

## РАСКРОЙ ЛИСТОВ МАГНИТОПРОВОДА ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Зинченко Е.Е.

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта  
Украина, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, кафедра электротехники и электрических машин  
тел. (057) 730-19-96

Финкельштейн В.Б., д.т.н.

Харьковская национальная академия городского хозяйства  
Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, кафедра электротехники  
тел. (057) 731-95-28, E-mail: final@kharkov.ukrpack.net

*Запропонована методика розрахунку геометричних розмірів листів магнітопроводу статора і ротора вентильних індукторно-реактивних двигунів, яка забезпечує максимальне значення енергії магнітного поля у повітряному проміжку при заданій густині струму.*

*Предложена методика расчета геометрических размеров листов магнитопровода статора и ротора вентильных индукторно-реактивных двигателей, обеспечивающая максимальное значение энергии магнитного поля в воздушном зазоре при заданной величине плотности тока.*

Энергетические и массогабаритные показатели вентильных индукторно-реактивных двигателей жестко связаны с геометрическими соотношениями размеров спинок зубцов и расточки т.е. с раскроем магнитопровода. Характеристики и технический уровень двигателя будут тем выше чем большая энергия магнитного поля будет сосредоточена в воздушном зазоре.

В данной статье предлагается методика определения таких геометрических размеров магнитопровода, при которых энергия магнитного поля сосредоточенная в воздушном зазоре максимальна.

С целью сохранения деталей конструкции асинхронных двигателей, используемых для вентильных индукторно-реактивных двигателей, наружный диаметр сердечника статора  $d_n$  в соответствующей высоте оси вращения сохраняется неизменным. В [1] рекомендуется диаметр расточки выбирать в пределах  $(0,45 \div 0,65) \cdot d_n$ . Определение же конкретной величины диаметра расточки не приведено. Примем в качестве варьируемой величины диаметр расточки статора  $d_i$  и определим такое его значение, при котором максимальна энергия магнитного поля сосредоточенная в воздушном зазоре. При одиночной коммутации магнитный поток в спинке статора равен половине магнитного потока зубца статора. Но при одиночной коммутации большая амплитуда пульсаций момента двигателя. Для уменьшения пульсаций момента и повышения энергетических показателей следует использовать парную коммутацию. При парной коммутации потоки одновременно работающих фаз в спинке статора суммируются рис. 1 и, как показывают многочисленные расчеты, поток в спинке статора в данной ситуации может достигать до 97% от потока в зубце.



Рис. 1. Зависимость потокоцеплений отдельных фаз вентиального индукторно-реактивного двигателя, а также сумма потокоцеплений прямопропорциональная магнитному потоку в спинке статора

Кроме того, длина магнитной силовой линии в спинке статора значительно больше длины магнитной силовой линии в зубце, поэтому рекомендуется принимать коэффициент  $k_2$

$$k_2 = \frac{h_{a1p}}{0.5 \cdot b_{z1p}}$$

где  $h_{a1p}$  и  $b_{z1p}$  высота спинки статора и ширина зубца статора соответственно, порядка  $1,7 \div 2,2$ . На двигателе на 350 кВт для электровоза  $k_2 = 1.72$ .

Увеличение высоты спинки статора также необходимо для снижения потерь в стали спинки. Частота изменения магнитного потока в спинке в  $0,5N_c$  раз ( $N_c$  — число зубцов статора) больше частоты изменения магнитного потока в зубцах, что обуславливает соответствующее увеличение удельных потерь. Также следует учитывать, что масса спинки статора существенно больше массы зубцов и для компенсации увеличения потерь за счет большей массы также желательно снижать магнитную индукцию в спинке, увеличивая высоту спинки статора. Что касается спинки ротора, то она за счет вала, как правило, существенно больше спинки статора и, специально, изменять её размеры в большую или меньшую сторону нет необходимости. При принятом значении коэффициента  $k_2$  представляется возможным выразить аналитически все геометрические размеры листов статора и ротора (рис. 2).

Ширина зубца статора с

$$b_{z1p} = d_i \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{N_c \cdot 2} \right). \quad (1)$$

Высота зубца статора

$$h_{z1} = \left[ \frac{d_n - k_2 \cdot d_i \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{N_c \cdot 2} \right)}{2} \right] - \frac{d_i}{2}. \quad (2)$$

Высота спинки статора

$$h_{a1p} = \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot b_{z1p}. \quad (3)$$

Ширина зубца ротора

$$b_{z2} = (d_i - 2 \cdot \delta) \cdot \sin \left( \frac{\gamma_r}{2} \right), \quad (4)$$

где  $\gamma_r$  — величина дуги зубца ротора в радианах. Вели-

чины дуг зубцов статора и ротора, обеспечивающие максимальную величину среднего момента при принятых числах зубцов принимаются по рекомендациям [4].  $\delta$  - величина воздушного зазора.

