ПЭ и ВЭ; L_{\min} - индуктивность фазы в рассогласованном положении, т.е. при совпадении оси зубца ПЭ с осью паза ВЭ;

- на интервале коммутации фазы $x_K = \frac{\tau_2}{m}$, где m - число фаз, реальное значение тока фазы заменяется его средним значением I_ϕ ;

- рассматривается установившийся режим работы двигателя;

С учетом принятых допущений уравнения для составляющих ЭМС по осям координат выглядят следующим образом:

- составляющая ЭМС по оси x (тяговое усилие)

$$F_x(x) = \left(\frac{I_\phi w_\phi}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 l_\delta \alpha_1 \tau_1}{\delta \tau_2} \left(1 - \frac{1}{K_L K_\mu} \right) \sin \left(2\pi \frac{x}{\tau_2} \right), \quad (2)$$

где l_δ - ширина активной части ЛВРД, α_1 - коэффициент полюсного перекрытия ПЭ, τ_1 - полюсное деление ПЭ, w_ϕ - число витков фазы обмотки ПЭ, δ - воздушный зазор, $K_L = \frac{L_{\max}}{L_{\min}}$ - коэффициент отношения индуктивностей;

- составляющая ЭМС по оси y (усилие одностороннего притяжения)

$$F_y(x) = - \left(\frac{I_\phi w_\phi}{2\delta K_\mu} \right)^2 \frac{\mu_0 l_\delta \alpha_1 \tau_1}{2K_L} \left[(K_L + 1) + (1 - K_L) \cos \left(2\pi \frac{x}{\tau_2} \right) \right]. \quad (3)$$

Из уравнения (2) могут быть получены выражения для расчета максимального и среднего (на интервале коммутации фазы) значений тягового усилия ЛВРД.

Максимальное тяговое усилие $F_{\text{тяг}}^{\max}$ имеет место при $x = \frac{\tau_2}{4}$:

$$F_{\text{тяг}}^{\max} = \left(\frac{I_\phi w_\phi}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 l_\delta \alpha_1 \tau_1}{\delta \tau_2} \left(1 - \frac{1}{K_L K_\mu} \right). \quad (4)$$

Учитывая, что для ЛВРД справедливо соотношение [2]:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_\tau}{m}, \quad (5)$$

где Z_1 - число активных полюсов ПЭ; Z_2 - число активных полюсов ВЭ; n_τ - число полюсных делений на ВЭ между ближайшими «согласованными» полюсами ВЭ, обеспечивающими работу одной фазы, для трехфазного ЛВРД при $n_\tau = 2$ и $m = 3$ получим:

$$F_{\text{тяг_3}\Phi}^{\max} = \frac{2}{3} \left(\frac{I_\phi w_\phi}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 l_\delta \alpha_1}{\delta} \left(1 - \frac{1}{K_L K_\mu} \right). \quad (6)$$

Среднее значение тягового усилия ЛВРД на интервале коммутации фазы обмотки можно определить следующим образом:

$$F_{\text{тяг}}^{\text{ср}} = \frac{2}{x_K} \int_{\tau_2/4}^{\tau_2/4 + x_K/2} F_x(x) dx = - \left(\frac{I_\phi w_\phi}{2} \right)^2 \frac{\pi \mu_0 l_\delta \alpha_1 \tau_1}{\delta \tau_2} \left(1 - \frac{1}{K_L K_\mu} \right) \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2+m}{m} \right). \quad (7)$$

Учитывая соотношение (5), среднее тяговое усилие трехфазного ЛВРД на интервале коммутации:

$$F_{\text{тяг_3}\Phi}^{\text{ср}} = 1,732 \left(\frac{I_\phi w_\phi}{2} \right)^2 \frac{\mu_0 l_\delta \alpha_1}{\delta} \left(1 - \frac{1}{K_L K_\mu} \right). \quad (8)$$

Приведенные уравнения являются базовыми для создания методики расчета ЛВРД.

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

В техническом задании на проектирование ЛВРД обычно заданы:

- максимальное тяговое усилие $F_{\text{тяг}}^{\max}$,
- максимальная скорость линейного перемещения V_{\max} ,
- напряжение питания U ,

- длина перемещения L_X .

