

В этой работе рассматриваются различные модели асинхронного двигателя: конечно-элементные модели полного поперечного сечения машины с подробным воспроизведением зубцовых зон сердечников, идеализированные модели с равномерным воздушным зазором, в которых сердечники воспроизводятся частично (только цилиндрические ярма) или не воспроизводятся вовсе. Точность конечно-элементных моделей с равномерным зазором оценивается по известным аналитическим решениям полевых задач, полученным методом разделения переменных и по аналитическим формулам общей (классической) теории электрических машин.

Определение токов статора и ротора из расчета схемы замещения при заданных значениях параметров асинхронного двигателя

В качестве исходных данных при выполнении этой работы берутся характерные размеры, значения параметров, обмоточные и другие данные, приведенные в справочнике по серии 4А.

В тексте пояснений к выполнению работы результаты моделирования и сопутствующих им вычислений сравниваются с результатами электромагнитного расчета 4-полюсного асинхронного двигателя мощностью 15 кВт из примера расчета, приведенного в учебнике по проектированию электрических машин под ред. И.П. Копылова (М., Высшая школа, 2005). Далее, если не делается специальных оговорок, имеется в виду именно этот двигатель.

При оценке точности результатов моделирования следует учитывать уровень соответствия модели реальным условиям работы машины. Например, если в модели никак не учтены механические потери (на вентиляцию и

трение в подшипниках), КПД, рассчитанный по результатам моделирования, должен быть больше значения, указанного в справочнике.

Для того чтобы смоделировать магнитное поле в поперечном сечении асинхронного двигателя (в этой работе предполагается, что это поле является двухмерным, т.е. скос пазов не учитывается) необходимо сформировать конечно-элементную модель, построив на рабочем поле программы *FEMM* изображение поперечного сечения, задав граничные условия и плотности тока на участках, соответствующих пазам статора и ротора. Токи в пазах ротора задаются в том случае, если моделируется магнитостатическое поле, т.е. поле, созданное в некоторый (определенный) момент времени мгновенными значениями токов статора и ротора, соответствующими этому моменту. Допустив, что токи статора синусоидально изменяются во времени и образуют симметричную трехфазную систему, вычислить их мгновенные значения для заданного момента времени просто. Вычислить мгновенные значения токов ротора значительно сложнее.

Наметим следующий план вычисления токов ротора. Будем исходить из того, что нам известны параметры схемы замещения.

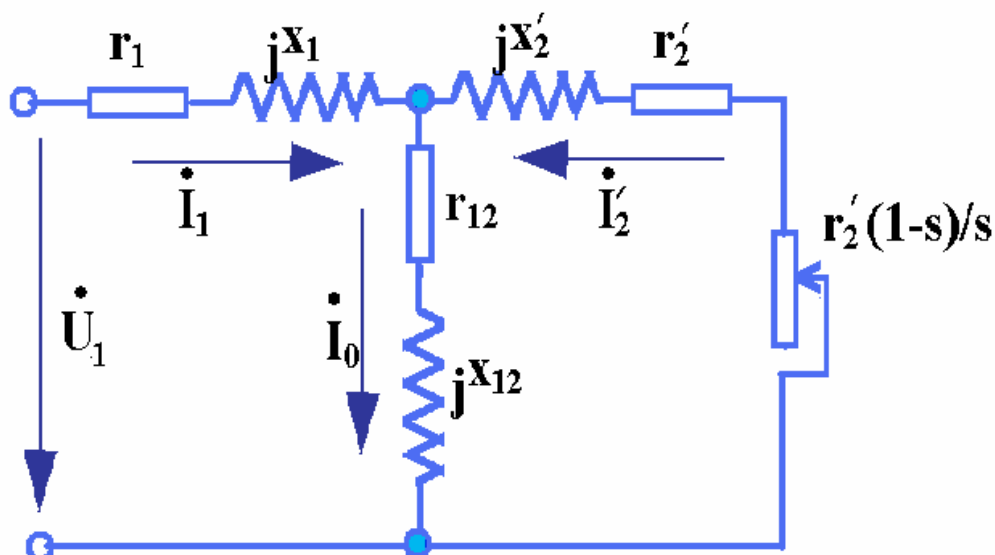


Рис.1. Схема замещения асинхронного двигателя

Необходимо иметь в виду, что в справочнике по серии 4А приведены параметры упрощенной Г-образной, а не Т-образной (изображенной на рис. 1) схемы замещения.

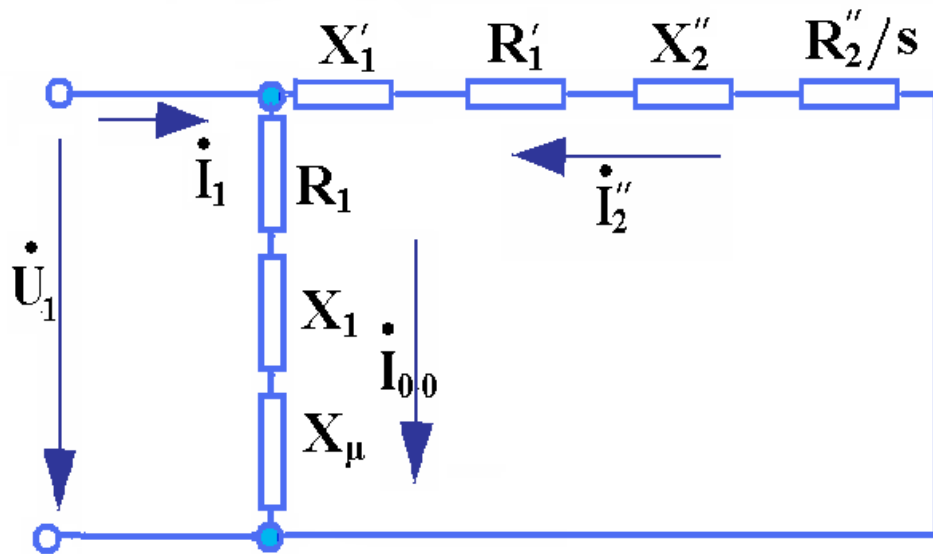


Рис. 2. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя, приведенная в справочнике по серии 4А

Далее в расчетах будем пользоваться более привычной и более понятной для студентов Т-образной схемой замещения. Формулы для расчета параметров Т-образной схемы по заданным параметрам Г-образной приведены в *Приложении*.

Ниже приведены тексты *MathCAD*'овских файлов, содержащих необходимые расчетные выражения. В приведенных фрагментах текста общепринятые обозначения переменных не поясняются. В тех случаях, когда это необходимо, пояснения даются. Так, например, скольжение, обычно обозначаемое s , здесь обозначено *slip* (что в переводе с английского на русский и означает «скольжение»). Сделано это потому, что в *MathCAD*'е буква s зарезервирована в качестве обозначения единицы времени (секунда). По тем же соображениям воздушный зазор обозначен *airgap*, а не δ и т.д. Рисунки, содержащиеся во вставленных фрагментах *MathCAD*'овских файлов, не нумеруются.

Вначале рассчитаем схему замещения по заданным значениям параметров, коэффициента мощности, номинального скольжения и КПД.

В справочнике по серии 4А параметры машины заданы в относительных единицах, но поскольку там же заданы номинальные значения фазных напряжения и тока, можно определить базовое сопротивление $z_B = U_\phi / I_\phi$ и после этого выразить значения параметров именованными числами. Поскольку в описании работы мы обращаемся к примеру расчета, приведенному в учебнике по проектированию электрических машин, здесь мы имеем возможность сразу задать параметры и номинальные данные машины, выраженные именованными числами. При этом следует задать значения, полученные после расчета рабочих (и пусковых – когда это потребуется) характеристик, а не те значения, которые найдены предварительно в начале проекта.

Номинальные данные (из примера расчета)

$$\begin{aligned}
 U_1 &:= 220 \cdot \text{В} & P_{2\text{H}} &:= 15 \cdot \text{кВт} & m_{\text{ph}} &:= 3 & n_1 &:= 1500 \cdot \frac{\text{об}}{\text{мин}} & n_1 &= 25 \text{ s}^{-1} \\
 \text{slip}_{\text{ном}} &:= 0.024 & \cos \text{Fi}_{\text{H}} &:= 0.894 & \eta_{\text{H}} &:= 0.892 \\
 I_{1\text{H}} &:= \frac{P_{2\text{H}}}{m_{\text{ph}} \cdot U_1 \cdot \cos \text{Fi}_{\text{H}} \cdot \eta_{\text{H}}} & I_{1\text{H}} &= 28.5 \text{ А} & z_{\text{баз}} &:= \frac{U_1}{I_{1\text{H}}} & z_{\text{баз}} &= 7.719 \text{ Ом}
 \end{aligned}$$

Мнимая единица и диапазон изменения скольжения:

$$i_{\text{img}} := \sqrt{-1} \quad i_{\text{img}} = i \quad \text{slip} := 0.002, 0.012 \dots 0.982$$

Параметры в именованных числах и в относительных единицах

$$\begin{aligned}
 r_1 &:= 0.355 \cdot \text{Ом} & r'_2 &:= 0.186 \cdot \text{Ом} & x_1 &:= 0.673 \cdot \text{Ом} & x'_2 &:= 0.912 \cdot \text{Ом} & x_{12} &:= 27.14 \cdot \text{Ом} & r_{12} &:= 1.47 \cdot \text{Ом} \\
 r_{1.\text{oe}} &:= \frac{r_1}{z_{\text{баз}}} & r'_{2.\text{oe}} &:= \frac{r'_2}{z_{\text{баз}}} & x_{1.\text{oe}} &:= \frac{x_1}{z_{\text{баз}}} & x'_{2.\text{oe}} &:= \frac{x'_2}{z_{\text{баз}}} & x_{12.\text{oe}} &:= \frac{x_{12}}{z_{\text{баз}}} & r_{12.\text{oe}} &:= \frac{r_{12}}{z_{\text{баз}}} \\
 r_{1.\text{oe}} &= 0.046 & r'_{2.\text{oe}} &= 0.024 & x_{1.\text{oe}} &= 0.087 & x'_{2.\text{oe}} &= 0.118 & x_{12.\text{oe}} &= 3.516 & r_{12.\text{oe}} &= 0.19
 \end{aligned}$$

