

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕНТИЛЬНЫХ ИНДУКТОРНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Запропоновано методику розрахунку вентильних індукторно-реактивних двигунів, що враховує зміну напруги на конденсаторі випрямляча, коливання моменту, насичення магнітопроводу, збільшення магнітного потоку в спинках статора й ротора при парній комутації, з елементами оптимізації магнітопроводу, з використанням деталей і вузлів, що виготовляють для, асинхронних двигунів.*

*Предложена методика расчета вентильных индукторно-реактивных двигателей, учитывающая изменение напряжения на конденсаторе выпрямителя, колебания момента, насыщение магнитопровода, увеличение магнитного потока в спинках статора и ротора при парной коммутации, с элементами оптимизации магнитопровода с использованием изготавливаемых деталей и узлов асинхронных двигателей.*

### ВВЕДЕНИЕ

Вентильные индукторно-реактивные двигатели надежны в эксплуатации, имеют высокий пусковой момент, высокий коэффициент полезного действия. Это определяет целесообразность их использования в промышленности, особенно при необходимости регулировки скорости. У вентильных индукторно-реактивных двигателей [1] могут быть различными числа фаз и зубцов статора и ротора, а также числа полюсов в фазе и схемы соединения обмоток и различные схемы коммутаторов [2]. Геометрия сердечников, обмоточные данные, свойства используемых материалов оказывают существенное влияние на параметры и характеристики двигателя. Все это делает задачу проектирования вентильных индукторно-реактивных двигателей очень сложной и трудоёмкой. Существует много различных методик и программ расчета вентильных индукторно-реактивных двигателей не увязанных с производственными узлами, деталями и технологическими процессами. Например [7-10]. Цель статьи состоит в том, чтобы развить методику проектирования вентильных индукторно-реактивных двигателей, максимально адаптировав её к типовым существующим производственным конструкциям узлов и деталей и технологическим процессам и описать созданную программу для её реализации.

### РАСКРОЙ ЛИСТОВ СТАТОРА И РОТОРА

Для снижения затрат по подготовке производства вентильных индукторно-реактивных двигателей рекомендуется наружный диаметр статора принимать таким же как в соответствующей высоте оси вращения у асинхронных двигателей. Величины наружных диаметров в зависимости от высоты оси вращения приведены в табл. 1.

Таблица 1

$H, \text{мм}$	56	63	71	80	90	100	112
$D, \text{мм}$	89	110	116	131	149	168	186
$\delta, \text{мм}$	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,3	0,3
$P, \text{кВт}$	0,12	0,25	0,55	1,1	2,2	3	4

Продолжение таблицы 1.

$H, \text{мм}$	132	160	180	200	225	250	280
$D, \text{мм}$	210	260	295	327	368	420	480
$\delta, \text{мм}$	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,7
$P, \text{кВт}$	7,5	18,5	22	37	45	55	90

Для получения максимально высоких энергетических характеристик величина воздушного зазора вентильных индукторно-реактивных двигателей должна быть как можно меньшей. Но исходя из технологических возможностей она для каждой из высот вращения не может быть меньше тех величин, которые можно обеспечить на существующем оборудовании. На асинхронных двигателях с числом полюсов 8 и более величины зазора обусловлены технологическими возможностями и они больше величин, при которых имеют место наиболее высокие энергетические характеристики. Следовательно, для вентильных индукторно-реактивных двигателей должны быть приняты величины зазоров  $\delta$  восьмиполюсных асинхронных двигателей [11] (табл. 1).

При принятых наружном диаметре и величине воздушного зазора необходимо выбрать такие геометрические размеры листов статора и ротора, при которых будут наилучшими энергетические показатели двигателя. Прежде всего, следует выбрать соотношение чисел зубцов ротора и статора. С одной стороны, чем больше число зубцов статора, т.е. чем больше число фаз тем меньше величина пульсаций момента, с другой стороны чем больше число зубцов и статора и ротора, тем выше частота изменения магнитного потока и тем больше величина потерь в стали.

