

## СИЛЫ ОДНОСТОРОННЕГО МАГНИТНОГО ТЯЖЕНИЯ В АКСИАЛЬНЫХ ИНДУКТОРНЫХ МАШИНАХ

Н.Н. ЛЕВИН, А.Д. СЕРЕБРЯКОВ

*Институт транспорта и связи,  
Ломоносова 1, LV – 1019, Рига, Латвия*

Предложена методика расчета силы одностороннего магнитного тяжения в аксиальных индукторных электрических машинах, иллюстрируемая примером.

**Ключевые слова:** силы одностороннего магнитного тяжения, аксиальные индукторные электрические машины  
 The method of calculation of one-side magnetic traction force in axial inductor machines proposed. The method illustrated by the example of calculation.

**Keywords:** one-side magnetic traction force, axial inductor machines

Возникающие в электрических машинах электромагнитные силы тяжения обусловлены изменением запасенной в воздушном зазоре магнитной энергии по координате перемещения подвижной части [1]. Во вращательной машине тангенциальные составляющие этих сил обуславливают электромагнитный момент, а радиальные – силы, действующие перпендикулярно оси ротора. Последние могут быть определены как

$$T = -\partial W_M / \partial \delta, \quad (1)$$

где  $W_M$  - магнитная энергия, запасенная в воздушном зазоре  $\delta$ .

У машины с симметричной магнитной системой (воздушный зазор равномерный, магнитная проводимость активных материалов в направлении потока одинаковая, число выступов в зубцовой зоне четное и т.п.) радиальные силы магнитного тяжения взаимно уравновешены и не оказывают негативного влияния на ее работу. При нарушении поперечной магнитной симметрии машины возникают неуравновешенные односторонние силы магнитного тяжения, которые обуславливают увеличение прогиба вала, способствуют возникновению и росту знакопеременных радиальных нагрузок на него, увеличению давления на подшипники и должны учитываться при расчете машины. В машинах с линейным перемещением подвижной части силы одностороннего магнитного тяжения увеличивают прогиб бегуна и давление на опоры, ускоряют их износ и требуют увеличения механической прочности бегуна.

В итоге, действие сил одностороннего магнитного тяжения обуславливает уменьшение удельных мощности и момента электрической машины.

Главной причиной возникновения сил одностороннего магнитного тяжения во вращательных машинах следует считать неравномерность воздушного зазора, обусловленную, в основном, несимметричным (эксцентричным) расположением ротора относительно расточки статора и оцениваемым его эксцентриситетом, а в линейных машинах – несимметричным расположением бегуна относительно пакетов статора, оцениваемым его поперечным смещением.

Неоднородность структуры активных магнитных материалов пакетов статора и ротора машины может вызвать появлением сил одностороннего магнитного тяжения даже при отсутствии радиального эксцентриситета ротора, поскольку запасенная в воздушном зазоре энергия магнитного поля может быть представлена как [1]:

$$W_M = \frac{1}{2} F^2 \Lambda, \quad (2)$$

а сила одностороннего магнитного тяжения соответственно равной

$$T = -\frac{1}{2} F^2 \frac{\partial \Lambda}{\partial \delta}. \quad (3)$$

Здесь  $F$ ,  $\Lambda$  - суммарные МДС и проводимость машины соответственно. Однако изменение магнитной проводимости  $\Lambda$  за счет неоднородности структуры сталей и возникающая за счет этого сила одностороннего тяжения по сравнению с силой, обусловленной эксцентриситетом ротора и изменением за счет этого той же  $\Lambda$ , незначительны и в рассматриваемом случае не учитываются. Влияние несимметричности структуры зубцовой зоны машины на возникновение радиальных электромагнитных сил тяжения может быть оценено только при наличии конкретной структуры и в данном случае не рассматривается.

Эксцентриситет ротора может быть вызван технологическими и эксплуатационными причинами. Технологические причины – неточность обработки и сборки сопрягаемых деталей, наличие радиального люфта ротора за счет начального люфта подшипников, а также прогиб вала под действием силы тяжести ротора. Технологический эксцентриситет ротора  $\varepsilon_r$  можно считать постоянным, а его величиной можно задаваться, исходя из конструктивных и технологических соображений. Обычно технологический эксцентриситет составляет (5...15)% от величины рабочего воздушного зазора  $\delta$ , т.е.  $\varepsilon_r = (0,05...0,15)\delta$ . При повышении технологического уровня производства  $\varepsilon_r$  уменьшается.