Задавшись предварительным значением КПД η , можно определить ток источника:

$$I_{\text{ист}} = \frac{F_{\text{тяг}}^{\text{max}} \cdot V_{\text{max}}}{\eta \cdot U} \quad (9)$$

Ток фазы:

$$I_{\Phi} = \frac{I_{\text{ист}}}{k_{\text{зр}}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{зр}}$ - коэффициент, учитывающий наличие реактивной составляющей тока фазы, $k_{\text{зр}} = 0,5 \div 0,7$.

Число витков фазы:

$$w_{\Phi} = \frac{2 \cdot \delta \cdot B_{\delta} \cdot K_{\mu}}{\mu_0 \cdot I_{\Phi}}, \quad (11)$$

где B_{δ} - значение магнитной индукции в воздушном зазоре в согласованном положении первичного и вторичного элементов. Индукцию в воздушном зазоре в зависимости от марки используемой стали целесообразно выбирать в пределах $B_{\delta} = (1,0 \div 1,8)$ Тл. Коэффициент насыщения K_{μ} предварительно можно принять равным $1,1 \div 1,3$.

Ширина активной части трехфазного ЛВРД:

$$l_{\delta} = \frac{6 \cdot \delta \cdot F_{\text{тяг}}^{\text{max}}}{\pi \cdot \mu_0 \cdot I_{\Phi}^2 \cdot w_{\Phi}^2 \cdot \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{K_L \cdot K_{\mu}}\right)} \quad (12)$$

Проведенные исследования магнитного поля ЛВРД [4] позволяют рекомендовать выбор значения коэффициента K_L из диапазона $K_L = (4 \div 6)$ при величине воздушного зазора $\delta = (0,5 \div 2)$ мм.

Полусное деление ПЭ:

$$\tau_1 = \frac{l_{\delta}}{\lambda}, \quad (13)$$

где λ - относительная ширина ПЭ, величину которой можно принять в пределах $\lambda = (0,8 \div 1,2)$.

Полусное деление ВЭ:

$$\tau_2 = \frac{m \cdot \tau_1}{n_{\tau}} \quad (14)$$

Определив основные геометрические размеры ЛВРД, можно рассчитать остальную геометрию машины, ее обмоточные данные, магнитную цепь, массу активных материалов и уточнить значения предварительно принятых коэффициентов и электромагнитных нагрузок.

Из уравнения (12) видно, что на этапе расчета основных геометрических размеров неизвестной величиной является коэффициент полусного перекрытия ПЭ α_1 . Кроме того, при расчете зубцовой зоны ВЭ необходимо знать коэффициент полусного перекрытия ВЭ α_2 и высоту полюса ВЭ h_{B2} . Указанные величины могут быть определены на основе расчета магнитного поля ЛВРД в нелинейной постановке задачи с использованием математической модели [4]. В связи с тем, что одним из важнейших требований при проектировании ЛВРД является обеспечение минимальной величины пульсаций тягового усилия на интервале коммутации, выбор коэффициентов α_1 и α_2 будем проводить исходя из этого критерия.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЮСНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрим трехфазный ЛВРД с подвижным вторичным элементом (рис. 1). Материал ПЭ – сталь Ст3, материал ВЭ – электротехническая сталь 2013. Магнитное поле двигателя определялось методом конечных элементов в плоской постановке задачи с использованием программного обеспечения [5]. Исследования проводились при изменении коэффициента α_1 в пределах $\alpha_1 = (0,5 \div 0,68)$, коэффициента α_2 в пределах $\alpha_2 = (0,4 \div 0,6)$ при следующих исходных данных: $\delta = 1$ мм, $\tau_1 = 40$ мм, $\tau_2 = 60$ мм.

Коэффициент пульсаций тягового усилия в относительных единицах определялся как:

$$K_{\Pi} = \frac{F_{\text{тяг}}^{\text{max}} - F_{\text{тяг}}^{\text{min}}}{2 \cdot F_{\text{тяг}}^{\text{cp}}}, \quad (15)$$

где $F_{\text{тяг}}^{\text{min}}$ - минимальное значение тягового усилия на интервале коммутации.

Для определения коэффициента K_{Π} магнитное поле двигателя рассчитывалось при различных положениях ПЭ относительно ВЭ. Смещение ВЭ осуществлялось от согласованного к полностью

рассогласованному положению с шагом 1 мм. По результатам расчета магнитного поля определялось значение тягового усилия и по (15) рассчитывался коэффициент K_{Π} . Расчетные исследования проводились при токе фазы $I_{\phi} = 12\text{A}$, что соответствует началу перехода магнитной системы ЛВРД в насыщенное состояние, т.е. на колене кривой намагничивания. Результаты исследований представлены на рис. 2 в виде графиков $K_{\Pi} = f(\alpha_2)$ при $\alpha_1 = \text{var}$.