Материалы многочисленных публикаций по вентильным индукторно-реактивным двигателям позволяют заключить, что наиболее широко используется соотношение между числами и зубцов статора и ротора 8/6. Также, часто применяются трехфазные и четырехфазные двигатели с удвоенным числом зубцов статора и ротора 12/8 и 16/12 (четырёхполюсные двигатели). В этих двигателях магнитный поток проходит через воздушный зазор не 2 (как в двигателях не с удвоенным числом зубцов), а 4 раза. Это обуславливает необходимость увеличения намагничивающей силы обмотки, что ухудшает энергетические характеристики. Кроме того, удвоение числа зубцов приводит, при неизменной скорости вращения, к удвоению частоты изменения магнитного потока и соответствующему увеличению потерь в стали и в силовых элементах коммутатора.

При выбранном соотношении чисел зубцов опделение геометрических размеров базируется на получении максимальной энергии магнитного поля в

воздушном зазоре [3,4] либо максимального магнитного потока, приходящегося на единицу намагничивающей силы.

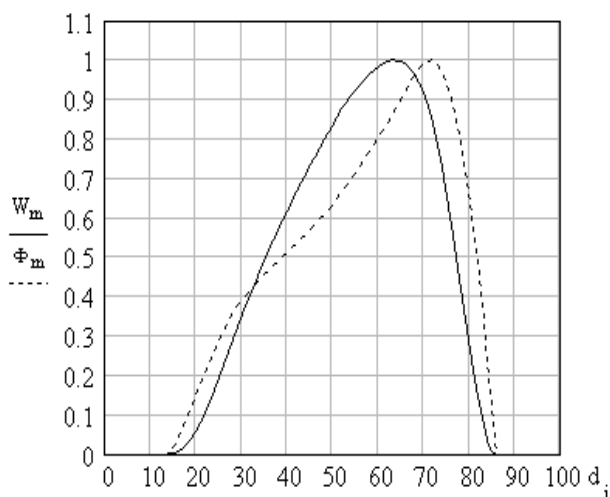


Рис. 1. Относительные зависимости энергии магнитного поля в воздушном зазоре (сплошная кривая – за базовую единицу принята максимальная энергия) и магнитного потока (пунктирная кривая – за базовую единицу принят максимальный магнитный поток) от диаметра расточки статора при наружном диаметре статора 131 мм

Как видно из рис. 1, диаметр расточки статора, соответствующий максимальной энергии магнитного поля – 63 мм в зазоре меньше диаметра, соответствующего максимальному магнитному потоку приходящемуся на единицу намагничивающей силы - 72 мм. Окончательный выбор критерия раскроя определяется результатами электромагнитного расчета. При диаметрах расточек, соответствующих вышеприведенным критериям были посчитаны двигатели на 6000 об/мин мощностью 1,5 и 132 кВт с соотношением чисел пазов статора и ротора 8/6 (табл. 2).

Таблица 2

$P_2$ кВт	$D_n$ мм	$d_i$ мм	$L$ мм	$I$ А	$\eta$ %	$G_a$ кг	$G_m$ кг
1,5	131	64	100	3,308	83,3	8,135	0,894
<b>1,5</b>	<b>131</b>	<b>71</b>	<b>100</b>	<b>3,146</b>	<b>84,8</b>	<b>8,496</b>	<b>0,688</b>
132	480	239	247	267	93	301	54,57
<b>132</b>	<b>480</b>	<b>310</b>	<b>242</b>	<b>229</b>	<b>95,8</b>	<b>300</b>	<b>10,73</b>

В табл. 2 выделены данные, полученные на раскрое по критерию максимального магнитного потока в расточке при предельно допустимой плотности тока в обмотке  $j = 6 \text{ A/mm}^2$ . Из таблицы видно, что именно при использовании этого критерия для раскроя по сравнению с данными, полученными по критерию максимума энергии магнитного поля в зазоре, получается более высокий на  $1,5 \div 2,8\%$  КПД, меньший вес меди на  $23 \div 80\%$  при неизменном заготовительном весе стали, меньший ток на  $4,9 \div 14,2\%$ , удельный момент меньше на  $19,8 \div 40\%$ . На двигателе мощностью 132 кВт ввиду малого количества витков обмотки  $W = 13$  при использовании критерия раскроя по максимуму энергии магнитного поля в воздушном зазоре для получения заданной скорости вращения пришлось пакет сердечника удлинить на 5 мм, т.е. на

2%. Причина указанных различий обусловлена тем, что коэффициент насыщения при раскрое по критерию максимального магнитного потока находится в интервале  $1,1 \div 1,286$ , а при раскрое по критерию максимальной энергии магнитного поля в зазоре  $1,1 \div 3,5$  (рис. 2).