Расчет T-образной схемы замещения с использованием значений параметров, выраженных именованными числами

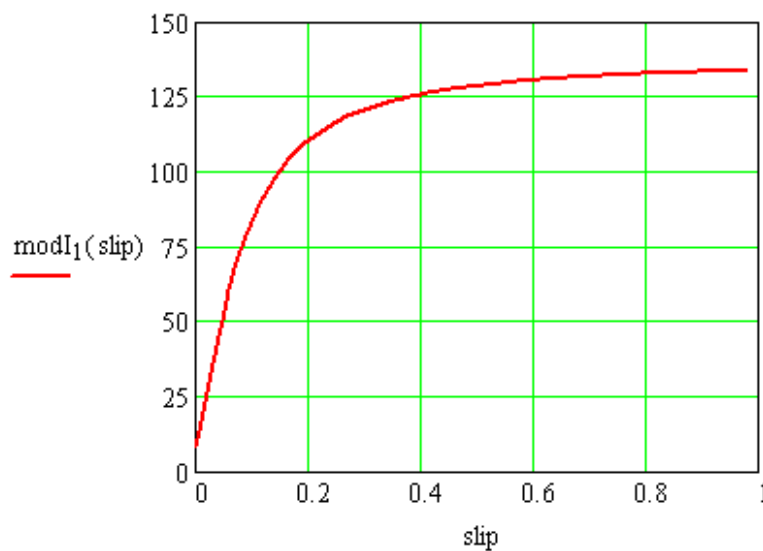
$$Z_2(\text{slip}) := \left(\frac{r'_2}{\text{slip}} \right) + x'_2 \cdot i_{\text{img}}$$

$$Z_{12}(\text{slip}) := \frac{(r_{12} + x_{12} \cdot i_{\text{img}}) \cdot Z_2(\text{slip})}{(r_{12} + x_{12} \cdot i_{\text{img}}) + Z_2(\text{slip})}$$

$$Z_{\text{BX}}(\text{slip}) := (r_1 + x_1 \cdot i_{\text{img}}) + Z_{12}(\text{slip})$$

$$I_1(\text{slip}) := \frac{U_1}{Z_{\text{BX}}(\text{slip})}$$

$$\text{mod}I_1(\text{slip}) := \sqrt{\text{Re}(I_1(\text{slip}))^2 + \text{Im}(I_1(\text{slip}))^2}$$



slip =	modI1(slip) =
2·10 ⁻³	8.332 A
0.012	16.258
0.022	26.293
0.032	36.03
0.042	45.073
0.052	53.318
0.062	60.756
0.072	67.422
0.082	73.373
0.092	78.674
0.102	83.392
0.112	87.593
0.122	91.337
0.132	94.681
0.142	97.672
0.152	100.355

Сравним номинальный ток статора, рассчитанный по заданным номинальным значениям КПД и коэффициента мощности с током статора, рассчитанным по схеме замещения при заданных значениях параметров и номинального скольжения (проверка исходных данных):

$$I_{1Н} = 28.5 \text{ A}$$

$$\text{mod}I_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 28.285 \text{ A}$$

Ток ротора и коэффициент мощности (по результатам расчета схемы замещения при заданных значениях параметров):

$$I_2(\text{slip}) := \frac{U_1 - I_1(\text{slip}) \cdot (r_1 + x_1 \cdot i_{\text{img}})}{Z_2(\text{slip})} \quad I_2(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = (25.61 - 4.68i) \text{ A}$$

$$\text{mod}I_2(\text{slip}) := \sqrt{\text{Re}(I_2(\text{slip}))^2 + \text{Im}(I_2(\text{slip}))^2} \quad \text{mod}I_2(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 26.04 \text{ A}$$

$$\phi(\text{slip}) := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(I_1(\text{slip}))}{\text{Re}(I_1(\text{slip}))}\right) \quad \phi_{\text{deg}}(\text{slip}) := \phi(\text{slip}) \cdot 57.296$$

$$\text{PF}(\text{slip}) := \cos(\phi(\text{slip})) \quad \text{PF}(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 0.903$$

Механическая мощность на валу двигателя:

$$P_2(\text{slip}) := m_{\text{ph}} \cdot \left[\left(\text{Re}(I_2(\text{slip}))^2 + \text{Im}(I_2(\text{slip}))^2 \right) \cdot \frac{r'_2 \cdot (1 - \text{slip})}{\text{slip}} \right]$$

Механическая мощность (мощность на валу) при заданном номинальном скольжении

$$P_2(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 15381 \text{ Вт}$$

Вентиляционные и механические потери, соответствующие номинальному скольжению

$$P_{\text{вент.мех.ном.}} := P_2(\text{slip}_{\text{НОМ}}) - P_{2\text{н}} \quad P_{\text{вент.мех.ном.}} = 381 \text{ Вт}$$

В примере расчета сумма механических потерь (117 Вт) и добавочных потерь в стали (не учитываемых при расчете r_{12} , 93,1 Вт) равна 210,1 Вт, что меньше «избыточной» механической мощности, равной 381 Вт.

Проверка номинального значения КПД:

$$\eta_{\text{ном.расч.}} := \frac{P_{2H}}{m_{ph} \cdot U_1 \cdot \text{mod}I_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) \cdot \text{PF}(\text{slip}_{\text{НОМ}})} \quad \eta_{\text{ном.расч.}} = 0.89$$

Номинальный момент:

$$n_2(\text{slip}) := n_1 \cdot (1 - \text{slip}) \quad \omega_2(\text{slip}) := 2 \cdot \pi \cdot n_2(\text{slip})$$

$$M(\text{slip}) := \frac{P_2(\text{slip})}{\omega_2(\text{slip})} \quad M_{\text{НОМ}} := \frac{P_{2H}}{2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot (1 - \text{slip}_{\text{НОМ}})} \quad M_{\text{НОМ}} = 97.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Другие номинальные значения:

$$I_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = (25.542 - 12.15i) \text{ A} \quad \text{mod}I_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 28.28 \text{ A}$$

$$\text{PF}(\text{slip}_{\text{НОМ}}) := \cos(\phi(\text{slip}_{\text{НОМ}})) \quad \text{PF}(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 0.903$$

$$P_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) := m_{ph} \cdot U_1 \cdot \text{mod}I_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) \cdot \text{PF}(\text{slip}_{\text{НОМ}}) \quad P_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) = 16858 \text{ Вт}$$

$$\eta_{\text{НОМ}} := \frac{P_2(\text{slip}_{\text{НОМ}}) - P_{\text{вент.мех.НОМ.}}}{P_1(\text{slip}_{\text{НОМ}})} \quad \eta_{\text{НОМ}} = 0.89$$

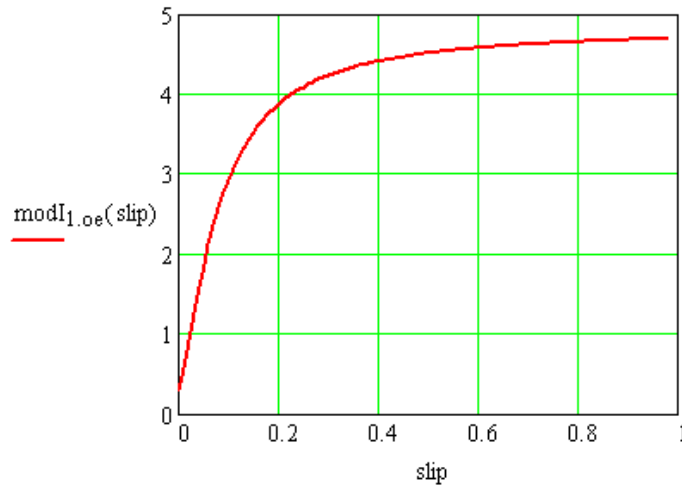
Расчет схемы замещения с использованием параметров, выраженных в относительных единицах:

$$U_{1.oe} := 1$$

$$Z_{2.oe}(\text{slip}) := \left(\frac{r'_{2.oe}}{\text{slip}} \right) + x'_{2.oe} \cdot i_img \quad Z_{12.oe}(\text{slip}) := \frac{(r_{12.oe} + x_{12.oe} \cdot i_img) \cdot Z_{2.oe}(\text{slip})}{(r_{12.oe} + x_{12.oe} \cdot i_img) + Z_{2.oe}(\text{slip})}$$

$$Z_{\text{вх.oe}}(\text{slip}) := (r_{1.oe} + x_{1.oe} \cdot i_img) + Z_{12.oe}(\text{slip})$$

$$I_{1.oe}(\text{slip}) := \frac{U_{1.oe}}{Z_{\text{вх.oe}}(\text{slip})} \quad \text{mod}I_{1.oe}(\text{slip}) := \sqrt{\text{Re}(I_{1.oe}(\text{slip}))^2 + \text{Im}(I_{1.oe}(\text{slip}))^2}$$



mod I _{1.oe} (slip)	slip =
0.292	2·10 ⁻³
0.57	0.012
0.923	0.022
1.264	0.032
1.582	0.042
1.871	0.052
2.132	0.062
2.366	0.072
2.574	0.082
2.76	0.092
2.926	0.102
3.073	0.112
3.205	0.122
3.322	0.132
3.427	0.142
3.521	0.152

$$\Gamma_{2.oe}(slip) := \frac{U_{1.oe} - I_{1.oe}(slip) \cdot (r_{1.oe} + x_{1.oe} \cdot i_{img})}{Z_{2.oe}(slip)}$$

$$\Gamma_{2.oe}(slip_{НОМ}) = 0.899 - 0.164i$$

$$\text{mod} \Gamma_{2.oe}(slip) := \sqrt{\text{Re}(\Gamma_{2.oe}(slip))^2 + \text{Im}(\Gamma_{2.oe}(slip))^2}$$

$$\text{mod} \Gamma_{2.oe}(slip_{НОМ}) = 0.914$$

Замечание. Механическая мощность на валу, рассчитанная при токе ротора, соответствующем номинальному скольжению, выраженная в относительных единицах, оказывается не равной единице:

$$P_{2.oe}(slip) := 1 \cdot \left[\left(\text{Re}(\Gamma_{2.oe}(slip))^2 + \text{Im}(\Gamma_{2.oe}(slip))^2 \right) \cdot \frac{r'_{2.oe} \cdot (1 - slip)}{slip} \right]$$

$$P_{2.oe}(slip_{НОМ}) = 0.818$$

В связи с этим, базовое значение активной мощности равно:

$$P_{2.баз.} := \frac{P_2(slip_{НОМ})}{P_{2.oe}(slip_{НОМ})}$$

$$P_{2.баз.} = 18810 \text{ Вт}$$

Базовое значение активной мощности, таким образом, оказывается равным полной мощности двигателя, потребляемой из сети, выраженной в ваттах:

$$m_{ph} \cdot U_1 \cdot I_{1H} = 18810 \text{ Вт}$$

$$\frac{P_{2H}}{\eta_{\text{ном.расч.}} \cdot \cos(\phi(\text{slip}_{\text{ном}}))} = 18668 \text{ Вт}$$

