

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Рымша В.В., к.т.н., доц.

Одесский национальный политехнический университет  
Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин  
Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"  
Украина, 65005, Одесса, ул. Дальницкая, 23  
тел.(048) 738-58-55, E-mail: rimsha@omsp.od.ua, nro@omsp.od.ua

Радимов И.Н., к.т.н., доц.

Научно-производственное предприятие "Одесмонтажспецпроект"  
Украина, 65005, Одесса, ул. Дальницкая, 23  
тел.(048) 738-58-55, E-mail: nro@omsp.od.ua

*Представлены результаты моделирования трехмерного магнитного поля в линейном вентильно-реактивном двигателе (ЛВРД) с поперечным магнитным потоком с учетом нелинейных свойств ферромагнитных материалов. На основе результатов моделирования магнитного поля проведен расчет электромагнитных сил (ЭМС), действующих на подвижный элемент ЛВРД. Отражены данные сопоставительного анализа результатов расчета силы одностороннего магнитного притяжения при двухмерном и трехмерном моделировании.*

*Наведено результати моделювання тривимірного магнітного поля у лінійному вентильно-реактивному двигуні (ЛВРД) з поперечним магнітним потоком з урахуванням нелінійних властивостей ферромагнітних матеріалів. На основі результатів моделювання магнітного поля проведено розрахунок електромагнітних сил (ЕМС), які діють на рухомий елемент ЛВРД. Відображені данні порівняльного аналізу результатів розрахунку сили одностороннього магнітного притягання при двовимірному та тривимірному моделюванні.*

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. Наибольшее распространение получили двигатели с трех- и четырехфазными обмотками, которые расположены на первичном элементе (ПЭ) ЛВРД. Вторичный элемент (ВЭ) является пассивными и может быть изготовлен на основе современных лазерных технологий, что существенно снижает стоимость изготовления ЛВРД.

Как односторонние, так и двухсторонние конструкции ЛВРД имеют свои преимущества и недостатки. Однако, основным преимуществом двухстороннего варианта (рис. 1) является более высокое значение удельного тягового усилия. Отличительная особенность двухстороннего варианта состоит также в скомпенсированной силе одностороннего магнитного притяжения, в то время как в односторонней конструкции сила притяжения многократно превышает тяговое усилие.

На рис. 1 показаны возможные конструктивные исполнения двухсторонних вариантов ЛВРД с продольным (рис. 1,а) и поперечным (рис. 1,б – на рисунке показана магнитная система одной фазы ПЭ) магнитным потоком.

Результаты расчета магнитного поля и электромагнитных сил (ЭМС) в ЛВРД с продольным магнитным потоком приведены в [3], где показано, что необходимость расчета трехмерного магнитного поля должна быть строго обоснована, т.к. при этом не обеспечивается существенное увеличение точности расчета

ЭМС по сравнению с двухмерной задачей, а лишь значительно возрастают вычислительные затраты.

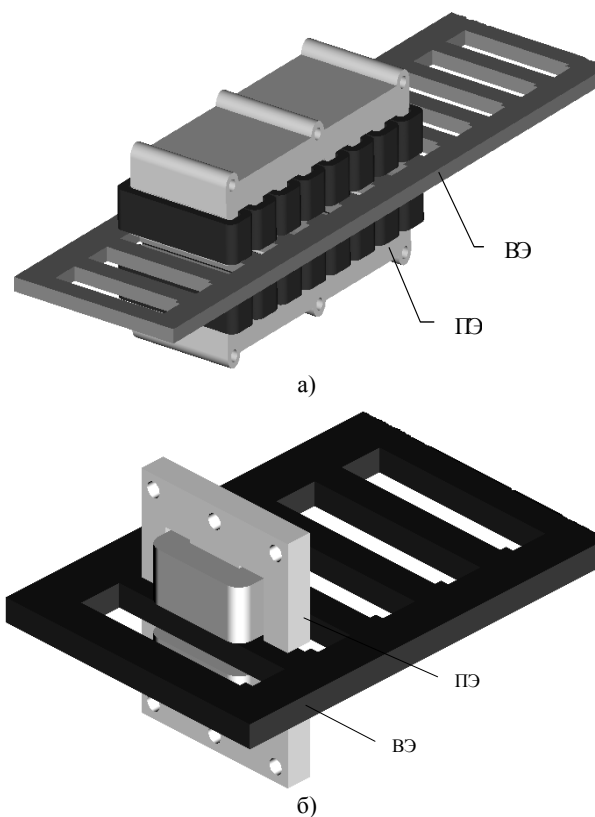


Рис. 1. Двухсторонний ЛВРД с продольным (а) и поперечным (б) магнитным потоком

В отличие от ЛВРД с продольным магнитным потоком в ЛВРД с поперечным магнитным потоком

расчет ЭМС на основе двухмерных полевых моделей возможен лишь в некоторых частных случаях.