Эксплуатационный эксцентриситет  $\varepsilon_s$ , возникает при работе машины, в основном, за счет радиальной выработки подшипников. Его величина определяется качеством изготовления, условиями эксплуатации, назначением и ресурсом машины; ориентировочно  $\varepsilon_s = (0,1..0,2)\delta$ . Появление эксплуатационного эксцентриситета вызывает увеличение магнитной асимметрии машины и соответствующее этому увеличение силы одностороннего магнитного тяжения.

Общий эксцентриситет машины  $\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_s$ . С учетом этого при переходе от частной производной к отношению приращений выражение (1), опуская знак минус, может быть представлено как

$$T = \frac{W_{M(\delta \pm \varepsilon)} - W_{M(\delta)}}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где  $W_{M(\delta)}$  - магнитная энергия, запасенная в воздушном зазоре  $\delta$  при отсутствии радиального смещения ротора в расточке статора (т.е. эксцентриситета  $\varepsilon$ );  $W_{M(\delta \pm \varepsilon)}$  - магнитная энергия, запасенная в воздушном зазоре при наличии эксцентриситета  $\varepsilon$ .

Для индукторной машины, имеющей  $p$  полюсных выступов на статоре и  $n_R$  пакетов ротора (например, для аксиальной индукторной машины [2]), энергия магнитного поля в воздушном зазоре может быть определена с учетом (2) следующим образом:

$$W_M = n_R \frac{\sum_1^p F_i^2 \Lambda_i}{2} = n_R \frac{(F_\delta K_E)^2 \sum_1^p \Lambda_i}{2}, \quad (5)$$

где  $F_i = F_\delta K_E$  - МДС полюсного выступа, причем в индексе  $i$ -номер полюсного выступа ( $i=1,2,...,p$ );  $F_\delta$  - МДС воздушного промежутка под полюсным выступом;  $K_E$  - коэффициент увеличения МДС возбуждения и ЭДС, учитывающий снижение напряжения за счет действия реакции якоря. С учетом (5) выражение (4) примет вид:

$$T = n_R (F_\delta K_E)^2 \frac{(\sum_1^p \Lambda_{i\varepsilon} - \sum_1^p \Lambda_{i\delta})}{2\varepsilon}, \quad (6)$$

где  $\sum_1^p \Lambda_{i\delta}$  - сумма магнитных проводимостей всех полюсных выступов одного пакета статора

при отсутствии смещения ротора ( $\varepsilon = 0$ );  $\sum_1^p \Lambda_{i\varepsilon}$  - сумма магнитных проводимостей всех полюсных

выступов одного пакета статора при наличии смещения ротора ( $\varepsilon \neq 0$ ). Поскольку

$\sum_1^p \Lambda_{i\varepsilon} = \Lambda_{1\varepsilon} + \Lambda_{2\varepsilon} + \dots + \Lambda_{p\varepsilon}$ , а  $\sum_1^p \Lambda_{i\delta} = \Lambda_{1\delta} + \Lambda_{2\delta} + \dots + \Lambda_{p\delta}$ , то разность этих сумм могут быть

представлена как:

$$\sum_1^p \Lambda_{i\varepsilon} - \sum_1^p \Lambda_{i\delta} = \sum_1^p (\Lambda_{i\varepsilon} - \Lambda_{i\delta}) = \sum_1^p \Delta \Lambda_i, \quad (7)$$

где  $\Delta\lambda_i = (\lambda_{i\varepsilon} - \lambda_{i\delta})$  - разность магнитных проводимостей  $i$ -го полюсного выступа ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) при наличии эксцентриситета ротора ( $\lambda_{i\varepsilon}$ ) и без него ( $\lambda_{i\delta}$ ).