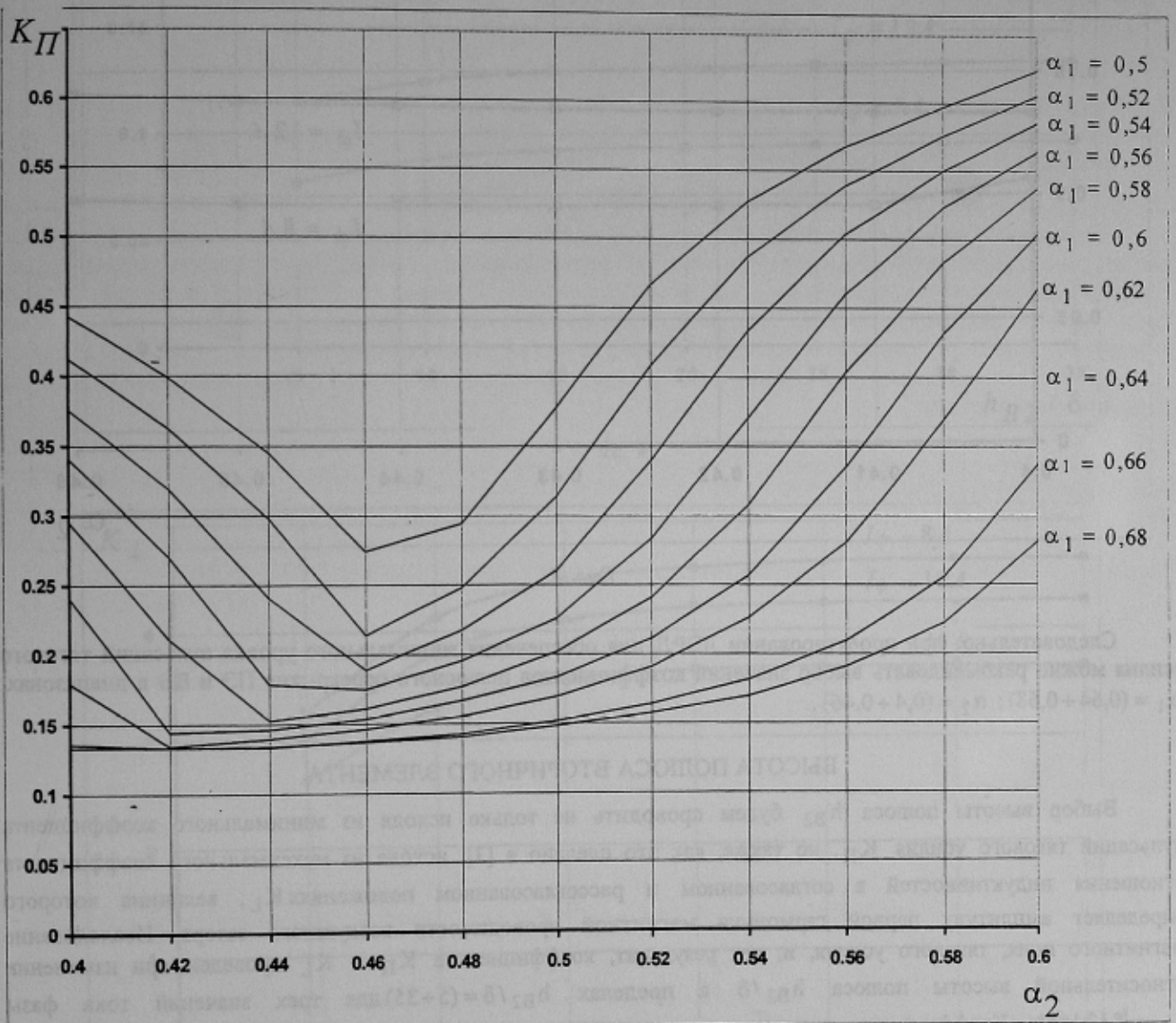


Рис. 2

Анализ данных зависимостей показывает, что минимальное значение коэффициента пульсаций тягового усилия достигается при $\alpha_1 = (0,64 \div 0,68)$ и $\alpha_2 = (0,4 \div 0,46)$. С целью оценки влияния степени насыщения магнитной цепи ЛВРД на величину коэффициента K_{Π} при изменении α_2 в указанных выше пределах были проведены дополнительные расчеты магнитного поля и тягового усилия при токе фазы $I_{\phi} = 8\text{A}$, что соответствует ненасыщенному состоянию магнитной цепи ЛВРД, и при токе фазы $I_{\phi} = 16\text{A}$, что соответствует высокому уровню насыщения его магнитной цепи. При