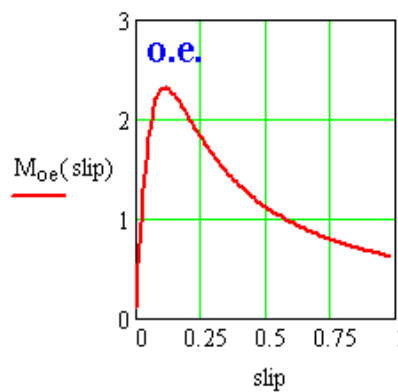
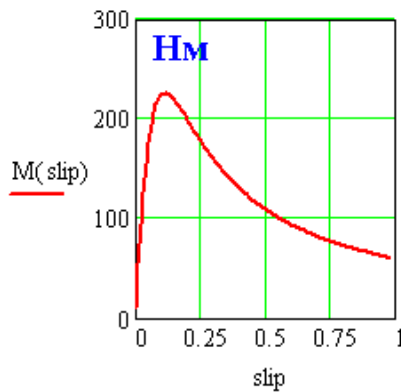
$$P_{2.баз.} \cdot (U_{1.oe} \cdot \text{mod} I_{1.oe}(\text{slip}_{\text{ном}})) = 18668 \text{ Вт}$$

Механическая характеристика, рассчитанная при постоянных параметрах:

$$M_{oe}(\text{slip}) := \frac{M(\text{slip})}{M_{\text{ном}}}$$

$$M(\text{slip}_{\text{ном}}) = 100.3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$M_{\text{ном}} = 97.8 \text{ Н} \cdot \text{м}$$



$M_{oe}(\text{slip}) =$	$\text{slip} =$
0.096	2.10-3
0.55	0.012
0.952	0.022
1.295	0.032
1.579	0.042
1.805	0.052
1.979	0.062
2.108	0.072
2.199	0.082
2.258	0.092
2.292	0.102
2.306	0.112
2.304	0.122
2.291	0.132
2.268	0.142
2.238	0.152

Следует обратить внимание на то, что расчет при постоянных значениях параметров, соответствующих номинальному режиму работы, приводит к заниженным значениям пускового момента. Для того чтобы получить реальные значения пускового тока и момента, надо учесть зависимость параметров от вытеснения тока в стержнях ротора и от насыщения коронок зубцов.

Угол между векторами токов статора и ротора в эл. градусах:

$$\phi_{deg}(\text{slip}_{\text{ном}}) = -25.44$$

$$\phi_{2.deg}(\text{slip}) := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(I_{2.oe}(\text{slip}))}{\text{Re}(I_{2.oe}(\text{slip}))}\right) \cdot 57.296 - 180$$

$$\phi_{2.deg}(\text{slip}_{\text{ном}}) = -190.3$$

$$\phi_{21.deg}(\text{slip}_{\text{ном}}) := \phi_{2.deg}(\text{slip}_{\text{ном}}) - \phi_{deg}(\text{slip}_{\text{ном}})$$

$$\phi_{21.deg}(\text{slip}_{\text{ном}}) = -164.9$$

При определении фазовых углов учтено, во-первых, что ток роторной ветви схемы замещения направлен противоположно действительному току ротора, и, во-

вторых, что функция atan предназначена для аргументов, значения которых находятся в первом и четвертом квадрантах. Для расширения возможностей этой функции можно, пользуясь средствами программирования MathCAD'a, составить несложную программу (приведена ниже), анализирующую отношение действительной и мнимой частей аргумента. Приведенный ниже рисунок иллюстрирует сказанное.

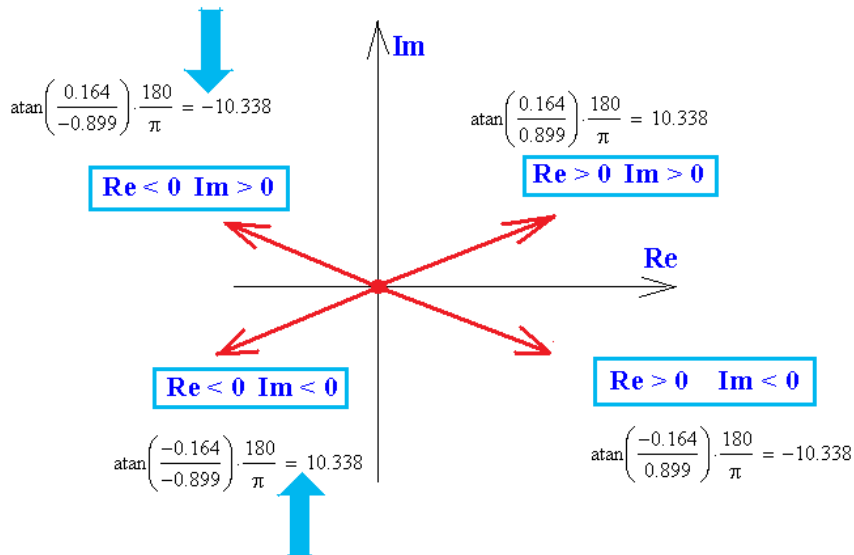


Рис. 3. Пояснения к работе функции atan

Векторная диаграмма токов статора и ротора, построенная по результатам расчета схемы замещения при номинальном скольжении, приведена на следующем рисунке.

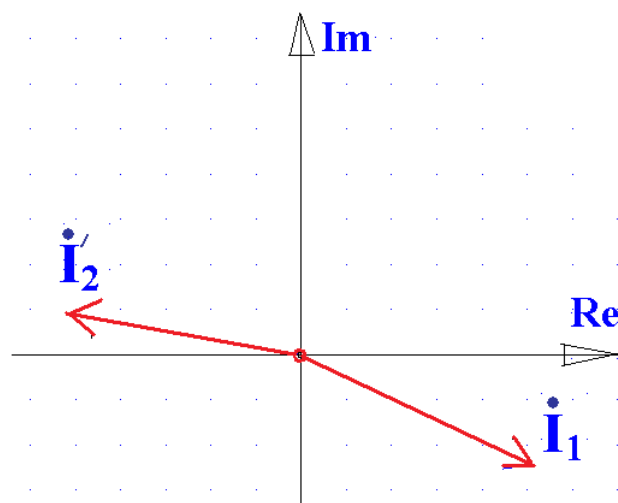


Рис. 4. Векторная диаграмма токов статора и ротора

Дополнение функции atan

$$\text{ImI2}(\text{slip}) := \text{Im}(I_2(\text{slip}))$$

$$\text{ReI2}(\text{slip}) := \text{Re}(I_2(\text{slip})) + \text{if}(\text{Re}(I_2(\text{slip})) \cdot A^{-1} \neq 0, 0, 0.0001) \cdot A$$

$$\phi_{0_2}(\text{slip}) := \text{atan}\left(\frac{|\text{ImI2}(\text{slip})|}{|\text{ReI2}(\text{slip})|}\right)$$

$$\phi_2(\text{slip}) := \begin{cases} \phi_{0_2}(\text{slip}) & \text{if } \text{ImI2}(\text{slip}) \geq 0 \wedge \text{ReI2}(\text{slip}) \geq 0 \\ (\pi - \phi_{0_2}(\text{slip})) & \text{if } \text{ImI2}(\text{slip}) \geq 0 \wedge \text{ReI2}(\text{slip}) < 0 \\ (\pi + \phi_{0_2}(\text{slip})) & \text{if } \text{ImI2}(\text{slip}) < 0 \wedge \text{ReI2}(\text{slip}) < 0 \\ -\phi_{0_2}(\text{slip}) & \text{if } \text{ImI2}(\text{slip}) < 0 \wedge \text{ReI2}(\text{slip}) \geq 0 \end{cases}$$

$$\phi_{2\text{deg}}(\text{slip}) := \phi_2(\text{slip}) \cdot 180 \cdot \pi^{-1} \qquad \phi_{2\text{deg}}(\text{slip}_{\text{ном}}) = -10.35$$

$$\phi_{2\text{deg}}(\text{slip}) := \phi_2(\text{slip}) \cdot 180 \cdot \pi^{-1} - 180 \qquad \phi_{2\text{deg}}(\text{slip}_{\text{ном}}) = -190.35$$

Угол между векторами токов статора и ротора:

$$\phi_{1\text{deg}}(\text{slip}) := \text{atan}\left(\frac{\text{Im}(I_1(\text{slip}))}{\text{Re}(I_1(\text{slip}))}\right) \cdot 180 \cdot \pi^{-1} \qquad \phi_{1\text{deg}}(\text{slip}_{\text{ном}}) = -25.44$$

$$\phi_{12\text{deg}}(\text{slip}) := \phi_{1\text{deg}}(\text{slip}_{\text{ном}}) - \phi_{2\text{deg}}(\text{slip}) \qquad \phi_{12\text{deg}}(\text{slip}_{\text{ном}}) = 164.91$$

Определение токов пазов статора и ротора для задания их в конечно-элементной модели асинхронного двигателя

Как уже отмечалось, задание на конечно-элементной модели токов статора, соответствующих определенному моменту времени, не представляет труда. Заметим здесь, что это верно для машин относительно небольшой мощности, имеющих, как правило, насыщенные обмотки из круглого провода, в которых можно пренебречь вытеснением тока в проводах. При моделировании крупных машин этот вопрос требует специального исследования.