На основании (7) сила одностороннего магнитного тяжения может быть определена как

$$T = n_R (F_\delta K_E)^2 \frac{\sum_{i=1}^p \Delta\lambda_i}{2\varepsilon}. \quad (8)$$

Для расчета указанных сумм магнитных проводимостей в (6) или суммы разностей проводимостей в (8) вначале необходимо определить величину воздушного зазора  $\delta_i$  под каждым из  $p$  полюсных выступов статора в соответствии с выражением

$$\delta_i = \delta + \Delta_i, \quad (9)$$

где изменение величины воздушного зазора  $\Delta_i$  под каждым полюсным выступом при эксцентриситете  $\varepsilon$  определяется как

$$\Delta_i = \varepsilon \cos \gamma_i, \quad (10)$$

$\delta$  - равномерный воздушный зазор при  $\varepsilon = 0$ .

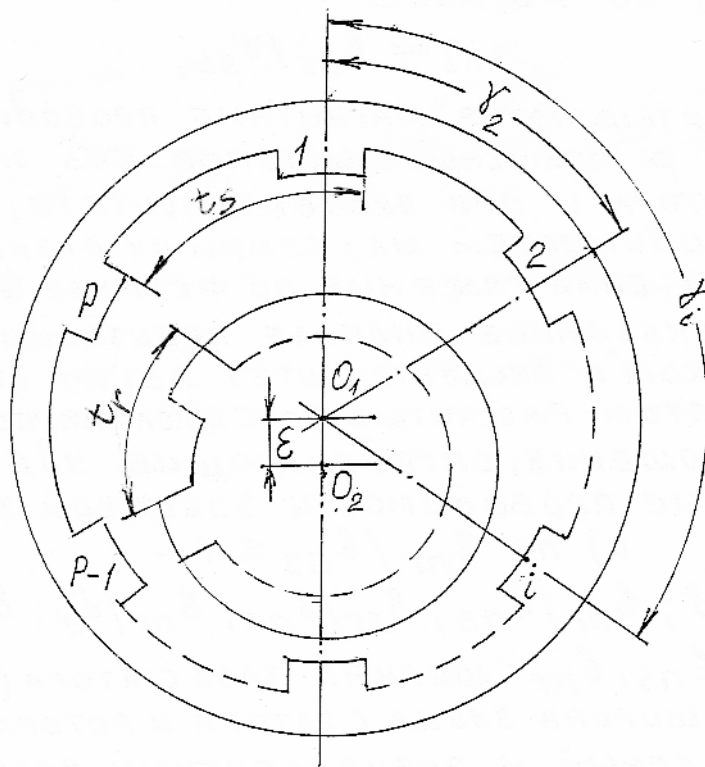


Рисунок 1.

Угол  $\gamma_i$  определяет положение полюсного выступа и при равномерном размещении полюсных выступов по расточке статора равен

$$\gamma_i = 360^\circ (i - 1) / p, \quad (11)$$

а отсчет этого угла производится от вертикальной оси симметрии первого полюсного выступа (рис.1) по часовой стрелке (для более точного расчета необходимо учитывать углы сдвига полюсных выступов в соответствии со структурой зубцовой зоны проектируемой машины).

Далее, используя параметры зубцовой зоны и таблицы удельных магнитных проводимостей отдельных участков этой зоны [3] ( $\lambda_{n1}$  - удельной проводимости паза статора, расположенного против паза ротора;  $\lambda_{n2}$  - удельной проводимости зубца статора, находящегося против паза ротора;  $\lambda_{r1}$  - удельной проводимости зубца ротора, находящегося против паза статора), а также определив удельную проводимость зубца статора, расположенного против зубца ротора, по формуле:

$$\lambda_{\delta i} = b_{zs} / \delta_{\delta i}, \quad (12)$$

рассчитываются магнитные проводимости каждого из  $p$  полюсных выступов без эксцентриситета ротора и при эксцентриситете, суммы этих проводимостей или суммы их разностей и, наконец, сила тяжения по формуле (6) или (8).