проведении дополнительных расчетов коэффициент полюсного перекрытия ПЭ был равен $\alpha_1 = 0,64$. Результаты представлены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что изменение α_2 в пределах $(0,4 \div 0,46)$ не оказывает существенного влияния на величину пульсаций тягового усилия при различном уровне насыщения магнитной системы ЛВРД.

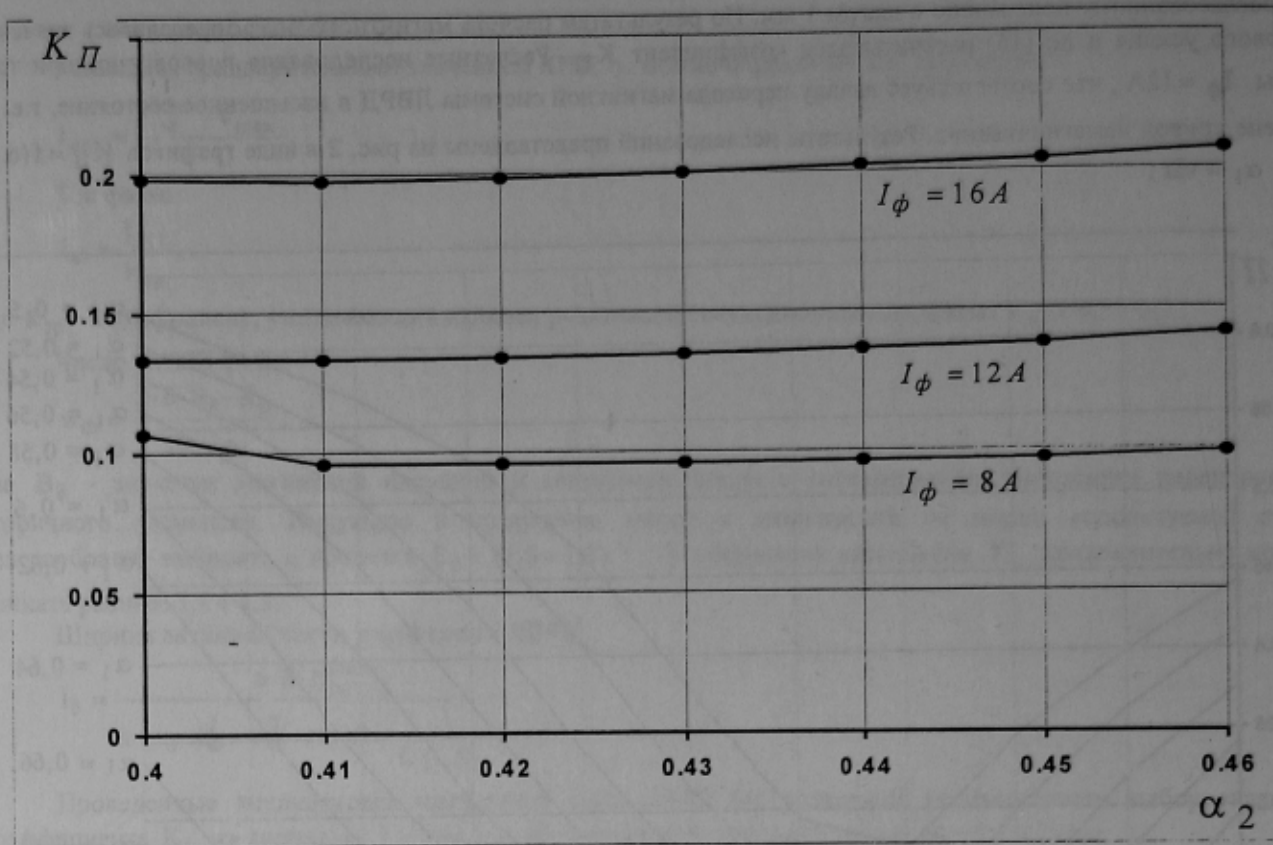


Рис. 3

Следовательно, при проектировании ЛВРД для обеспечения минимального уровня пульсаций тягового усилия можно рекомендовать выбор значений коэффициентов полюсного перекрытия ПЭ и ВЭ в диапазонах: $\alpha_1 = (0,64 \div 0,68)$; $\alpha_2 = (0,4 \div 0,46)$.