Роторы короткозамкнутых асинхронных двигателей, напротив, проектируют таким образом, чтобы вытеснение тока в стержнях (в режиме пуска) проявлялось в наибольшей мере. Как известно, это способствует заметному повышению пускового момента. Однако в режимах, близких к номинальным, при весьма малой частоте токов в роторе, вытеснение тока незначительно и можно принять, что плотность тока в поперечном сечении стержня, как и в пазу статора, примерно постоянна.

Таким образом, задача моделирования сводится к определению пазовых токов, вернее, к определению плотностей тока, которые необходимо задать на участках модели, соответствующих пазам статора и ротора. Ниже приведены расчеты значений плотности тока, которые надо задать при моделировании номинального режима работы рассматриваемого асинхронного двигателя в тот момент времени, когда ток в фазе *AX* статора положителен и равен амплитудному значению. Токи в двух других фазах при условии, что трехфазная система симметрична, в этот момент времени отрицательны и равны половине амплитудного значения.

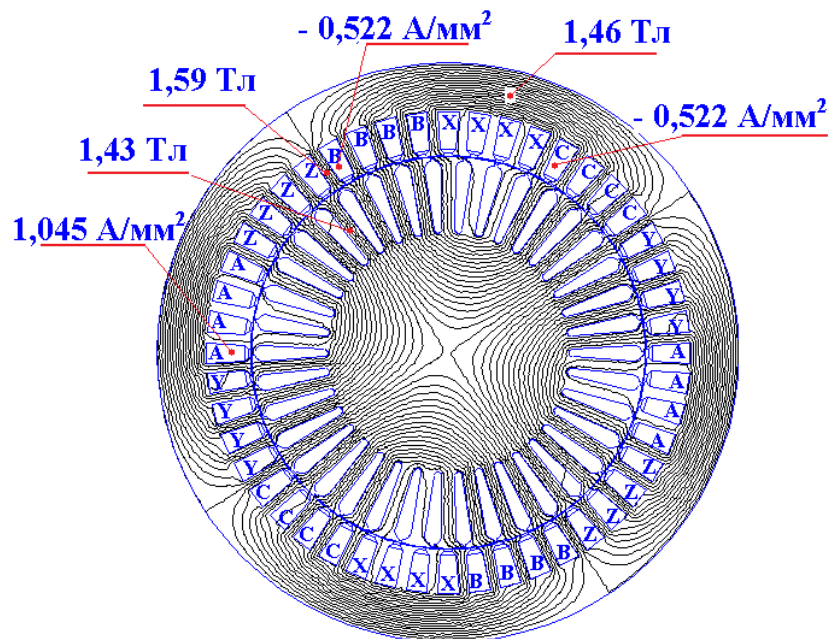


Рис. 5. Поле в поперечном сечении двигателя при холостом ходе

На рис. 5 показано поле в поперечном сечении двигателя, рассматриваемого в качестве примера.

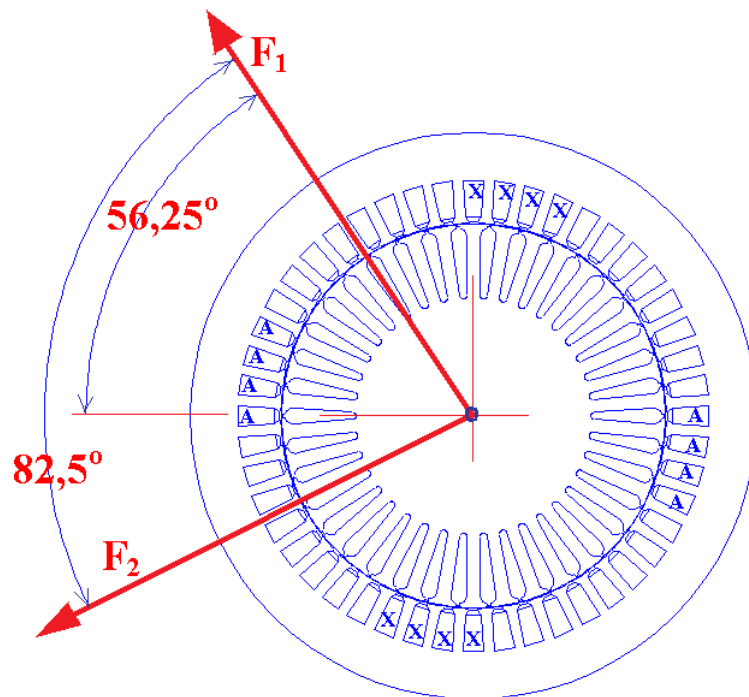


Рис. 6. Взаимное положение векторов МДС статора и ротора в рассматриваемый момент времени

На рис. 6 показано взаимное положение векторов МДС статора и ротора в момент времени, когда ток в фазе $AХ$ достигает максимума. Пространственный угол между этими векторами равен разности аргументов комплексных токов статора и ротора, рассчитанных по схеме замещения (и выраженной в электрических градусах), деленной на число пар полюсов. В рассматриваемый момент времени (при оговоренных выше условиях) положение вектора МДС статора совпадает с магнитной осью фазы $AХ$, поэтому при заданной на модели схеме обмотки положение обоих векторов МДС оказывается определенным.

Для того чтобы найти пазовые токи ротора примем допущение о том, что МДС ротора синусоидально распределена вдоль зазора. Поскольку разность значений МДС двух соседних зубцов ротора равна току, протекающему по стержню, расположенному между этими зубцами, при известных про-

пространственных (угловых) координатах вектора МДС и пазов ротора токи стержней могут быть найдены.

Ниже приводятся фрагменты *MathCAD*'овского файла, реализующего этот способ расчета токов стержней ротора.

Вычисления для построения FEMM'овской модели, в которой МДС статора и ротора моделируются токами в пазах.

Основные гармоники МДС статора и ротора.

Для определения амплитуд МДС надо знать число витков фазы, обмоточный коэффициент и полюсность машины:

$$m_{ph.1} := 3 \quad w_{ph.1} := 104 \quad p_{pair} := 2 \quad k_{w.1} := 0.958$$

$$F_{1m} := \frac{m_{ph.1} \cdot \sqrt{2} \cdot \text{mod}I_1(\text{slip}_{ном}) \cdot w_{ph.1} \cdot k_{w.1}}{\pi \cdot p_{pair}} \quad F_{1m} = 1903 \text{ A}$$

Поскольку по схеме замещения рассчитан ток обмотки ротора, приведенной к обмотке статора, числа фаз, витков и обмоточный коэффициент считаем для нее теми же, что и для обмотки статора:

$$F_{2m} := \frac{m_{ph.1} \cdot \sqrt{2} \cdot (\text{mod}I'_{2.oe}(\text{slip}_{ном}) \cdot \text{mod}I_1(\text{slip}_{ном})) \cdot w_{ph.1} \cdot k_{w.1}}{\pi \cdot p_{pair}} \quad F_{2m} = 1738 \text{ A}$$

Угол между векторами МДС статора и ротора (выраженный в электрических градусах) равен углу между векторами токов статора и ротора, найденных при расчете схемы замещения. Пространственный угол между векторами МДС в p_{pair} раз меньше.

$$\phi_{F.простр.} := \phi_{12deg}(\text{slip}_{ном}) \cdot p_{pair}^{-1} \quad \phi_{F.простр.} = 82.5$$

Плотности тока на участках модели, соответствующих пазам статора и ротора:

Площадь паза статора и число эффективных проводов в пазу и число параллельных ветвей обмотки:

$$S_{\Pi 1} := 160.3 \cdot \text{мм}^2 \quad u_{\Pi} := 13 \quad a_1 := 1 \quad S_{\Pi 2} := 167.2 \cdot \text{мм}^2$$

$$j_{A, \text{НОМ}} := \text{modI}_1(\text{slip}_{\text{НОМ}}) \cdot \sqrt{2} \cdot u_{\Pi} \cdot S_{\Pi 1}^{-1} \cdot a_1^{-1} \quad j_{A, \text{НОМ}} = 3.244 \text{ А} \cdot \text{мм}^{-2}$$

$$\text{radto deg} := 180 \cdot \pi^{-1} \quad \text{degtorad} := \pi \cdot 180^{-1}$$

Угловые координаты векторов МДС статора и ротора и зубцовое деление ротора (в пространственных градусах, отсчет - от оси первого паза статора по часовой стрелке)

$$\alpha_{F1, \text{пр.}} := 56.25$$

$$\alpha_{F2, \text{пр.}} := \alpha_{F1, \text{пр.}} - \phi_{12 \text{deg}}(\text{slip}_{\text{НОМ}}) \cdot \text{ppair}^{-1} \quad \alpha_{F2, \text{пр.}} = -26.2$$

$$Z_2 := 38 \quad \alpha_{\text{tz}2} := 360 \cdot Z_2^{-1} \quad \alpha_{\text{tz}2} = 9.5$$

Угловая координата первого паза ротора (расположен напротив первого паза статора):

$$\alpha_{z2_0} := 0$$

Угловые координаты осей пазов ротора:

$$z_2 := 1..Z_2 \quad \alpha_{z2}(z_2) := \alpha_{z2_0} + \alpha_{\text{tz}2} \cdot (z_2 - 1)$$

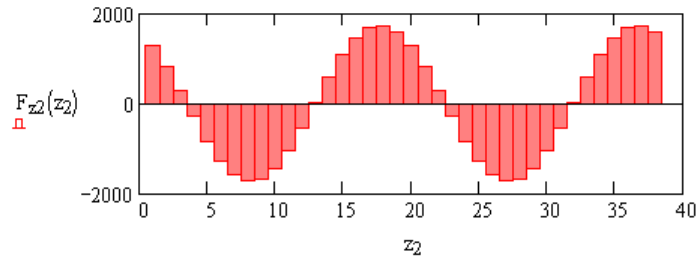
Здесь принято, что угловая координата отсчитывается в направлении часовой стрелки от оси паза статора, расположенного слева на горизонтальной линии, проходящей через центр поперечного сечения двигателя. Этот паз статора считается первым. Принято также, что первый паз ротора расположен напротив первого паза статора и его угловая координата, таким образом, равна нулю. Тем самым положение ротора относительно статора в рассматриваемый момент времени фиксировано. Это вносит дополнительную определенность в формируемую модель. Можно, однако, рассмотреть и другие положения ротора, незначительно усложнив последнее выражение. Это

имеет смысл сделать в том случае, когда исследуются зависимости токов и момента от взаимного положения сердечников.