Например, на основе двухмерной конечноэлементной модели (рис. 2) возможен расчет лишь максимальной силы одностороннего магнитного притяжения  $F_y$  при условии совпадения зубцов ПЭ и ВЭ, а расчет тягового усилия не представляется возможным. Это связано с тем, что в данной постановке задачи магнитный поток замыкается в плоскости, перпендикулярной плоскости действия вектора тягового усилия (рис. 3).

В то же время решение задачи расчета магнитного поля в трехмерной постановке позволяет определить все составляющие ЭМС по осям координат. На рис. 4÷5 представлены результаты трехмерного моделирования в виде распределения магнитного потока в ЛВРД (рис. 4) и поверхности магнитной индукции в верхнем воздушном зазоре (рис. 5).

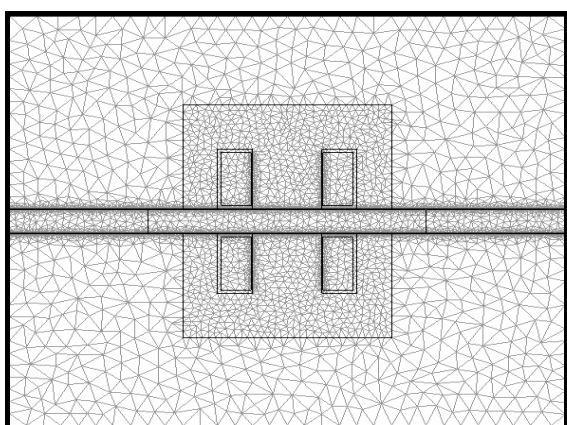


Рис. 2. Двухмерная конечноэлементная модель ЛВРД

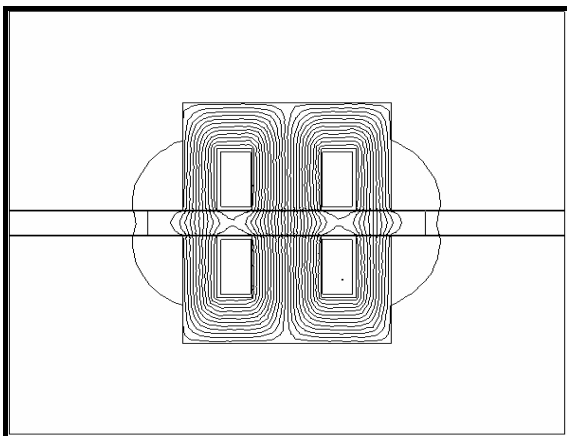


Рис. 3. Распределение магнитного потока в ЛВРД

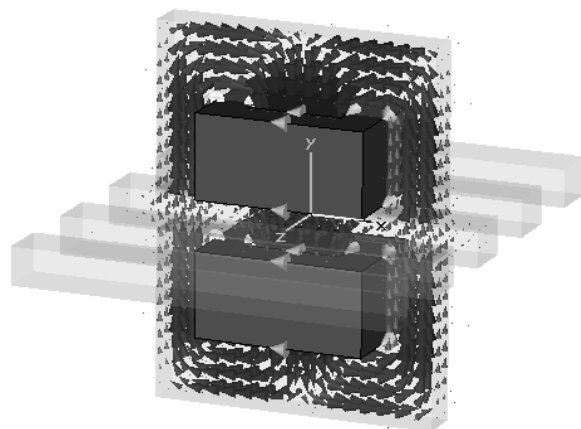


Рис. 4. Распределение магнитного поля в ЛВРД

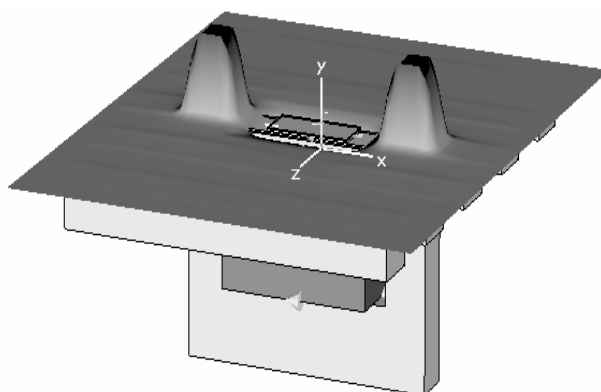


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре ЛВРД

Полученные результаты позволяют рассчитать тяговое усилие ( в данном случае составляющая ЭМС  $F_z$  ) и усилие притяжения (составляющая ЭМС  $F_y$  ) в зависимости от тока фазы  $I_\Phi$  и смещения  $z$  магнитопроводов первичного и вторичного элементов ЛВРД относительно друг друга (рис. 6,7), что необходимо для моделирования переходных и квазиустановившихся процессов в ЛВРД по методике [4].