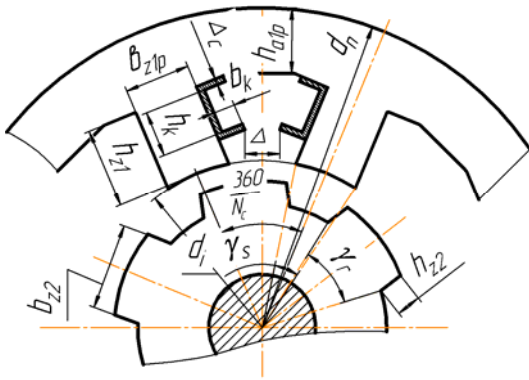


Рис. 2. Раскрой листов магнитопровода статора и ротора вентиляционного индукторно-реактивного двигателя

Высота зубца ротора

$$h_{z2} = \frac{1}{2} \cdot b_{z2} + 2. \quad (5)$$

Выбор высоты зубца ротора обусловлен:

- 1) необходимостью получения минимального магнитного напряжения приходящегося на зубец;
- 2) обеспечением минимального значения минимальной проводимости воздушного зазора в рассогласованном положении;
- 3) обеспечением максимальной величины спинки ротора для снижения индукции в ней и соответственного снижения потерь в стали ротора.

В рассогласованном положении велики воздушные зазоры между зубцами статора и ротора, поэтому при ограниченных токах магнитная цепь машины ненасыщена, что экспериментально подтверждено [2]. При ненасыщенной магнитной цепи, с достаточной для практики точностью, можно принять, что магнитные силовые линии выходящие из сердечника в зазоре прямолинейны, а в пазах представляют собою дуги окружностей с центром на вершинах углов зубцов [3], рис. 3.

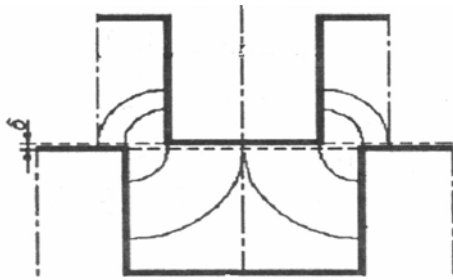


Рис. 3. Распределение магнитных силовых линий в межжелезном пространстве в рассогласованном положении

На основании этого можно заключить, что высота паза ротора должна составлять половину ширины паза статора с добавлением рекомендуемого запаса равного 2 мм (5).

Ширина сечения обмоточной зоны каркаса выбирается максимально возможной из условия обеспечения зазора между краями каркасов соседних катушек  $\Delta$  (рис. 2).

$$b_k = \frac{d_i \cdot \left( \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{N_c} \right) - \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2 \cdot N_c} \right) \right)}{2} - \Delta_c - \frac{\Delta}{2}, \quad (6)$$

где  $\Delta_c$  - толщина стенок каркаса катушки (рис. 2).

Высота сечения обмоточной зоны каркаса

$$h_k = \left\{ \left( d_n - k_2 \cdot d_i \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2 \cdot N_c} \right) \right)^2 / 4 - \left( d_i \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{N_c} \right) \right)^2 / 4 \right\}^{0.5} - \left( \frac{d_i}{2} \right) - 2 \cdot \Delta_c \quad (7)$$

Зная ширину и высоту сечения обмоточной зоны, представляется возможным при заданной плотности тока  $j$  и заданном значении коэффициента заполнения  $f_z$  определить намагничивающую силу  $F$

$$F = b_k \cdot h_k \cdot j \cdot f_z. \quad (8)$$

При каждом значении диаметра расточки  $d_i$  и остальных соответствующих ему геометрических размерах (1 – 7) может быть определен массив значений намагничивающей силы соответствующий принятому масшу магнитной индукции в воздушном зазоре. Намагничивающая сила, приходящаяся на сердечник

$$F_{Fe} = \left[ 2 \cdot h_{z1} \cdot H(B_\delta \cdot K_{z1}) + 2 \cdot H(B_\delta \cdot K_{z2}) + \frac{1}{2} \pi \cdot (d_i - 2 \cdot h_{z2}) \times \right. \\ \left. \times H \left( \frac{B_\delta \cdot b_{z2} \cdot K_{z2} \cdot K_\Phi}{d_i - 2 \cdot h_{z2}} \right) + d_n \cdot \frac{1}{2} \pi \cdot H \left( \frac{B_\delta \cdot K_{z1} \cdot K_\Phi}{k_2} \right) \right], \quad (9)$$

