

ЭДС ВРАЩЕНИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА РОТОРЕ

Гетья А.Н.

ГП "Харьковское агрегатное конструкторское бюро"
Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 132, ГП "ХАКБ"
тел. (057) 707-02-71, факс (057) 707-02-73, E-mail: khadb@ukr.net

Финкельштейн В.Б., д.т.н., проф.

Харьковская Национальная академия городского хозяйства
Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ, кафедра электротехники
тел. (0572) 21-93-69. E-mail: final@kharkov.ukrpack.net

В статі наведена крива розподілу магнітної індукції на поверхні полюса ротора, з урахуванням зубчатої будови магнітопроводу статора. Запропоновані залежності для визначення ЕРС обертання при розрахунках перехідних процесів у вентильному двигуні.

В статтє приведена кривая распределения магнитной индукции на поверхности полюса ротора, с учетом зубчатости магнитопровода статора. Предложены зависимости для определения ЭДС вращения при расчете переходных процессов в вентильном электродвигателе.

Метод расчета вентильных электродвигателей, основанный на решении дифференциальных уравнений, описывающих процессы электромеханического преобразования энергии [1], позволяет учесть большее число факторов, влияющих на выходные характеристики электродвигателя, и позволяет получить результаты наиболее соответствующие реальным параметрам проектируемых электродвигателей. Однако для получения точных результатов, необходимы исходные данные в виде функциональных зависимостей, таких как изменение индуктивности и коэффициента взаимной индукции фаз от угла поворота ротора, влияние зубчатости магнитопровода и геометрии постоянных магнитов на кривую распределения магнитной индукции в зазоре, потери в магнитопроводе статора, бандаже и постоянных магнитах ротора. Одной из функциональных величин, используемых при расчете переходных процессов в обмотке вентильного электродвигателя, является зависимость ЭДС вращения в фазах от угла поворота ротора. Для облегчения вычислений [3] полагают распределение магнитной индукции в воздушном зазоре синусоидальным, однако реальное распределение носит трапециидальный характер, что необходимо учитывать при расчетах вентильных электродвигателей.

Цель настоящей работы заключается в определении математических зависимостей описывающих изменение ЭДС наводимой в фазах обмотки вентильного электродвигателя при вращении ротора с постоянными магнитами и реальной кривой распределения магнитной индукции в зазоре.

На рис. 1 приведена магнитная система вентильного электродвигателя. Ротор набран из сегментных постоянных магнитов закрепленных на призматическом магнитопроводе, магниты по внешнему диаметру удерживаются бандажом из немагнитного материала (сталь 12Х18Н10Т, либо титановый сплав ВТ-3, либо алюминий Д16Т). В качестве материала постоянных магнитов применяются сплавы Nd-Fe-B и Sm-

Со. Магнитопровод статора выполнен шихтованным из электротехнической стали, изотропной по магнитным свойствам.

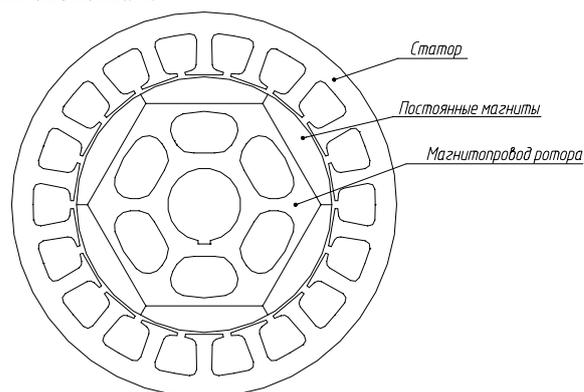


Рис. 1. Магнитная система вентильного электродвигателя

На рис. 2 приведена картина магнитного поля вентильного электродвигателя полученная с помощью программы FEMM расчета магнитных полей методом конечных элементов.

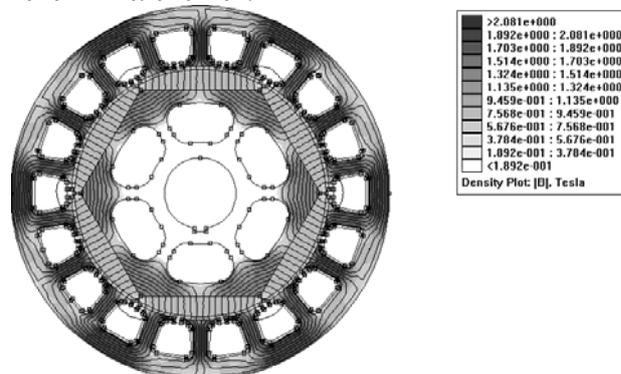


Рис. 2. Распределение магнитного потока в вентильном электродвигателе

Кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре на одном полюсном делении при-

ведена на рис. 3. Как видно из рисунка магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами, распределена на полюсном делении почти трапециидально. В верхней части видны пульсации магнитной индукции, обусловленные зубчатостью статора.