Распределения МДС статора и ротора вдоль зазора (для построения графиков и проверки)

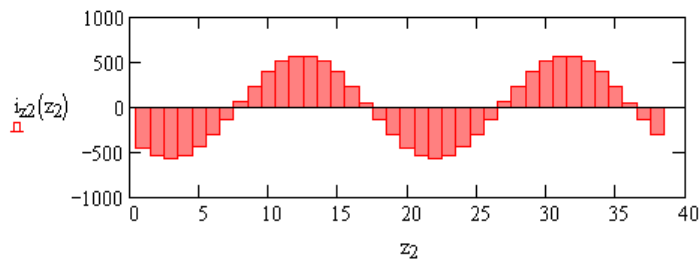
МДС зубцов ротора, расположенных слева от рассматриваемых пазов ротора:

$$F_{z2}(z_2) := F_{2m} \cdot \cos\left[\left[\left[\left(\alpha_{z2}(z_2) - \alpha_{tz2} \cdot 0.5\right) - \alpha_{F2,mp}\right] \cdot \text{ppair}\right] \cdot \text{degtorad}\right]$$



Токи стержней ротора:

$$i_{z2}(z_2) := \begin{cases} F_{z2}(z_2 + 1) - F_{z2}(z_2) & \text{if } z_2 < Z_2 \\ F_{z2}(1) - F_{z2}(Z_2) & \text{otherwise} \end{cases}$$



$$i_{z2,1,z_2} := i_{z2}(z_2)$$

$$i_{z2} = \begin{array}{c|cccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \hline 1 & -453.4 & -542.2 & -572.2 & -540.2 & -449.7 & -310.5 & -137.6 & 50.2 & 232.6 & 389.8 \end{array} \text{ A}$$

$$i_{z2} = \begin{array}{c|cccccccccc} & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ \hline 1 & 504.7 & 564.9 & 563.9 & 501.8 & 385.3 & 227.1 & 44.3 & -143.4 & -315.5 & -453.4 \end{array} \text{ A}$$

$$i_{z2} = \begin{array}{c|cccccccccc} & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 & 30 \\ \hline 1 & -542.2 & -572.2 & -540.2 & -449.7 & -310.5 & -137.6 & 50.2 & 232.6 & 389.8 & 504.7 \end{array} \text{ A}$$

$$i_{z2} = \begin{array}{c|cccccccccc} & 29 & 30 & 31 & 32 & 33 & 34 & 35 & 36 & 37 & 38 \\ \hline 1 & 389.8 & 504.7 & 564.9 & 563.9 & 501.8 & 385.3 & 227.1 & 44.3 & -143.4 & -315.5 \end{array} \text{ A}$$

Плотности тока в пазах ротора в рассматриваемый момент времени:

$$j_{z2_{1,x_2}} := i_{z2_{1,x_2}} \cdot S_{\pi r2}^{-1}$$

$j_{z2} =$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$A \cdot \text{мм}^{-2}$
	1	-2.71	-3.24	-3.42	-3.23	-2.69	-1.86	-0.82	0.3	1.39	2.33	
$j_{z2} =$		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	$A \cdot \text{мм}^{-2}$
	1	3.02	3.38	3.37	3	2.3	1.36	0.26	-0.86	-1.89	-2.71	
$j_{z2} =$		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	$A \cdot \text{мм}^{-2}$
	1	-3.24	-3.42	-3.23	-2.69	-1.86	-0.82	0.3	1.39	2.33	3.02	
$j_{z2} =$		29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	$A \cdot \text{мм}^{-2}$
	1	2.33	3.02	3.38	3.37	3	2.3	1.36	0.26	-0.86	-1.89	

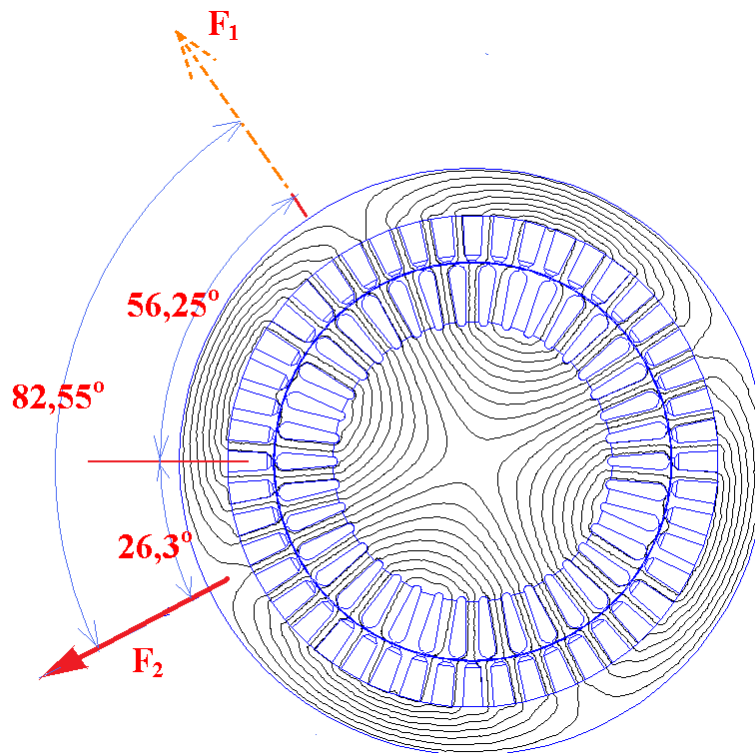


Рис. 7. Картина поля ротора при рассчитанных плотностях тока в стержнях. Токи фаз обмотки статора приняты равными нулю.

На рис. 8 показана картина поля в поперечном сечении двигателя при номинальной нагрузке. При моделировании, так же, как и в примере расче-

та, принято, что для зубцов и ярем сердечников задаются разные кривые намагничивания, отличные от основной кривой намагничивания стали.

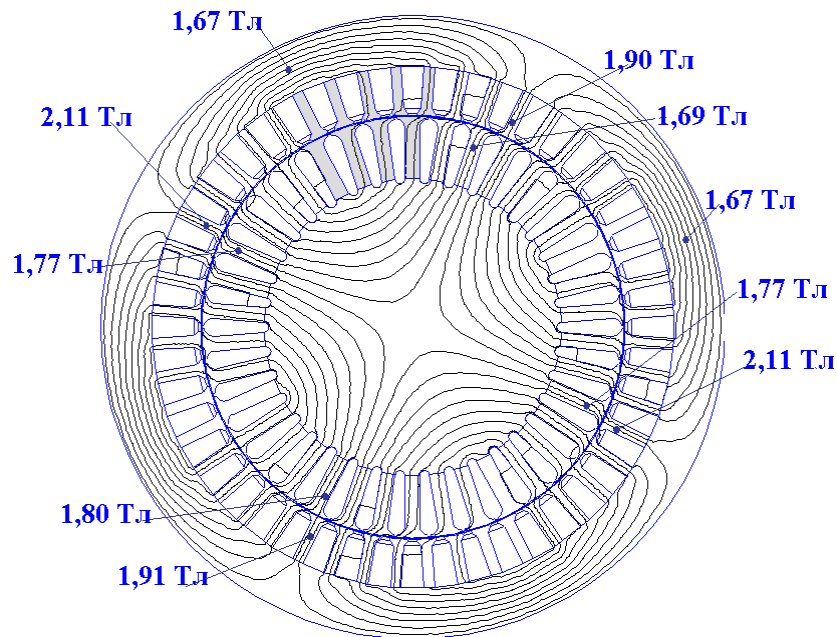


Рис. 8. Картина поля в поперечном сечении двигателя при номинальной нагрузке. Значения индукции в зубцах и ярме статора близки к полученным в примере расчета. На рисунке показано, что при моделировании участки зубцов и ярем обоих сердечников рассматриваются как отдельные блоки.

Полученные при моделировании значения индукции в зазоре, зубцах и ярмах сердечников и значение механической мощности на валу в номинальном режиме весьма близки к результатам электромагнитного расчета двигателя:

индукция в зубцах статора:	1,9 Тл
индукция в ярме статора:	1,6 Тл
индукция в зубцах ротора:	1,8 Тл
амплитуда основной гармоники индукции в зазоре:	0,749 Тл

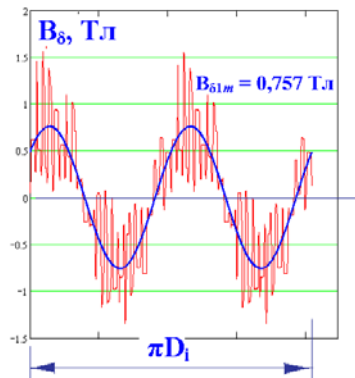


Рис. 9. Распределение индукции в зазоре

Механическая мощность на валу при номинальном скольжении, найденная по электромагнитному моменту, рассчитанному по максвелловским натяжениям (результаты моделирования):

$$P_{2\text{ мех. ном.}} = M_{\text{эм}} \omega_1 (1 - s_{\text{ном.}}) = (0,747 \cdot 140 \cdot 0,97) \cdot \frac{2\pi \cdot 1500}{60} \cdot (1 - 0,024) = 15345 \text{ Вт},$$

где 0,747 Н/мм – измеренное на модели значение электромагнитного момента (на 1 мм «глубины» модели, 140 мм – расчетная длина активной зоны, 0,97 – коэффициент заполнения сердечников сталью.