где  $H(B)$  – зависимость напряженности магнитного поля от индукции в сердечнике, (кривая намагничивания стали);  $K_\Phi$  – коэффициент, учитывающий сложение магнитных потоков двух фаз в спинке статора при парной коммутации,  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре

$$K_{z1} = \frac{\gamma_r}{\gamma_s} \text{ если } \gamma_s \geq \gamma_r, \quad K_{z1} = 1 \text{ если } \gamma_s \leq \gamma_r,$$

$$K_{z2} = \frac{\gamma_s}{\gamma_r} \text{ если } \gamma_s \leq \gamma_r, \quad K_{z2} = 1 \text{ если } \gamma_s \geq \gamma_r,$$

где  $\gamma_s$  - величина дуги зубца статора.

Намагничивающая сила, приходящаяся на воздушный зазор

$$F_\delta = \frac{B_\delta \cdot 2 \cdot \delta}{\mu_0}, \quad (10)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная проницаемость воздуха.

Суммарная намагничивающая сила должна быть равна намагничивающей силе (8)

$$b_k \cdot h_k \cdot j \cdot f_z = F_{Fe} + F_\delta. \quad (11)$$

Уравнение (11) при принятом значении диаметра расточки и всех остальных размеров, связанных с ним приведенными соотношениями, соблюдается только при одном значении магнитной индукции в воздушном зазоре, являющимся корнем уравнения (11). Найдя это значение магнитной индукции, можно вычислить энергию магнитного поля сосредоточенную в воздушном зазоре в машине единичной длины

$$W_\delta = \frac{1}{2} \cdot F_\delta \cdot B_\delta \cdot b_{z1p}. \quad (12)$$

Задавшись рядом значений диаметров расточки статора  $d_i$  с шагом 1 мм, при каждом значении  $B_\delta$  определим энергию магнитного поля сосредоточенную в воздушном зазоре в машине единичной длины. По расчетным данным может быть построена зависимость



Рис. 4. Зависимость энергии магнитного поля сосредоточенной в воздушном зазоре от диаметра расточки статора

Из полученной зависимости (рис. 4) видно, что для двигателя взятого в качестве примера энергия магнитного поля в воздушном зазоре максимальна при диаметре расточки 65 мм.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольший момент вентильного индукторно-реактивного двигателя при заданной величине наружного диаметра магнитопровода имеет место при таком раскрое, при котором энергия, сосредоточенная в воздушном зазоре будет максимальна. Предложенная методика позволяет определить геометрические размеры листов статора и ротора, обеспечивающие выполнение указанного условия.

Расчет диаметра расточки и раскрой магнитопровода, при котором максимальна энергия магнитного поля, сосредоточенная в воздушном зазоре может быть произведен с помощью прилагаемых методики и программы.

### ПРИЛОЖЕНИЕ

#### Программа, методика и пример расчета диаметра расточки и геометрических размеров листов статора и ротора вентильных индукторно-реактивных двигателей, обеспечивающих максимальную энергию магнитного поля, сосредоточенную в воздушном зазоре

##### Исходные данные

$d_n := 131$  - наружный диаметр магнитопровода статора, мм;  $N_c := 8$  - число пазов статора;  $\gamma_s := 22.5$  - величина дуги зубца статора в град;  $\gamma_r := 30$  - величина дуги зубца ротора в град;  $\delta := 0.2$  - величина воздушного зазора, мм;  $k_2 := 2$  - величина отношения высоты спинки статора к половине ширины зубца ротора;  $N_{CT} := 2$  - номер стали в массиве кривых намагничивания (определяется маркой стали);  $j := 10$  - величина допустимой плотности тока, А/кв. мм;  $f_z := 1$  - коэффициент заполнения обмоточной зоны;  $K_\Phi := 1.634$  - коэффициент, учитывающий сложение магнитных потоков разных фаз двигателя в спинке статора при парной коммутации;  $\Delta_c := 1$  - толщина стенок каркаса, мм;  $\Delta := 1$  - величина зазора между краями каркасов соседних катушек, мм.