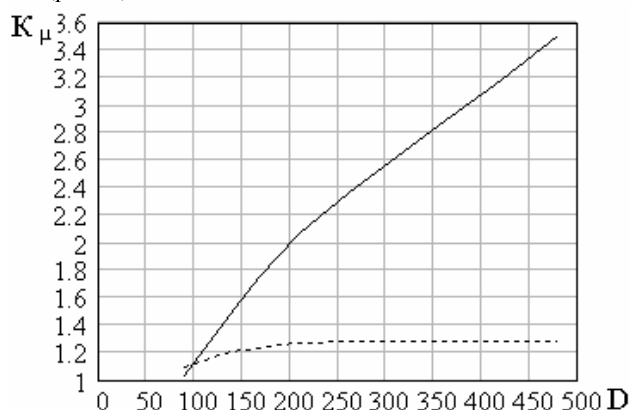


Рис. 2. Зависимость коэффициента насыщения от наружного диаметра сердечника статора раскроенного по критерию максимальной энергии магнитного поля в зазоре – сплошная кривая и по критерию максимального магнитного потока – пунктирная кривая

Это приводит к тому, что для создания соответствующего магнитного потока, для получения максимальной энергии магнитного поля в воздушном зазоре, требуется очень большая намагничивающая сила и большой ток. Причем большая часть намагничивающей силы идет на намагничивание сердечника. При этом магнитная индукция в зазоре и в сердечнике рис. 3 доходит до  $2,25 \text{ Тл}$ , что приводит к полному насыщению стали.

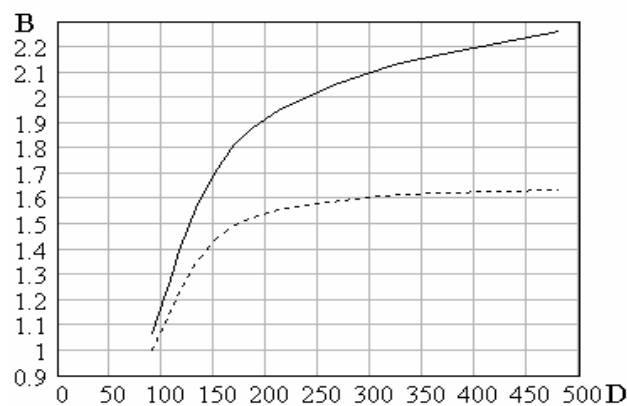


Рис. 3. Зависимость индукции в воздушном зазоре от наружного диаметра сердечника статора раскроенного по критерию максимальной энергии магнитного поля в зазоре – сплошная кривая и по критерию максимального магнитного потока приходящегося на единицу намагничивающей силы – пунктирная кривая

При обеспечении максимального магнитного потока в зазоре, приходящегося на единицу намагничивающей силы индукция в нем не превышает  $1,64 \text{ Тл}$ , что охватывается нормальным диапазоном рабочих индукций стали. Для определения при проектировании диаметра расточки, обеспечивающего максимальный магнитный поток в зазоре предлагается построенная по результатам расчетов зависимость – рис. 4.