По результатам моделирования механическая мощность на валу при номинальном скольжении на 345 Вт больше номинальной мощности двигателя, таким образом, «избыточная» мощность, необходимая для покрытия вентиляционных потерь, практически совпадает с аналогичной избыточной мощностью, найденной из расчета схемы замещения при номинальном скольжении (381 Вт).

Следует заметить, что при моделировании двигателя при условии, что свойства сердечников (и зубцов, и ярем) определяются основной кривой намагничивания, результаты отличаются от приведенных выше. Ниже приведены эти результаты, полученные при тех же значениях плотностей тока, что и в предыдущем опыте моделирования.

индукция в зубцах статора:	1,82 Тл
индукция в ярме статора:	1,61 Тл
индукция в зубцах ротора:	1,60 Тл

амплитуда основной гармоники индукции в зазоре: 0,717 Тл

$$P_{2_{\text{мех.ном.}}} = M_{\text{эм}} \omega_1 (1 - s_{\text{ном.}}) = (0,703 \cdot 140 \cdot 0,97) \cdot \frac{2\pi \cdot 1500}{60} \cdot (1 - 0,024) = 14638 \text{ Вт},$$

Модели с гладкими цилиндрическими сердечниками и с представлением обмоток статора и ротора гармоническими токовыми слоями

Перейдем теперь к расчету величин, необходимых для формирования идеализированных конечно-элементных моделей, в которых асинхронный двигатель представлен двумя цилиндрическими сердечниками, разделенными равномерным воздушным зазором. МДС статора и ротора в этих моделях представлены гармоническими токовыми слоями.

Гармонические токовые слои можно сформировать различным образом и с различной степенью дискретности. Во-первых, слой можно представить в виде прилегающих друг к другу отрезков тонкого кольца, причем на каждом из отрезков должна быть задана постоянная плотность тока, значение которой определяется координатой участка. Как показывает опыт моделирования, достаточно точное воспроизведение гармонической МДС достигается при разбиении периода слоя на 24 участка. Построение такого токового слоя нетрудно выполнить вручную, не прибегая к программированию (т.е. к написанию *Lua*-сценария).

Другим способом представления МДС обмотки является формирование токового слоя в виде достаточно большого числа линейных токов, размещенных вблизи поверхности сердечника. На модели поперечного сечения такой слой выглядит как ряд узловых точек, в каждой из которых задано определенное значение тока, также зависящее от координаты точки. Для достаточно точного воспроизведения МДС в этом случае на периоде требуется задать довольно большое число точек, особенно, если на модели предполагается одновременно воспроизвести МДС не только основной гармоники, но

и высших. Формирование такого слоя может оказаться весьма трудоемким, если не воспользоваться средствами программирования.

Конечно-элементные модели с гладкими цилиндрическими сердечниками и с токовыми слоями статора и ротора, состоящими из участков с постоянной плотностью тока

Основную гармонику МДС обмотки машины можно воспроизвести с помощью тонкого токового слоя, составленного из достаточно большого числа отрезков с заданной постоянной плотностью тока на каждом. Вполне приемлемая точность воспроизведения гармоники МДС достигается уже при двенадцати участках на период (30 эл. градусов на участок). В приведенных ниже примерах период основной гармоники МДС разбит на вдвое большее число участков – 24 (по 15 эл. градусов на участок, что для 4-полюсной машины равно 7,5 пространственным градусам).

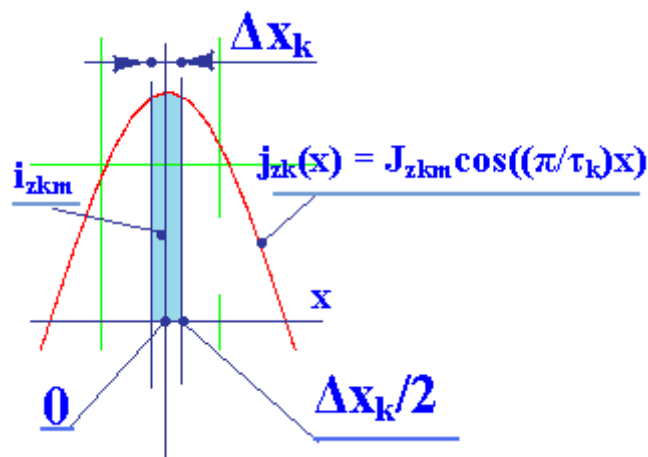


Рис. 10. К определению максимального тока на участке токового слоя

Гармоническое возбуждение сердечника обеспечивается гармоническим распределением скалярного магнитного потенциала по его поверхности, причем амплитуда потенциала приравнивается амплитуде основной гармоники МДС. Такое распределение потенциала соответствует гармониче-

ческому токовому слою с линейной плотностью тока $j_{zk}(x)$ (размерность – А/м, k – номер гармоники)

$$\psi_k(x) = \Psi_{km} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_k} x\right)$$

$$j_{zk}(x) = -\frac{\pi}{\tau_k} \Psi_{km} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_k} x\right).$$

При разбиении периода k -й гармоники на $N_{yч.k}$ участков ширина каждого из них равна $\Delta x_k = 2\pi R / p_k N_{yч.k}$. Проинтегрировав на ширине Δx_k распределение линейной плотности тока $j_{zk}(x)$, получим выражение для максимального тока на участке слоя i_{zkm} и, разделив на площадь участка $\Delta x_k \Delta_i$, где Δ_i – толщина токового слоя, – выражение для максимальной плотности тока (размерность – А/м²), которую следует задать на участках:

$$j_{Szk m} = \Psi_{km} \cdot 2 \sin\left(\frac{\pi}{N_{yч.k}}\right) \cdot \frac{p_k N_{yч.k}}{2\pi R \Delta_i}.$$

При достаточно большом числе разбиений $N_{yч.k}$ можно воспользоваться приближенным выражением, имея в виду, что синус малого аргумента приближенно равен самому аргументу:

$$j_{Szk m} = \Psi_{km} \frac{p_k}{R \Delta_i}.$$

Для определения амплитуд МДС надо знать число витков фазы, обмоточный коэффициент и полность машины:

$$m_{ph.1} := 3 \quad w_{ph.1} := 104 \quad p_{pair} := 2 \quad k_{w.1} := 0.958$$

$$F_{1m} := \frac{m_{ph.1} \cdot \sqrt{2} \cdot \text{mod} \Gamma_1(\text{slip}_{ном}) \cdot w_{ph.1} \cdot k_{w.1}}{\pi \cdot p_{pair}} \quad F_{1m} = 1903 \text{ A}$$

Поскольку по схеме замещения рассчитан ток обмотки ротора, приведенной к обмотке статора, числа фаз, витков и обмоточный коэффициент считаем для нее теми же, что и для обмотки статора:

$$F_{2m} := \frac{m_{ph.1} \cdot \sqrt{2} \cdot (\text{mod} \Gamma_{2.oe}(\text{slip}_{ном}) \cdot \text{mod} \Gamma_1(\text{slip}_{ном})) \cdot w_{ph.1} \cdot k_{w.1}}{\pi \cdot p_{pair}} \quad F_{2m} = 1738 \text{ A}$$

При расчете токовых слоев, эквивалентирующих основные гармоники МДС статора и ротора, амплитуды гармоник скалярного магнитного потенциала полагаем равными амплитудам МДС:

$$\Psi_{1m} := F_{1m} \quad \Psi_{1m} = 1903 \text{ A} \quad \Psi_{2m} := F_{2m} \quad \Psi_{2m} = 1738 \text{ A}$$

Из примера расчета АД 15 кВт:

$$D_{\text{рот}} := 184.0 \cdot \text{мм} \quad D_{\text{рот}} = 184 \text{ мм} \quad \text{airgap} := 0.5 \cdot \text{мм} \quad \text{airgap} = 0.5 \text{ мм}$$

Номер основной (рабочей) гармоники на длине окружности активной зоны - совпадает с числом пар полюсов (для 4-полюсной машины равен 2):

$$p_{\text{pair}} := 2$$

Число участков, на которое разбиты периоды гармоник МДС и толщина токовых слоев статора и ротора:

$$N_{\text{уч}} := 24 \quad \Delta_i = 0.05 \text{ мм}$$

Максимальные значения плотности тока на участках токовых слоев статора и ротора:

$$j_{z1m} := \frac{2 \cdot p_{\text{pair}} \cdot F_{1m}}{(D_{\text{рот}} + \text{airgap}) \cdot \Delta_i} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{уч}}}\right)$$

$$j_{z1m} = 107.696 \text{ A} \cdot \text{мм}^{-2}$$

$$j_{z2m} := \frac{2 \cdot p_{\text{pair}} \cdot F_{2m}}{(D_{\text{рот}} + \text{airgap}) \cdot \Delta_i} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{уч}}}\right)$$

$$j_{z2m} = 98.381 \text{ A} \cdot \text{мм}^{-2}$$

$$j_{Sz1km} := F_{1m} \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{уч}}}\right) \cdot \frac{p_{\text{pair}} \cdot N_{\text{уч}}}{2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{(D_{\text{рот}} + \text{airgap})}{2} \cdot \Delta_i\right]}$$

$$j_{Sz1km} = 822.7 \text{ A} \cdot \text{мм}^{-2}$$

$$j_{Sz2km} := F_{2m} \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{N_{\text{уч}}}\right) \cdot \frac{p_{\text{pair}} \cdot N_{\text{уч}}}{2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{(D_{\text{рот}} + \text{airgap})}{2} \cdot \Delta_i\right]}$$

$$j_{Sz2km} = 751.6 \text{ A} \cdot \text{мм}^{-2}$$

Найденные максимальные значения плотности тока эквивалентных токовых слоев и предположение о гармоническом изменении МДС по окружности зазора позволяют рассчитать плотности тока, которые надо задать на всех участках слоев статора и ротора. Обеспечить пространственный сдвиг по угловой координате между МДС статора и ротора (в рассматриваемом примере 164,9 эл. град., что равно 82,5 простр. град.) можно, объеди-

нив все элементы, относящиеся к ротору в одну группу и затем выполнив поворот этой группы элементов с помощью опции *edit – move – rotation*.