Массив точек кривых намагничивания

$$M_{BH} := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4000 & 1 & 2.5 & 1.0 & 2.2 & 5 \\ 12000 & 1.2 & 11.7 & 1.2 & 4.5 & 6.8 \\ 13000 & 1.3 & 15.2 & 1.3 & 7.2 & 9.4 \\ 14000 & 1.38 & 21.8 & 1.38 & 14.1 & 11.8 \\ 14500 & 1.45 & 25.8 & 1.45 & 23 & 15 \\ 15000 & 1.52 & 32.5 & 1.6 & 31.4 & 18.5 \\ 15500 & 1.6 & 43.4 & 1.8 & 45.6 & 23 \\ 16000 & 1.8 & 59.8 & 2.0 & 59.8 & 28.5 \\ 17100 & 3.5 & 96.1 & 1.0 & 2.5 & 104 & 35 \\ 18700 & 12 & 180 & 1.0 & 3.9 & 220 & 43 \\ 18900 & 15.2 & 192 & 1.0 & 4.0 & 241 & 52 \\ 20200 & 55 & 256 & 1.0 & 7.0 & 335 & 63 \\ 21000 & 90.0 & 318 & 1.0 & 10 & 537 & 74 \\ 22000 & 200 & 393 & 1.0 & 16 & 883 & 91 \\ 23000 & 311 & 1252 & 1.0 & 30 & 1400 & 110 \end{pmatrix}$$

1. Представление кривой намагничивания с помощью функций сплайн-интерполяции и сплайн-аппроксимации системы MathCAD :

$$b := (M_{BH}^{(0)}) \cdot 10^{-4} \quad h := (M_{BH}^{(N_{CT})}) \cdot 0.15$$

$$S1 := \text{lspline}(b, h) \quad H(B) := \text{interp}(S1, b, h, B)$$

$$H(B) := \text{if}(H(B) \geq 0, H(B), 0) \quad b_{in} := \text{if}(N_{CT} = 1, 0.024, 0.02)$$

$$N := 0..120 \quad B_{k_N} := b_{in} \cdot N \quad H_{k_N} := H(B_{k_N})$$

$$H_k := \text{supsmooth}(B_k, H_k) \quad H_{ck} := \text{sort}(H_k)$$

$$S1 := \text{lspline}(B_k, H_{ck}) \quad H2(B) := \text{interp}(S1, B_k, H_{ck}, B)$$

2. Диапазон изменения диаметра расточки, мм

$$m := 21..90 \quad d_{i_m} := m$$

3. Текущее значение ширины обмоточной зоны каркаса, мм

$$b_{k_m} := \frac{d_{i_m} \cdot \left( \tan\left(\frac{\pi}{N_c}\right) - \tan\left(\frac{\pi}{N_c \cdot 2}\right) \right)}{2} - \Delta_c - \frac{\Delta}{2}$$

4. Текущее значение ширины зубца статора, мм

$$b_{z_m} := d_{i_m} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_c \cdot 2}\right)$$

5. Текущее значение высоты зубца статора, мм

$$h_{z1_m} := \left( \frac{d_n - k_2 \cdot d_{i_m} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_c \cdot 2}\right)}{2} \right) - \frac{d_{i_m}}{2}$$

6. Текущее значение высоты обмоточной зоны каркаса, мм

$$h_{k_m} := \sqrt{\left( \frac{d_n - k_2 \cdot d_{i_m} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_c \cdot 2}\right)}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{i_m} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_c}\right)}{2} \right)^2} - \left( \frac{d_{i_m}}{2} \right) - 2 \cdot \Delta_c$$

7. Текущее значение площади обмоточной зоны каркаса, кв. мм

$$s_m := b_{k_m} \cdot h_{k_m}$$

8. Текущее значение ширины зубца ротора, мм

$$b_{z2m} := (d_{im} - 2\delta) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \gamma_r}{360}\right)$$

9. Текущее значение высоты зубца ротора, мм

$$h_{z2p_m} := \left(\frac{b_{z2m}}{2}\right) + 2$$

10. Текущее значение высоты спинки ротора, мм

$$h_{a2p_m} := \frac{(d_{im} - 2 \cdot h_{z2p})}{2}$$

11. Коэффициенты

$$K_{z1} := \text{if} \left( \gamma_s > \gamma_r, \frac{\gamma_r}{\gamma_s}, 1 \right)$$

$$K_{z2} := \text{if} \left( \gamma_s > \gamma_r, 1, \frac{\gamma_s}{\gamma_r} \right)$$

12. Число вариаций по магнитной индукции

$$c := 450$$

13. Величина вариационного шага по магнитной индукции

$$k_\delta := \text{if}(N_{CT} = 1, 0.006, 0.005)$$

14. Номер вариации по магнитной индукции

$$i := 0..c$$

15. Текущее значение магнитной индукции в зазоре, Тл

$$B_{\delta n_i} := k_\delta \cdot i$$

16. Текущее значение магнитного напряжения приходящегося на спинки, А

$$AW_{a_i, m} := \left[ \frac{(d_{im} - 2 \cdot h_{z2p_m})}{20} \cdot H2(B_{a2_i, m}) + \frac{d_n}{20} \cdot H2(B_{a1_i, m}) \right] \cdot \pi$$