Указанное вначале производится для случая, когда эксцентриситет ротора отсутствует ( $\varepsilon = 0$ ). При этом рассчитываются (полагая, что  $p = zr$ , т.е.  $ts = tr$ ):

- 1) отношения, определяющие удельные магнитные проводимости зубцовой зоны:
  - а) при  $b_{nr} / b_{ns} \leq 1$ ;  $b_{ns} / \delta$ ;  $b_{nr} / b_{ns}$ ;  $b_{zr} / b_{ns}$ ;  $b_{nr} / \delta_3$ ;  $b_{zs} / b_{nr}$ ; где  $b_{ns}$ ,  $b_{nr}$  – ширина паза статора (ротора);  $b_{zs}$ ,  $b_{zr}$  – ширина зубца статора и ротора;  $\delta$  и  $\delta_3$  – равномерный и эквивалентный воздушные зазоры, причем  $\delta_3 = \delta K_{\delta}$ , а  $K_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора;
  - б) при  $b_{nr} / b_{ns} > 1$  (в этом случае статор и ротор как бы меняются местами) –  $b_{ns} / b_{nr}$ ;  $b_{nr} / \delta_3$ ;  $b_{zs} / b_{nr}$ ;  $b_{nr} / \delta$ ;  $b_{zr} / b_{ns}$ ;  $b_{ns} / \delta$ ;
- 2) удельные магнитные проводимости зубцовой зоны по табл.1 и табл.2 /3/:

а) при  $b_{nr} / b_{ns} \leq 1$

$$\lambda_{\Pi\Pi} = f_{\Pi} \left( \frac{b_{\Pi r}}{b_{\Pi s}}; \frac{b_{\Pi s}}{\delta} \right); \quad \lambda_{\Pi I} = f_1 \left( \frac{b_{zr}}{b_{\Pi s}}; \frac{b_{\Pi s}}{\delta} \right); \quad \lambda_{\Pi 2} = f_2 \left( \frac{b_{zs}}{b_{\Pi r}}; \frac{b_{\Pi r}}{\delta_3} \right);$$

б) при  $b_{nr} / b_{ns} > 1$

$$\lambda_{\Pi\Pi} = f_{\Pi} \left( \frac{b_{\Pi s}}{b_{\Pi r}}; \frac{b_{\Pi r}}{\delta_3} \right); \quad \lambda_{\Pi I} = f_1 \left( \frac{b_{zs}}{b_{\Pi r}}; \frac{b_{\Pi r}}{\delta} \right); \quad \lambda_{\Pi 2} = f_2 \left( \frac{b_{zr}}{b_{\Pi s}}; \frac{b_{\Pi s}}{\delta} \right);$$

- 3) удельная магнитная проводимость зубца статора: при  $b_{nr} / b_{ns} \leq 1$ ;  $\lambda_{\delta} = b_{zs} / \delta_3$ , а при  $b_{nr} / b_{ns} > 1$ ;  $\lambda_{\delta} = b_{zr} / \delta_3$ ;
- 4) максимальная и минимальная проводимости полюсного выступа:

$$\Lambda_{\max} = \left( \lambda_{\delta} + \lambda_{\Pi\Pi} \frac{1 + b_{zr}}{1} \right) a l \mu_0; \quad \Lambda_{\min} = (\lambda_{\Pi I} + \lambda_{\Pi 2}) a l \mu_0, \quad (13)$$

где  $l$  – осевая длина одного пакета статора;  $a$  – число зубцов на полюсном выступе;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

- 5) коэффициенты нулевой (постоянной) и первой гармонической составляющих разложения магнитной проводимости полюсных выступов в ряд Фурье (в предположении, что высшие гармонические этого ряда выбором соответствующих параметров зубцовой зоны значительно ослаблены):

$$a_0 = \frac{\Lambda_{\max} + \Lambda_{\min}}{2} \chi_{\text{экр}} + \Lambda_{\min}; \quad a_1 = \frac{\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}}{2}; \quad (14)$$

где  $\chi_{\text{экр}} = \chi + \Delta\chi$ , причем  $\chi = b_{zr} / 0,5t_z$ , а  $\Delta\chi$  – поправка [3];

- б) магнитная проводимость полюсного выступа:

$$\Lambda_{i\delta} = a_0 + a_1 \cos[\alpha - (i-1)z_r \gamma_i], \quad (15)$$

где  $\alpha$  – угол поворота ротора;  $z_r$  – число зубцов ротора;  $(i-1)z_r \gamma_i$  – угол запаздывания первой гармоники магнитной проводимости  $i$ -го полюсного выступа относительно первой гармоники проводимости первого полюсного выступа; при этом, поскольку в индукторной машине сумма магнитных проводимостей полюсных выступов постоянна (не зависит от угла поворота ротора), то  $\Lambda_{i\delta}$  можно рассчитывать при любом угле  $\alpha$ , удобнее, естественно, это выполнять при  $\alpha = 0$ , считая, что в этом случае зубцы ротора и зубцы первого полюсного выступа совпадают, обуславливая  $\Lambda_{i\delta} = \Lambda_{\max}$ ;