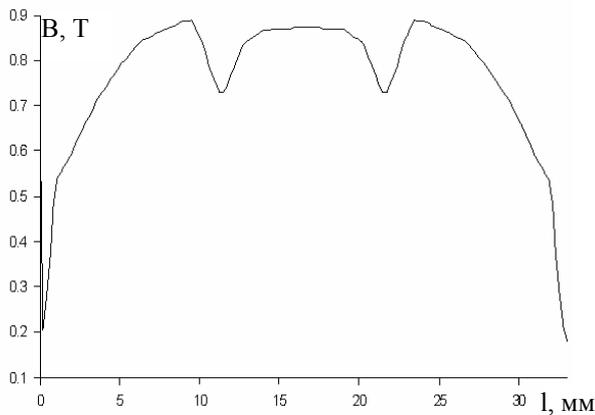


Рис. 3. Распределение магнитной индукции на полюсном делении

Разложение в тригонометрический ряд Фурье трапециидального распределения магнитной индукции записывают следующим образом [2]:

$$B = \frac{4 \cdot a}{\beta \cdot \pi} \left(\sin \beta \cdot \sin(\alpha) + \frac{\sin(3 \cdot \beta)}{9} \cdot \sin(3 \cdot \alpha) + \dots + \frac{\sin((2n-1) \cdot \beta)}{(2n-1)^2} \cdot \sin((2n-1) \cdot \alpha) \right) \quad (1)$$

ЭДС вращения, наводимая в одной фазе трехфазной обмотки с учетом выражения (1) и ограничившись двумя первыми членами ряда, запишется следующим образом:

$$E_A(\alpha) = E(\alpha) = E_M \cdot \left(\sin \beta \cdot \sin(p \cdot \alpha) + \frac{\sin(3 \cdot \beta)}{9} \cdot \sin(3 \cdot p \cdot \alpha) \right)$$

$$E_B(\alpha) = E_M \cdot \left(\sin \beta \cdot \sin(p \cdot (\alpha - 120^\circ)) + \frac{\sin(3 \cdot \beta)}{9} \cdot \sin(3 \cdot p \cdot (\alpha - 120^\circ)) \right) \quad (2)$$

$$E_C(\alpha) = E_M \cdot \left(\sin \beta \cdot \sin(p \cdot (\alpha - 240^\circ)) + \frac{\sin(3 \cdot \beta)}{9} \cdot \sin(3 \cdot p \cdot (\alpha - 240^\circ)) \right)$$

а ЭДС наводимая в двух фазах определится выражениями [3], [4]:

$$\begin{aligned} E_{AB}(\alpha) &= E(\alpha) - E(\alpha - 120^\circ) \\ E_{BC}(\alpha) &= E(\alpha - 120^\circ) - E(\alpha - 240^\circ) \\ E_{CA}(\alpha) &= E(\alpha - 240^\circ) - E(\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

где: $E_M = C \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \frac{4}{\beta \cdot \pi}$, C – постоянный коэффициент, зависящий от полюсности электродвигателя и типа обмотки; Φ_m – магнитный поток; β – угол между

основанием и непараллельными сторонами трапеции (рис. 4); ω – частота вращения ротора; α – текущий угол поворота ротора; p – число пар полюсов; a – максимальное значение функции, описывающей магнитную индукцию.

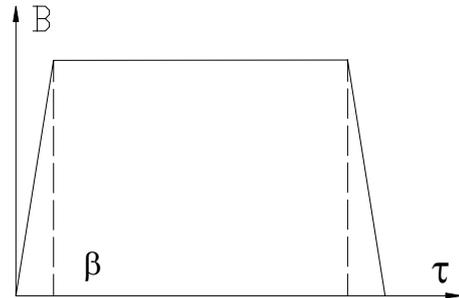


Рис. 4. Трапециидальная функция

График изменения ЭДС вращения в зависимости от угла поворота ротора представлен на рис. 5.

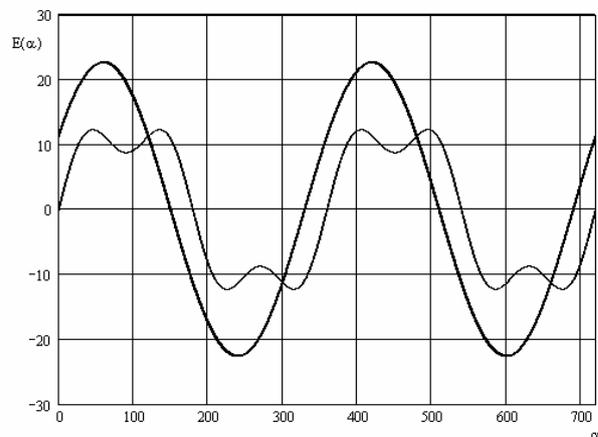


Рис. 5. Зависимость ЭДС-вращения от угла поворота ротора

На рис. 5 синусоидальное распределение, показанное жирной линией, соответствует ЭДС наводимой в двух фазах, а тонкой линией показана ЭДС в одной фазе.