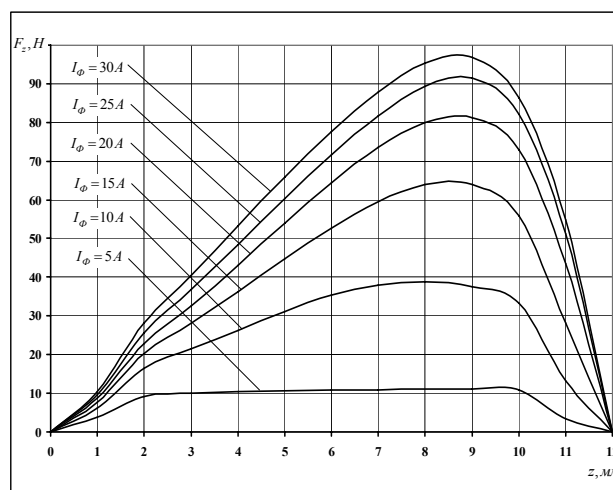


Рис. 6. Зависимости  $F_z = f(z, I_\Phi)$

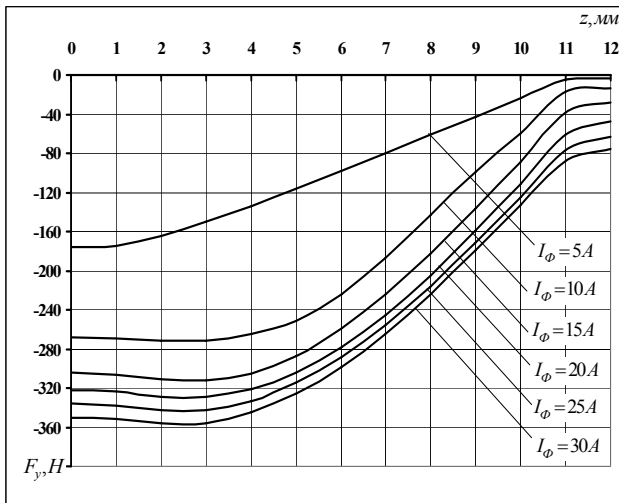


Рис. 7. Зависимости  $F_y = f(z, I_\Phi)$

Представленные выше исследования проведены при воздушном зазоре  $\delta = 0,3$  мм и ширине пакета  $l_\delta = 9$  мм.

С целью выявления допустимых границ применения двумерной полевой математической модели для расчета составляющей силы  $F_y$ , действующей на нижний, либо верхний, магнитопровод ЛВРД с поперечным магнитным потоком, проведем моделирование магнитного поля и расчет  $F_y$  в двумерной и трехмерной постановках при  $l_\delta = 9$  мм,  $l_\delta = 40$  мм и  $l_\delta = 100$  мм. Расчетные исследования осуществим при согласованном положении магнитопроводов первичного и вторичного элементов ЛВРД для увеличенного до 1 мм воздушного зазора, при котором в большей степени проявляются краевые эффекты. Результаты исследований представлены на рис. 8 ÷ 10. Из полученных данных следует, что совпадение результатов двумерного и трехмерного моделирования наблюдается при ненасыщенной магнитной системе для всех трех вариантов, а при насыщении – только для третьего варианта, в котором  $l_\delta = 100$  мм.