- 7) суммарная магнитная проводимость полюсных выступов

$$\sum_1^p \Lambda_{i\delta} = \Lambda_{1\delta} + \Lambda_{2\delta} + \dots + \Lambda_{p\delta}, \quad (16)$$

В аналогичном порядке осуществляется расчет при наличии эксцентриситета ротора  $\varepsilon$ , при этом определяются:

- 1) угол, характеризующий расположение полюсного выступа по расточке статора,

$$\gamma_i = 360^\circ (i-1) / p; \quad (17)$$

- 2) воздушный зазор под каждым  $i$ -м полюсным выступом

$$\delta_i = \delta + \varepsilon \cos \gamma_i; \quad (18)$$

- 3) отношения параметров зубцовой зоны, определяющие удельные магнитные проводимости:

$b_{ns}/\delta_i$ ;  $b_{nr}/\delta_{3i}$ , причем  $\delta_{3i} = \delta_i K_\delta$ , а отношения  $b_{nr}/b_{ns}$ ;  $b_{zr}/b_{ns}$ ;  $b_{zs}/b_{nr}$  и другие берутся из п.1, а и б соответственно из предыдущего расчета;

4) удельные магнитные проводимости зубцовой зоны по таблицам 1, 2 [3]:

$$\lambda_{\text{III}i} = f_{\text{III}} \left( \frac{b_{\text{Pr}}}{b_{\text{Пс}}}; \frac{b_{\text{Пс}}}{\delta_i} \right); \quad \lambda_{\text{III}i} = f_{\text{II}} \left( \frac{b_{zr}}{b_{\text{Пс}}}; \frac{b_{\text{Пс}}}{\delta_i} \right); \quad \lambda_{\text{II}2i} = f_{2i} \left( \frac{b_{zs}}{b_{\text{Pr}}}; \frac{b_{\text{Pr}}}{\delta_{3i}} \right)$$

или

$$\lambda_{\text{III}i} = f_{\text{III}} \left( \frac{b_{\text{Пс}}}{b_{\text{Pr}}}; \frac{b_{\text{Pr}}}{\delta_{3i}} \right); \quad \lambda_{\text{III}i} = f_{\text{II}} \left( \frac{b_{zs}}{b_{\text{Pr}}}; \frac{b_{\text{Pr}}}{\delta_i} \right); \quad \lambda_{\text{II}2i} = f_{2i} \left( \frac{b_{zr}}{b_{\text{Пс}}}; \frac{b_{\text{Пс}}}{\delta_i} \right)$$

в зависимости от величины отношения  $b_{nr}/b_{ns}$ ;

5) удельная магнитная проводимость зубца:

$$\lambda_{\delta i} = \frac{b_{zs}}{\delta_{3i}} \quad \text{при} \quad \frac{b_{\text{Pr}}}{b_{\text{Пс}}} \leq 1 \quad \text{или} \quad \lambda_{\delta i} = \frac{b_{zr}}{\delta_{3i}} \quad \text{при} \quad \frac{b_{\text{Pr}}}{b_{\text{Пс}}} > 1;$$

6) максимальные  $\Lambda_{i \max}$  и минимальные  $\Lambda_{i \min}$  проводимости полюсных выступов:

$$\Lambda_{i \max} = \left( \lambda_{\delta i} + \lambda_{\text{III}i} \frac{1 + b_{zr}}{1} \right) a \mu_0; \quad \Lambda_{i \min} = (\lambda_{\text{III}i} + \lambda_{\text{II}2i}) a \mu_0; \quad (19)$$

7) коэффициенты  $a_{oi}$  и  $a_{ii}$ :

$$a_{oi} = \frac{\Lambda_{i \max} - \Lambda_{i \min}}{2} \chi_{\text{экр}} + \Lambda_{i \min}; \quad a_{ii} = \frac{1}{2} (\Lambda_{i \max} - \Lambda_{i \min}); \quad (20)$$