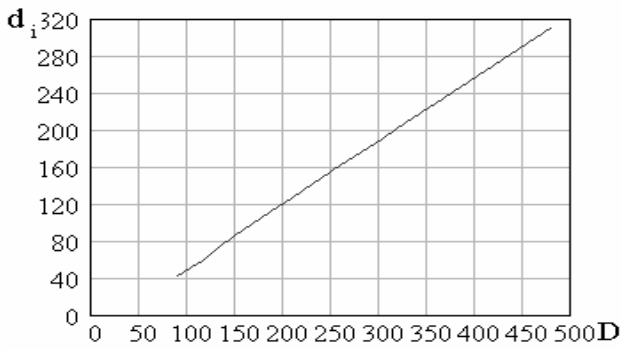


Рис. 4. Зависимость диаметра расточки при максимальном магнитном потоке приходящемся на единицу намагничивающей силы в зазоре от наружного диаметра сердечника статора

Эту зависимость можно представить аналитически:  

$$D_i = 0.681 \cdot D - 16.8. \quad (1)$$

В табл. 1 приведены используемые в настоящее время в серии АИР наружные диаметры сердечника статора. Мощности  $P$  для скорости 3000 об/мин в соответствующих высотах оси вращения указаны по каталогу фирмы Siemens. По данным расчетов вентильных индукторно-реактивных двигателей можно заключить, что для них увязка шкалы мощностей со шкалой установочных размеров по CENEL (Европейский комитет по координации электротехнических стандартов) является более предпочтительной чем по РС3031 (рекомендации СЭВ).

При заданных номинальной мощности  $P_n$  и скорости вращения  $n$  приведенная к скорости 3000 об/мин мощность:

$$P_{пр} = P_n \cdot \frac{3000}{n}. \quad (2)$$

Округлив приведенную мощность до ближайшей табличной, находим по табл. 1 наружный диаметр  $D$  сердечника статора.

Известно [9], что оптимальная ширина зубца ротора

$$b_{z2} = (D_i - 2\delta) \cdot \sin\left(\frac{0.42\pi}{z_2}\right). \quad (3)$$

Для обеспечения максимального значения магнитного потока через зубец статора выбираем максимальное значение центрального угла [3]:

$$\beta_c = \pi / 2 \cdot m, \quad (4)$$

где  $m$  – число фаз двигателя.

И, соответственно, ширина зубца статора

$$b_{z1} = D_i \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4m}\right). \quad (5)$$

При известных величинах (1) – (5) все остальные поперечные размеры определяются по [4]. По наружному диаметру статора рис. 3 определяется магнитная индукция в сердечнике  $B_\delta$  и необходимая намагничивающая сила  $F$ . Номинальный ток:

$$I_n = \frac{P_n}{U \cdot \eta}. \quad (6)$$

Предварительное значение числа витков обмотки

$$W = \frac{F}{I_n \cdot k_I}, \quad (7)$$

где  $k_I$  – коэффициент, учитывающий превышение мак-

симального тока над номинальным, заранее оно неизвестно, начальное его значение можно принять равным 1,3.

Уравнение электрического равновесия обмотки может быть представлено в виде:

$$U = ri + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (8)$$

где  $\Psi$  – потокосцепление;  $r$  – активное сопротивление обмотки.

Падение напряжения на активном сопротивлении в номинальном режиме ничтожно мало и им можно пренебречь. Тогда можно записать

$$\Psi = \int U dt = Ut, \quad (9)$$

т.е. потокосцепление является линейной функцией времени и оно будет максимально в момент отключения обмотки при значении  $\gamma_{off}$  угла поворота ротора в электрических радианах, а включение происходит при значении угла  $\gamma_{on}$ . Время пребывания обмотки во включенном состоянии при заданных углах включения и отключения

$$t_B = \frac{\gamma_{off} - \gamma_{on}}{\omega} = \frac{(\gamma_{off} - \gamma_{on}) \cdot 30}{\pi \cdot N_p \cdot n}, \quad (10)$$

где  $N_p$  – число зубцов ротора.

Таким образом, максимальное потокосцепление

$$\Psi_{max} = U \cdot t_B. \quad (11)$$

Магнитный поток

$$\Phi = \frac{\Psi_{max}}{W}. \quad (12)$$

Длина сердечника

$$l = \frac{\Phi}{b_{z1} \cdot B_\delta \cdot k_{Fe}}, \quad (13)$$

где  $k_{Fe}$  – коэффициент заполнения.