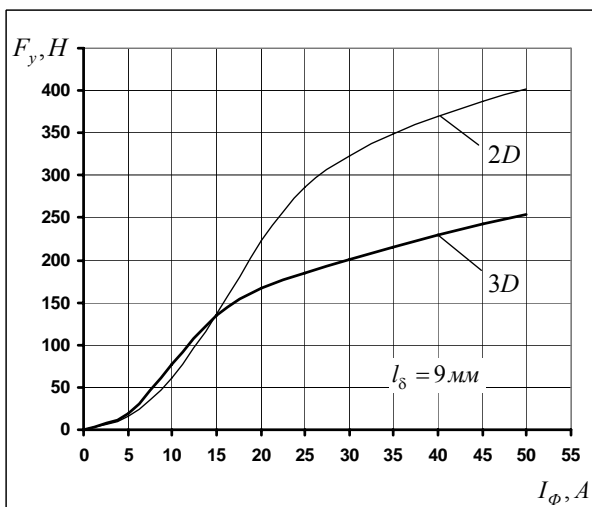


Рис. 8. Зависимости  $F_y = f(I_\Phi)$  для двумерного и трехмерного случая при  $l_\delta = 9$  мм

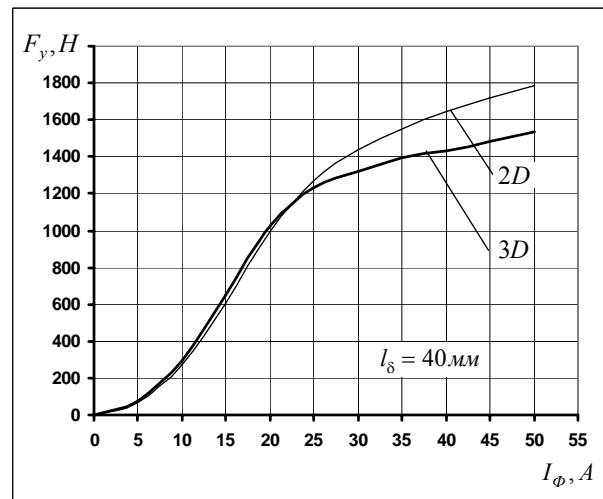


Рис. 9. Зависимости  $F_y = f(I_\Phi)$  для двумерного и трехмерного случая при  $l_\delta = 40$  мм

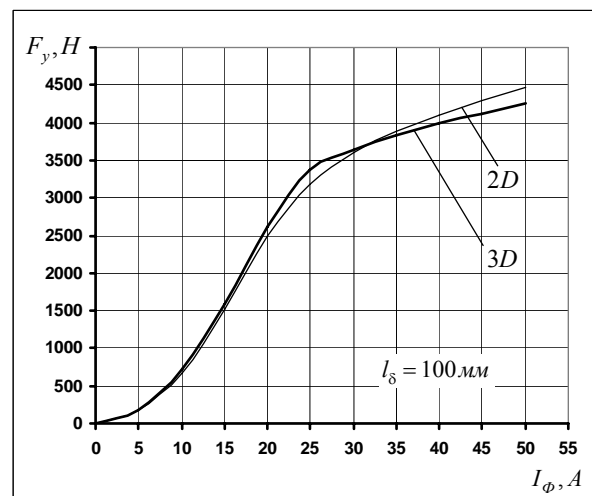


Рис. 10. Зависимости  $F_y = f(I_\Phi)$  для двумерного и трехмерного случая при  $l_\delta = 100$  мм

Следовательно, необходимая точность расчета силы  $F_y$  в ЛВРД с поперечным магнитным потоком на базе двумерных полевых математических моделей обеспечивается для принятой геометрии при  $l_\delta \gg \delta$ , т.е. в тех случаях, когда разомкнутостью магнитопровода по координате  $z$  можно пренебречь.

#### 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] Рымша В.В. Математическое моделирование линейных вентильно-реактивных двигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2003. – № 4. – С. 72-76.
- [4] Радимов И.Н., Рымша В.В., Малеваный О.Е. Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя // Электротехника і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60-64.

Поступила 15.02.2005