8) магнитные проводимости полюсных выступов при выбранном в п.6 предыдущего расчета значении  $\alpha$ :

$$\Lambda_{ie} = a_{oi} + a_{ii} \cos[\alpha - (i-1)z_r \gamma_i]; \quad (21)$$

9) разность магнитных проводимостей полюсных выступов при эксцентриситете и без него

$$\Delta \Lambda_i = \Lambda_{ie} - \Lambda_{i\delta}; \quad (22)$$

10) сумма проводимостей полюсных выступов

$$\sum_1^p \Lambda_{ie} = \Lambda_{1e} + \Lambda_{2e} + \dots + \Lambda_{pe}; \quad (23)$$

11) сумма разностей проводимостей полюсных выступов

$$\sum_1^p \Delta \Lambda_i = \Delta \Lambda_1 + \Delta \Lambda_2 + \dots + \Delta \Lambda_p; \quad (24)$$

12) сила одностороннего тяжения в соответствии с (6) или (8).

Предложенная методика иллюстрируется примером расчета силы тяжения двухпакетного ( $n_R=2$ ) аксиального индукторного генератора, имеющего:  $S = 10$  кВ·А;  $G_R=90$  кг;  $D_s = 335$  мм;  $p = 12$ ;  $a = 1$ ;  $F_\delta = 1900$  А;  $K_E = 1,4$ ;  $\delta = 1,5$  мм;  $\delta_3 = 2$  мм;  $l = 75$  мм;  $Z_r = 8$ ;  $\chi_{\text{экр}} = 0,8$ ;  $\varepsilon = 0,3$  мм.

Поскольку  $p \neq Z_r$  и шаги по зубцам статора и ротора неодинаковы ( $t_s \neq t_r$ ), то необходимо параметры зубцовой зоны статора привести к ротору и уже эти приведенные параметры (их обозначения имеют штрих) используются затем для определения удельных проводимостей  $\lambda_{\text{III}}$ ,  $\lambda_{\text{II}1}$ ,  $\lambda_{\text{II}2}$  по таблицам /3/ и проводимости  $\lambda_\delta$ . Так, приведенные параметры зубцовой зоны статора, будут равны:

$$t'_s = \frac{\pi D_s}{Z_r} = \frac{3.14 \cdot 335}{8} = 131.5 \text{ мм}; \quad b'_{zs} = \frac{t'_s}{2} \chi = \frac{131.5}{2} \cdot 0.8 = 48 \text{ мм};$$

$$b'_{\text{Пс}} = t'_s - b'_{zs} = 131.5 - 48 = 83.5 \text{ мм}.$$

Параметры зубцовой зоны ротора определяются как:

$$t_r = \frac{\pi(D_s - 2\delta)}{Z_r} = \frac{3.14(335 - 2 \cdot 1.5)}{8} = 130.3 \text{ мм, принимаем } b_{zr} = 43 \text{ мм, тогда } b_{nr} = 130,3 - 43 = 87,3$$

мм, а отношение  $b_{nr}/b'_{ns} > 1$ . Результаты расчетов сведены в таблицу 1, используя которые

$$\text{определяем, что: } T = 2(1900 \cdot 1.4)^2 \frac{0.12 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3}} = 2800 \text{ Н}.$$