17. Текущее значение магнитного напряжения приходящегося на зубцы, А

$$AW_{z_i, m} := \frac{h_{z1m}}{5} \cdot H2(B_{\delta n_i} \cdot K_{z1}) + \frac{h_{z2p_m}}{5} \cdot H2(B_{\delta n_i} \cdot K_{z2})$$

18. Текущее значение магнитного напряжения приходящегося на сердечник, А

$$AWW_{Fe_i, m} := AW_{a_i, m} + AW_{z_i, m}$$

19. Текущее значение магнитного напряжения приходящегося на воздушный зазор, А

$$F_{\delta_i} := \frac{B_{\delta n_i} \cdot \delta \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}$$

20. Текущее значение намагничивающей силы, А

$$F_{\Sigma_i, m} := AWW_{Fe_i, m} + F_{\delta_i}$$

21. Текущее значение коэффициента насыщения, А

$$K_{\mu_i, m} := \text{if} \left( i = 0, 1, \frac{F_{\Sigma_i, m}}{F_{\delta_i}} \right)$$

22. Текущее значение разности намагничивающей силы, определенной по магнитным индукциям в магнитопроводе и по полному току обмотки, А

$$FF_{i, m} := \left| F_{\Sigma_i, m} - s_m \cdot j \cdot f_z \cdot 2 \cdot 0.785 \right|$$

23. Расчет массива минимальных разностей между намагничивающих сил, определенных по магнитным индукциям в магнитопроводе и по полному току обмотки при текущих значениях диаметра расточки при вариации величиной индукции в воздушном зазоре

$$BB_m := \min(FF^{(m)})$$

$$a(n, k) := \begin{cases} n & \text{if } FF_{n, k} - BB_k = 0 \\ (-10) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$c_{i, m} := a(i, m)$$

24. Определение номера вариации по индукции, при которой обеспечивается минимум разности намагничивающей силы, определенной по магнитным индукциям в магнитопроводе и по полному току обмотки при текущем диаметре расточки

$$z_m := \max(c^{(m)})$$

25. Величина энергии магнитного поля сосредоточенная в воздушном зазоре при текущей величине диаметра расточки

$$s1_m := b_{k_m} \cdot h_{k_m} \cdot \frac{B_{\delta n(z_m)} \cdot j \cdot f_z \cdot 2 \cdot b_{z_m} \cdot 10^{-3} \cdot 0.785}{K_{\mu_{z_m, m}}}$$

### Результаты расчета

26. Определение диаметра расточки при котором максимальна энергия магнитного поля сосредоточенная в воздушном зазоре, мм

$$o_m := \begin{cases} m & \text{if } s1_m = \max(s1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$e := \max(o) \quad e = 68 \quad D_i = e = 68$$

27. Высота зубца ротора

$$h_{z2p} := h_{z2p_e}$$

28. Высота спинки статора, мм

$$h_{a1} := 0.5 \cdot k_2 \cdot d_i \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_c \cdot 2}\right) \quad h_{a1} = 13.526$$

29. Внутренний диаметр спинки статора, мм

$$D_{bn} := d_n - 2 \cdot h_{a1} \quad D_{bn} = 103.948$$

30. Ширина зубца статора, мм

$$b_{z_e} = 13.526$$

31. Высота зубца статора, мм

$$h_{z1_e} = 17.974$$

32. Ширина зубца ротора, мм

$$b_{z2_e} = 17.496$$

33. Высота зубца ротора, мм

$$h_{z2p} = 8.763$$

34. Ширина обмоточной зоны каркаса, мм

$$b_{k_e} = 5.82$$

35. Высота обмоточной зоны каркаса, мм

$$h_{k_e} = 14.03$$

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузнецов В.А., Садовский Л.А., Виноградов В.Л., Лопатин В.В. Особенности расчета индукторных двигателей для вентиляльного электропривода // Электротехника, 1998. - №6. - С. 35-43.
- [2] Ferrero A. An Indirect Test Method for the Characterization of Variable Reluctance Motors // IEEE, Transactions on Instrumentation and Measurement. 1993. Vol. 42, № 6. P. 1020-1025.
- [3] Pohl R. Theory of pulsating field machines // ЛЕЕ, 1946. Vol. 93, № 3.
- [4] Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. Санкт-Петербург : 2003. - 149 с.

Поступила 30.01.2008