ЭДС вращения определенная по зависимостям (3) входит в системы дифференциальных уравнений описывающие преобразование электромеханической энергии в электродвигателе. Ниже приведены системы уравнений электродвигателя состоящие из уравнений баланса напряжений для контуров обмотки и уравнения динамики ротора электродвигателя, для первого участка коммутации на котором ток протекает в двух фазах соединенных последовательно (4). И для второго, на котором происходит нарастание тока в подключаемой фазе, колебания тока в работающей фазе и спадание тока в фазе замкнутой с работающей фазой через шунтирующий диод. (5).

$$\begin{cases} 2 \cdot \frac{dI_a}{dt} (L + M) + 2 \cdot (R + R_k) \cdot I_a + E_{AC}(\alpha) = U \\ J_{pr} \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_H - M_{п}(\omega) \\ M_{дв} = 2 \cdot I_a \cdot C_m \\ \frac{d\alpha}{dt} = \omega \end{cases} \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
(L+M) \cdot \left(\frac{dI_a}{dt} + \frac{dI_b}{dt} \right) + \\
+ (R+R_k) \cdot I_a + (R+R_D) \cdot I_b + E_{AB}(\alpha) = 0 \\
(L+M) \cdot \left(\frac{dI_a}{dt} + \frac{dI_c}{dt} \right) + \\
+ (R+R_k) \cdot (I_a + I_c) + E_{AC}(\alpha) = U \\
I_a = I_b + I_c \\
J_{pr} \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_n - M_{п}(\omega) \\
M_{дв} = 2 \cdot I_a \cdot C_m \\
\frac{d\alpha}{dt} = \omega
\end{array} \right. \quad (5)$$

где: I_a, I_b, I_c – токи в фазах a, b, c ; L , – индуктивность фазы; M – взаимная индуктивность фаз обмотки; R, R_k, R_D , – сопротивление фазы обмотки, открытого канала силового транзистора, шунтирующего диода; U – напряжение питания; J_{pr} – приведенный момент инерции вала и нагрузки; C_m – коэффициент момента; $M_{дв}$ – электромагнитный момент создаваемый электродвигателем; M_n – нагрузочный момент на валу электродвигателя; $M_{п}$ – момент потерь в электродвигателе.

Уравнения для других участков коммутации записываются аналогично (4) и (5) с учетом периодичности подключения фаз.

После преобразования системы уравнений (5) относительно токов в работающей и отключаемой фазе и отделения правых частей противо-ЭДС вращения при токе отключаемой фазы запишется следующим образом:

$$\begin{aligned}
E_1 &= 3 \cdot E(\alpha) - 2 \cdot E(\alpha - 120^\circ) - E(\alpha - 240^\circ) \\
E_2 &= 3 \cdot E(\alpha - 240^\circ) - 2 \cdot E(\alpha) - E(\alpha - 120^\circ) \\
E_3 &= 3 \cdot E(\alpha - 120^\circ) - 2 \cdot E(\alpha - 240^\circ) - E(\alpha)
\end{aligned} \quad (6)$$

А при токе работающей фазы:

$$\begin{aligned}
E_1 &= E(\alpha - 240^\circ) - E(\alpha - 120^\circ) \\
E_2 &= E(\alpha - 120^\circ) - E(\alpha) \\
E_3 &= E(\alpha) - E(\alpha - 240^\circ)
\end{aligned} \quad (7)$$

В преобразованной системе уравнений (4) противо-ЭДС запишется выражениями (7) с обратным знаком. В зависимостях (6) и (7) индексы при ЭДС обозначают участки коммутации, т.е. имеет место двухполупериодная коммутация, при которой друг за другом идут шесть участков коммутации описываемые уравнениями (4) и (5) а затем шесть участков с реверсом тока в фазах.

Порядок расчета электродвигателя может быть следующим: при проектировочном расчете электродвигателя используются зависимости (2), (6), (7). После выполнения расчета на этапе конструкторской проработки выполняется компоновка электродвигателя и прорисовывается магнитная система. По результатам конструкторской проработки методом конечных элементов рассчитывается реальное распределение магнитной индукции на полюсном делении. Полученное распределение раскладывается в ряд Фурье, далее по приведенной методике делается уточненный

расчет вентильного электродвигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные математические зависимости для описания ЭДС вращения в вентильном электродвигателе с постоянными магнитами на роторе позволяет получать расчетные результаты адекватные экспериментальным с погрешностью не превышающей (5-10)%.

2. По приведенной методике в ГП "ХАКБ" был выполнен расчет и изготовлены вентильные электродвигатели, успешно эксплуатирующиеся на самолетах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова – М.: Энергия, 1980. 459с.
- [2] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1962. 608с.
- [3] Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики Л.: Энергоатомиздат, 1985. 364с.
- [4] Зевеке Г.В., Ионкин П.А. Основы теории цепей М.: Энергоатомиздат, 1989. 528с.

Поступила 08.07.2005