ТАБЛИЦА 1

1. Расчет при отсутствии эксцентриситета ( $\varepsilon=0$ )												
Отношения	$\frac{b'_{Пis}}{b_{Пr}} = \frac{83,5}{87,3} = 0,96$ $\frac{b_{Пr}}{\delta_3} = \frac{87,3}{2} \cong 44$			$\frac{b'_{zs}}{b_{Пr}} = \frac{48}{87,3} = 0,55$ $\frac{b_{Пr}}{\delta} = \frac{87,3}{1,5} = 58$			$\frac{b_{zr}}{b'_{Пis}} = \frac{43}{83,5} = 0,515$ $\frac{b_{Пis}}{\delta} = \frac{83,5}{1,5} = 56$					
Удельные проводимости	$\lambda_{ПП1} = 3,71$			$\lambda_{П1} = 2,21$			$\lambda_{П2} = 2,10$			$\lambda \frac{b_{zr}}{\delta_3} = \frac{43}{2}$		
$\Lambda_{max}, \text{ Гн}$	$\left( 21,5 + 3,71 \frac{75 + 43}{75} \right) \cdot 1 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} = 2,575 \cdot 10^{-6}$											
$\Lambda_{min}, \text{ Гн}$	$(2,21 + 2,10) \cdot 1 \cdot 75 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} = 0,406 \cdot 10^{-6}$											
$a_0, \text{ Гн}$	$\frac{(2,575 - 0,406)}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 - 0,406 \cdot 10^{-6} = 1,273 \cdot 10^{-6}$											
$a_I, \text{ Гн}$	$0,5 (2,575 - 0,406) \cdot 10^{-6} = 1,084 \cdot 10^{-6}$											
$n_p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\Lambda_{i\delta} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	2357	732	732	2357	732	732	2357	732	732	2357	732	732
$\Sigma \Lambda_{i\delta}, \text{ Гн}$	$(4 \cdot 2,357 + 8 \cdot 0,732) \cdot 10^{-6} = 15,284 \cdot 10^{-6}$											
2. Расчет при наличии эксцентриситета ( $\varepsilon=0,3\text{мм}$ )												
$p$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\gamma, \text{ град}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
$\cos \gamma$	1	0,866	0,5	0	-0,5	-0,866	-1	-0,866	-0,5	0	0,5	0,866
$\Delta i, \text{ мм}$	0,3	0,26	0,15	0	-0,15	-0,26	-0,3	-0,26	-0,15	0	0,15	0,26
$\delta$	1,8	1,76	1,65	1,5	1,35	1,24	1,2	1,24	1,35	1,5	1,65	1,76
$\delta_3$	2,3	2,26	2,15	2,0	1,85	1,74	1,7	1,74	1,85	2,0	2,15	2,26
$b_{zr}/\delta_{zi}$	38	39	41	44	47	51	52	51	47	44	41	39
$\lambda_{\pi\pi i}$	3,57	3,58	3,63	3,72	3,78	3,87	3,89	3,87	3,78	3,72	3,63	3,58
$b_{zr}/\delta_i$	49	50	53	58	65	71	73	71	65	58	53	50
$\lambda_{\pi\pi i}$	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21	2,21
$b'_{zr}/\delta_i$	47	48	51	56	62	68	70	68	62	56	51	48
$\lambda_{\pi\pi i}$	2,09	2,09	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,09
$\lambda_{\pi\pi i}$	18,7	19,03	20,00	21,5	23,243	24,713	25,294	24,713	23,343	21,5	20,00	19,03
$\Lambda_{i\max} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	2292	2323	2422	2576	2750	2902	2959	2902	2750	2576	2422	2323
$\Lambda_{i\min} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	405	405	406	406	406	406	406	406	406	406	406	405
$a_{Ii} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	944	959	1008	1085	1172	1248	1277	1248	1172	1085	1008	959
$a_{0i} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	1160	1173	1212	1274	1344	1404	1428	1404	1344	1274	1212	1173
$\Lambda_{i\delta} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	2104	693	708	2359	758	780	2705	780	758	2359	708	693
$\Sigma \Lambda_{i\delta}, \text{ Гн}$	$15,404 \cdot 10^9 \text{ Гн}$											
$\Delta \Lambda_{i\delta} \cdot 10^9, \text{ Гн}$	-253	-39	-24	2	26	48	348	48	26	2	-24	-39
$\Sigma \Delta \Lambda_{i\delta} - \Sigma \Lambda_{i\delta}$	$(15,404 - 15,284) \cdot 10^6 = 0,120 \cdot 10^6 \text{ Гн}$											
$\Sigma \Delta \Lambda_i, \text{ Гн}$	$0,121 \cdot 10^6 \text{ Гн}$											

Таким образом, при эксцентриситете ротора порядка 20% от  $\delta$  сила одностороннего тяжения составляет более 30% веса ротора, что нельзя не учитывать.

Литература

- [1] Копылов И.П. (1973) *Электромеханические преобразователи энергии*. Энергия, Москва. 400 с.
- [2] Домбур Л.Э.(1984) *Аксиальные индукторные машины*. Зинатне, Рига. 246 с.
- [3] Левин Н.Н., Серебряков А.Д. (1976) *Электропривод на базе двигателей со взаимно неподвижными обмотками. Электрические машины и приводы. Труды РВВККУ*, вып.3. Рига. 190 с.

Received on the 15<sup>th</sup> of May 2002