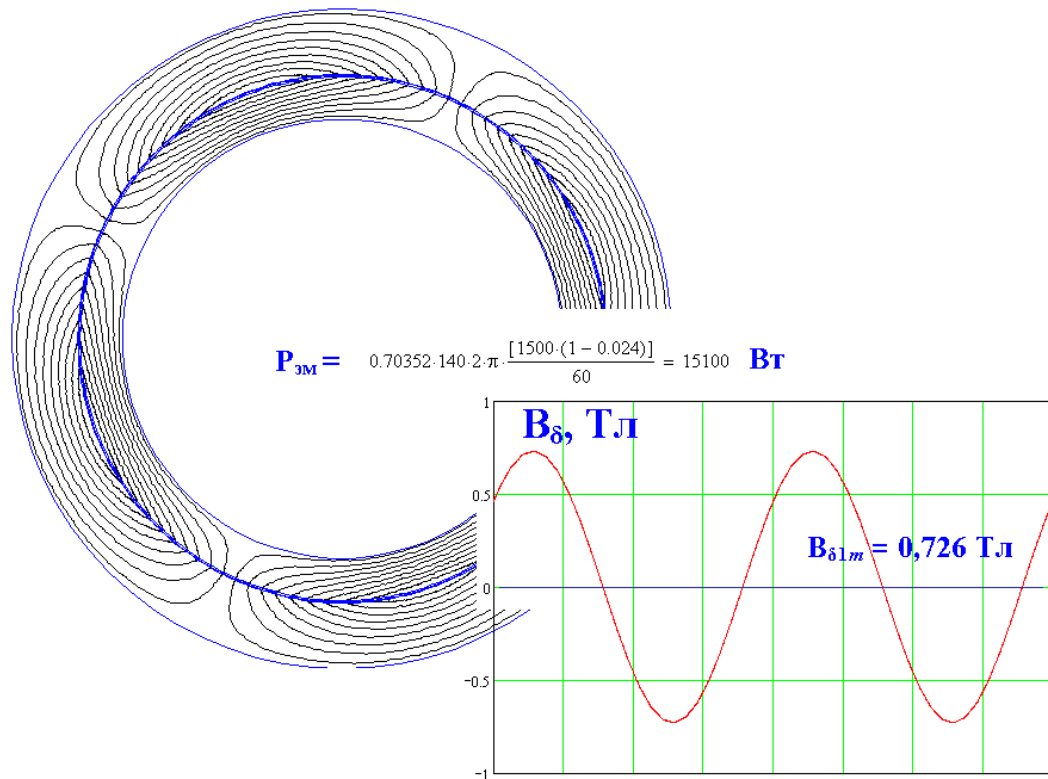


Рис. 11. Картина поля, полученная на конечно-элементной модели с гладкими цилиндрическими сердечниками с относительной магнитной проницаемостью, равной 10000, и электромагнитная мощность, рассчитанная по моменту, найденному по максвелловским натяжениям. МДС статора и ротора воспроизводятся гармоническими токовыми слоями, каждый из которых состоит из 24 участков на периоде (по 48 участков на окружности зазора).

На рис. 11 показано распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя при номинальном режиме работы и картина поля в его поперечном сечении. Результаты получены на конечно-элементной модели с гладким зазором, увеличенным в $k_\delta k_\mu$ раз, где k_μ - коэффициент насыщения магнитной цепи, определенный как отношение суммарной МДС цепи к магнитному напряжению воздушного зазора, равный 1,46 (взято из примера расчета). Как видно из этого рисунка, и значение амплитуды индукции основной гармоники, и электромагнитная мощность, рассчитанная по определенному на модели электромагнитному моменту, весьма близки к

расчетным значениям. Заметим, что, поскольку при расчете магнитной цепи (в примере расчета в [1]) падения магнитных напряжений в ярмах статора и ротора учитываются, относительные магнитные проницаемости стальных участков на конечно-элементной модели заданы большими (10000). Это означает, что область поля на модели вообще можно уменьшить до кольцевой полосы, воспроизводящей приведенный (эквивалентный) воздушный зазор, на границах которого заданы условия Неймана.

Конечно-элементные модели с гладкими цилиндрическими сердечниками и с токовыми слоями статора и ротора, представленными тонкими линейными токами

Ниже приводится расчет величин, необходимых для формирования токовых слоев по второму способу. Число точек на окружности сердечника принято равным 360 – каждая точка представляет участок с угловой шириной в один пространственный градус, что для 4-полюсного двигателя соответствует двум электрическим градусам.

Максимальные значения токов на участках слоев шириной в один пространственный градус (два электрических градуса):

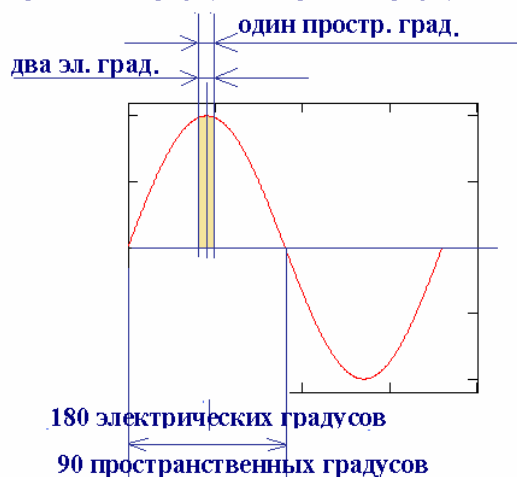


Рис. 12. К определению максимального значения тока в линейном проводе

Максимальные значения токов на участках слоев шириной в 1 градус

$$I_{zkm1} := 2 \cdot \Psi_{1m} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p_{pair}}{360}\right) \quad I_{zkm1} = 66.419 \text{ A}$$

$$I_{zkm2} := 2 \cdot \Psi_{2m} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p_{pair}}{360}\right) \quad I_{zkm2} = 60.675 \text{ A}$$

Lua-сценарий формирования конечно-элементной модели с равномерным зазором асинхронного двигателя, размеры и параметры которого определены выше, приведен в Приложении. Предполагается, что линейные токи, воспроизводящие МДС статора и ротора, заданы в точках, расположенных вблизи поверхностей сердечников и отстоящих друг от друга на расстояния, соответствующие половине пространственного градуса (по 720 линейных токов в каждом токовом слое).

Электромагнитный момент, определенный на модели, сформированной по приведенному *Lua*-сценарию, равен 0,6971, что менее чем на один процент отличается от значения момента, определенного на модели, в которой МДС обмоток статора и ротора представлены токовыми слоями, состоящими из 24 участков с постоянной плотностью тока на каждом из них.

Программа работы

Выполняются пункты, указанные преподавателем. Выполнение пунктов, не указанных преподавателем, не возбраняется и приветствуется.

1. Для заданного типоразмера асинхронного двигателя построить с помощью программы *FEMM* конечно-элементную модель поперечного сечения. Необходимые данные взять из таблиц справочника по серии 4А, имеющегося на сайте кафедры электромеханики. Рекомендуется кроме необходимых данных (список их приведен в Приложении) выписать и все другие данные, относящиеся к моделируемому двигателю.

2. Рассчитать мгновенные значения токов пазов статора и ротора и плотности тока на участках пазов, соответствующие номинальной нагрузке двигателя в момент времени, когда ток в фазе $AХ$ равен максимальному. Смоделировать магнитное поле при рассчитанных плотностях пазовых токов.

3. Поочередно задавая не равными нулю токи только одного сердечника, найти магнитные оси обмоток статора и ротора. Поворотом роторной части модели добиться того, чтобы угол между магнитными осями обмоток был равен рассчитанному углу между векторами тока статора и приведенного тока ротора. Относительную магнитную проницаемость сердечников в этих расчетах можно принять постоянной. При выполнении этого пункта для определения угла между магнитными осями полей, созданных обмотками статора и ротора по отдельности, рекомендуется воспользоваться гармоническим анализом.

4. Рассчитать величины, необходимые для формирования идеализированных (с равномерным воздушным зазором) конечно-элементных моделей исследуемого асинхронного двигателя

5. Сформировать модель с равномерным воздушным зазором и с двумя токовыми слоями, представленными соприкасающимися отрезками кольца с заданными на них плотностями токов. Смоделировать поочередно магнитные поля статора, ротора и результирующее поле. С помощью гармонического анализа оценить точность модели. Моделирование провести для минимального зазора, зазора, приведенного с учетом зубчатости сердечников (с помощью коэффициента Картера) и для зазора, учитывающего как зубчатость сердечников, так и насыщение зубцовых зон статора и ротора.

6. Выполнить то же, что и в п. 5, но для моделей, в которых МДС обмоток представлены гармоническими токовыми слоями в виде ряда линейных («узловых») токов. Рекомендуется воспользоваться *Luia*-сценарием, приведенным в Приложении.

7. Составить отчет по работе, сделав выводы по каждому из выполненных пунктов. Подготовить презентацию к защите лабораторной работы.