ВЫСОТА ПОЛЮСА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Выбор высоты полюса h_{B2} будем проводить не только исходя из минимального коэффициента пульсаций тягового усилия K_{Π} , но также, как это сделано в [3], исходя из максимального коэффициента отношения индуктивностей в согласованном и рассогласованном положениях K_L , величина которого определяет амплитуду первой гармоники магнитной проводимости воздушного зазора. Исследование магнитного поля, тягового усилия, и, как результат, коэффициентов K_{Π} и K_L проведем при изменении относительной высоты полюса h_{B2}/δ в пределах $h_{B2}/\delta = (5 \div 35)$ для трех значений тока фазы $I_{\phi} = \{8, 12, 16\} A$. Коэффициенты полюсного перекрытия во всех расчетах: $\alpha_1 = 0,64$, $\alpha_2 = 0,42$. Результаты расчетов отражены на рис. 4 в виде графиков функций $K_{\Pi} = f(h_{B2}/\delta)$ при $I_{\phi} = \{8, 12, 16\} A$ и на рис. 5 в виде графиков функций $K_L = f(h_{B2}/\delta)$ при $I_{\phi} = \{8, 12, 16\} A$. Анализ представленных зависимостей показывает, что:

- требования обеспечения минимальной величины коэффициента K_{Π} и одновременно максимальной величины коэффициента K_L противоречат друг другу и в этой ситуации необходим поиск компромиссного решения;
- минимальное значение коэффициента K_{Π} имеет место при минимальной относительной высоте полюса. С увеличением отношения h_{B2}/δ величина коэффициента K_{Π} изменяется мало даже при существенном насыщении магнитной цепи двигателя;
- коэффициент K_L практически не увеличивается при $h_{B2}/\delta > (20 \div 25)$ вне зависимости от степени насыщения магнитной системы двигателя.

Следовательно, при проектировании ЛВРД рекомендуется выбирать высоту полюса ВЭ в пределах $h_{B2} = (20 \div 25) \cdot \delta$, что обеспечивает максимальную величину первой гармоники проводимости воздушного зазора и приемлемый уровень пульсаций тягового усилия. Увеличение h_{B2} сверх указанных пределов нецелесообразно, т.к. приводит к увеличению габаритов двигателя.