Таблица вариантов задания

Вариант	Типоразмер двигателя
1	4A112M2Y3
2	4A132S4Y3
3	4A160S2Y3
4	4A112M4Y3
5	4A160M4Y3
6	4A180S4Y3
7	4A160M2Y3
8	4A180M2Y3
9	4A132S6Y3
10	4A132M6Y3

Приложения

1. Список данных, необходимых для формирования моделей

В скобках приведены обозначения величин, использованные в таблицах справочника по серии 4A.

- номинальная мощность ($P_{2\text{ном}}$)
- номинальное линейное напряжение ($U_{1\text{л}}$)
- номинальный КПД
- номинальный коэффициент мощности ($\cos\varphi_{\text{ном}}$)
- параметры Г-образной схемы замещения:
 - главное индуктивное сопротивление (X_{μ})
 - активное сопротивление обмотки статора (R'_1)
 - индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора (X'_1)

- активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (R''_2)
- индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора (X''_2)

Примечание: для того чтобы можно было воспользоваться расчетными формулами, приведенными в описании лабораторной работы, по параметрам Г-образной схемы замещения следует найти параметры Т-образной схемы замещения.

- внешний диаметр сердечника статора (D_{a1})
- диаметр расточки статора (D_{i1})
- активная длина машины (l_1)
- зазор (δ)
- число пазов статора (Z_1)
- число пазов ротора (Z_2)
- размеры пазов статора и ротора:
 - ширина верхней части паза (b_1)
 - ширина паза у дна (b_2)
 - глубина паза (h)
 - глубина шлица (e)
 - раскрытие паза (m)
- шаг обмотки по пазам (y)
- число эффективных проводов в пазу ($S_{\text{п}}$)
- число элементарных проводов в одном эффективном (n)
- число параллельных ветвей (a)
- диаметр голого провода (d)
- диаметр изолированного провода (d')
- обмоточный коэффициент ($k_{\text{об}}$)

2. Текст Lua-сценария формирования модели с равномерным зазором и с обмотками, представленными токовыми слоями, расположенными на поверхностях сердечников. МДС обмоток эквивалентируются системами равномерно распределенных по окружности зазора тонких линейных токов.

--Создание и сохранение *fem*-файла, создание *txt*-файлов для записи результатов моделирования

```
create("c:\\MyFEMMfiles\\IM 15 kW_two_layers_current points.fem",0)
mi_saveas("c:\\MyFEMMfiles\\IM 15 kW_two layers_current points.fem")
mi_probdef(0,"millimeters","planar",1e-8,1,20)
outfile1 = "c:\\MyFEMMfiles\\IM 15 kW_two layers_current points_Bdlt.txt"
---handle=openfile(outfile1,"w")
outfile2 = "c:\\MyFEMMfiles\\IM 15 kW_two layer_current points_Trq.txt"
---handle=openfile(outfile2,"w")
```

--Задание имени и свойств среды области задачи:

```
mi_addmaterial("air")
mi_addmaterial("iron_10000",10000,10000)
```

--Исходные данные

--Число пар полюсов, внутренний и внешний радиусы сердечников, реальный зазор между сердечниками, коэффициенты для расчета приведенного зазора, толщина токового слоя:

```
ppair=2
rinner=92--- мм
k_dlt=1.22
k_mu=1.46
airgap=0.5* k_dlt * k_mu--- мм
router=rinner+airgap--- мм
dlt_i=airgap*0.15--- мм
```

--Угол между токовыми слоями:

```
alpha_inner_outer=164.9/ppair--- простр. град.
```

--Амплитуды узловых токов, соответствующие основным гармоникам МДС:

```
Imax_inner=60.675/2---- A
```

$I_{max_outer}=66.418/2$ --- A

---Число линейных токов в токовом слое:

$N_i=360*2$

---Печать в консоль некоторых исходных данных:

```
print ("Imax_inner", Imax_inner)
print ("Imax_outer", Imax_outer)
print ("alphainner_outer", alphainner_outer)
```

--Графические построения

--Начало координат и точки для построения окружностей:

```
-----mi_addnode(0,0)
mi_addnode(-rinner,0)
mi_addnode(rinner,0)
-----mi_addnode(rinner+dlt_i,0)
-----mi_addnode(-rinner-dlt_i,0)
mi_addnode(rinner+airgap*0.5,0)
mi_addnode(-rinner-airgap*0.5,0)
mi_addnode(rinner+airgap,0)
mi_addnode(-rinner-airgap,0)
```

--Окружности:

--Окружность внутреннего сердечника:

```
mi_addarc(rinner,0,-rinner,0,180,1)
mi_addarc(-rinner,0,rinner,0,180,1)
```

--Окружность - средняя линия зазора:

```
mi_addarc(rinner+airgap*0.5,0,-rinner-airgap*0.5,0,180,1)
mi_addarc(-rinner-airgap*0.5,0,rinner+airgap*0.5,0,180,1)
```

--Окружность внешнего сердечника:

```
mi_addarc(rinner+airgap,0,-rinner-airgap,0,180,1)
mi_addarc(-rinner-airgap,0,rinner+airgap,0,180,1)
```

--Метки блоков, выбор меток, назначение свойств блоков:

```
mi_addblocklabel(-rinner-airgap*0.6,0)
```

```

mi_selectlabel(-rinner-airgap*0.6,0)
mi_setblockprop("air",0,airgap*0.2)
mi_clearselected()
mi_addblocklabel(-rinner-airgap*0.03,0+0.5)
mi_selectlabel(-rinner-airgap*0.03,0+0.5)
mi_setblockprop("air",0,airgap*0.2)
mi_clearselected()

```

--Объявление массивов узловых токов:

```

a_inner = { }
a_outer = { }

```

--- Задание максимального порядка (номера) гармоники (в этом варианте сценария предполагается моделирование только поля основных гармоник МДС статора и ротора):

```

-----nu_max=90
nu_max=1

```

--Вычисление узловых токов как сумм токов в узлах от нечетных гармоник:

--Узловые точки – через полградуса:

```

for i=1,Ni+1 do
  sum_nu_inner=0
  sum_nu_outer=0

```

--Вложенный цикл – по номерам гармоник:

```

-----          for nu=1,nu_max do
--Номера нечетных гармоник (с учетом полюсности):

```

```

-----          nu_odd=(nu*2-1)*ppair

```

--Коэффициент уменьшения амплитуды гармоники:

```

-----          C_j_nuodd=(sin(0.5*nu_odd))/((3.14159/360)*nu_odd)
-----C_j_nuodd=1

```

--Суммирование в узлах токового слоя:

```

---          sum_nu_inner=sum_nu_inner+1*(Imax_inner*C_j_nuodd*cos((i-1)*nu_odd))
---          sum_nu_outer=sum_nu_outer+1*(Imax_outer*C_j_nuodd*cos((i-1)*nu_odd))

```



```

----sum_nu_inner=sum_nu_inner+1*(Imax_inner*1*cos((360/Ni)*(i-1)*nu_odd))
----sum_nu_outer=sum_nu_outer+1*(Imax_outer*1*cos((360/Ni)*(i-1)*nu_odd))

sum_nu_inner=sum_nu_inner+1*(Imax_inner*1*cos((360/Ni)*(i-1)*ppair))
sum_nu_outer=sum_nu_outer+1*(Imax_outer*1*cos((360/Ni)*(i-1)*ppair))

```

```

a_inner[i] = sum_nu_inner
a_outer[i] = sum_nu_outer

```

```

--Окончание внутреннего цикла:

```

```

----- end

```

```

--Окончание внешнего цикла:

```

```

end

```

```

--Объявление массива имен узлов токового слоя:

```

```

propname_inner = {}
propname_outer = {}

```

```

--Цикл присвоения имен узлам токового слоя:

```

```

for i=1,Ni+1 do
  ---Именем узла является его номер, записанный в строковом формате:
  propname_inner [i] = tostring(i)
  propname_outer [i] = tostring(i+Ni)
end

```

```

--Графическое построение узлов токового слоя:

```

```

mi_addnode (-rinner-airgap*0.01,0)-----
mi_selectnode(-rinner-airgap*0.01,0)-----
mi_addnode (-rinner-airgap*0.99,0)-----
mi_selectnode(-rinner-airgap*0.99,0)-----
mi_copyrotate (0,0,360/Ni,Ni-1,0)
mi_zoomnatural()

```

```

--Цикл присоединения к именам узлов рассчитанных значений токов:

```

```

for i=0,Ni-1 do
  mi_addpointprop (propname_inner [i+1], 0, 0, a_inner [i+1], 0)
  mi_addpointprop (propname_outer [i+1], 0, 0, a_outer [i+1], 0)
end

```

--Цикл присвоения построенным узлам токового слоя имен (вместе с присоединенными к ним значениями токов) и отнесение узлов к группам:

```
for i=0,Ni-1 do
  x_inner=(-rinner-airgap*0.01)*cos((360/Ni)*(i+1))-----
  y_inner=(rinner+airgap*0.01)*sin((360/Ni)*(i+1))-----
  mi_selectnode(x_inner, y_inner)
  mi_setnodeprop (propname_inner [i+1], 7)
  mi_clearselected ()
  x_outer=(-rinner-airgap*0.99)*cos((360/Ni)*(i+1))-----
  y_outer=(rinner+airgap*0.99)*sin((360/Ni)*(i+1))-----
  mi_selectnode(x_outer, y_outer)
  mi_setnodeprop (propname_outer [i+1], 8)
  mi_clearselected ()
end
mi_zoomnatural()
```

--Выделение группы элементов, подлежащих повороту и поворот ее на заданный угол:

```
mi_selectgroup(7)
mi_moverotate(0,0,alpha_inner_outer)
mi_zoomnatural()
```

--Во внутренней области зададим сталь с $\mu_{\text{ir}}=10000$ (нет команды для No mesh)

```
mi_addblocklabel(-rinner*0.2,0)
mi_selectlabel(-rinner*0.2,0)
mi_setblockprop("iron_10000",0,3)
mi_clearselected()
```

--Решение

```
mi_analyze()
mi_loadsolution()
```