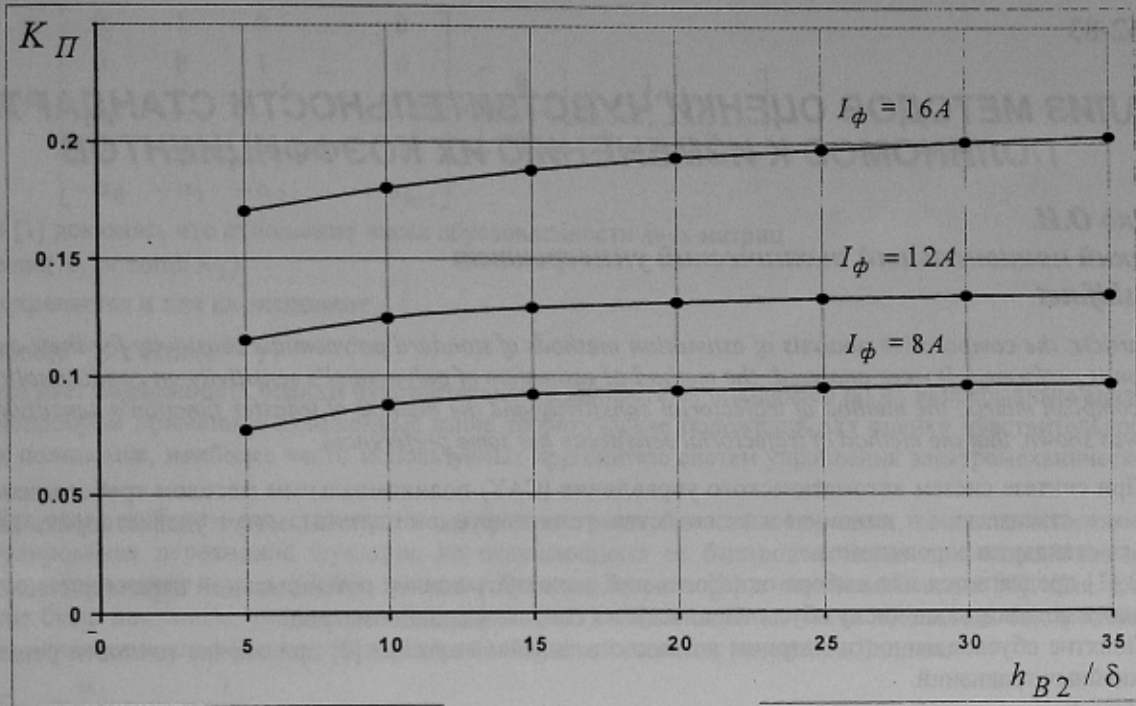


Рис. 4

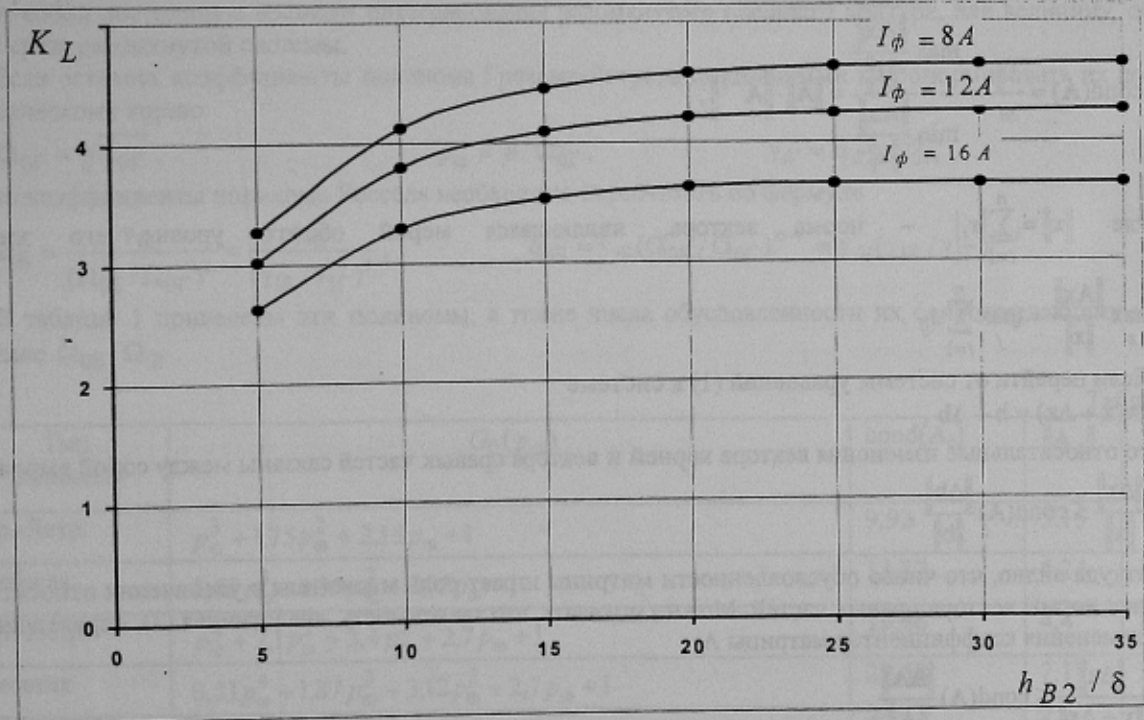


Рис. 5

ЛИТЕРАТУРА

1. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. – CRC Press, 2001. – 398 p.
2. Бут Д.А., Чернова Е.Н. Линейные вентильно-индукторные двигатели. Часть 1 // Электричество. – 1999. – № 12. – С. 32-41.
3. Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". 2001. – 404 с.
4. Рымша В.В. Расчет параметров статического режима линейного вентильно-индукторного двигателя // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 59. – С. 84-88.
5. <http://femm.berlios.de>.

Надано до редакції:
Рекомендовано до друку:

13.09.2003
д.т.н., проф. Дегтев В.Г.