Рассчитанные геометрические размеры сердечников статора и ротора и число витков обмотки завершают перечень исходных данных, необходимых для расчета энергетических характеристик. Расчеты производятся с использованием программы, осуществляющей аппроксимацию кривых намагничивания [6] и решение системы дифференциальных уравнений [5]. При расчете номинального режима в блоке программы решающей системой дифференциальных уравнений в качестве начального условия задается угловая скорость. В результате получаем зависимость  $\omega(t)$  рис. 5.

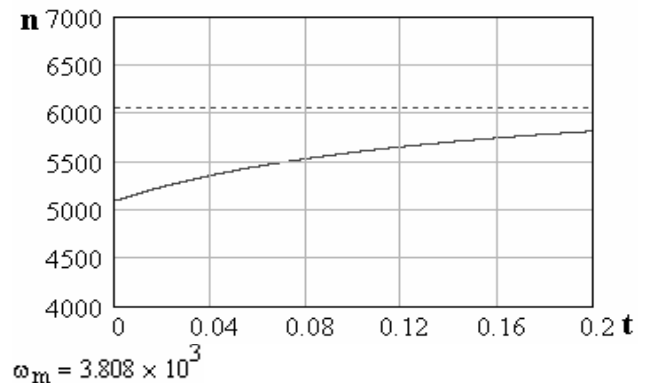


Рис. 5. Зависимость скорости вращения от времени в переходном режиме – сплошная кривая и в установившемся режиме – пунктирная прямая

В нижнем левом углу рисунка программно выводится величина угловой скорости в конечной точке. Если установившийся режим не достигнут, то это новое значение вводится в решающий блок программы и расчет ведется заново. Указанная процедура повторяется до достижения установившегося режима. В установившемся режиме может оказаться, что скорость вращения не соответствует требуемой, указанной в исходных данных. В этом случае в программе выводятся две величины:

$$l_{np} = l \cdot \frac{n}{n_m} \quad (14)$$

- новая длина пакета магнитопровода и

$$W_{pn} = W \cdot \left( \frac{n}{n_m} \right)^a \quad (15)$$

- новое число витков обмотки.  $a = 0,5$  для нормально насыщенного двигателя и  $a=1$  для сильнонасыщенного двигателя. Это объясняется тем, что при неизменном токе обмотки при изменении числа витков нормально насыщенного двигателя соответственно изменяется магнитный поток и изменение потокосцепления обусловлено как изменением магнитного потока, так и числа витков обмотки. На сильнонасыщенном двигателе магнитный поток, практически, не меняется и изменение потокосцепления обусловлено только изменением числа витков. Если в обмотке большое число витков и изменение их относительно предыдущей величины сравнительно мало, то заданием нового числа витков будет получено соответствующее изменение скорости вращения. Если же число витков обмотки мало (у двигателей большой мощности, например 8), а новое число 8,5 то, т.к. число витков не может быть дробным следует принять целое число витков и, следовательно, заданная скорость не будет получена. Формула (15) не учитывает изменение насыщения при изменении числа витков обмотки, поэтому для достижения заданной скорости указанная процедура повторяется несколько раз. Когда заданная скорость достигнута и получены расчетные значения магнитной индукции в зазоре и коэффициента насыщения, которые, как правило, отличаются от ранее определенных, следует изменить длину пакета магнитопровода и число витков обмотки для достижения ранее принятых значений указанных величин.

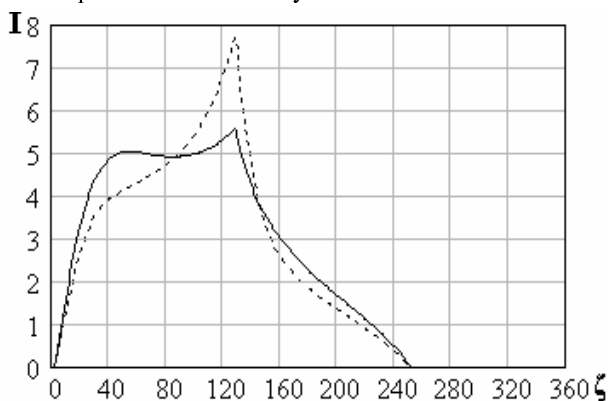


Рис. 6. Зависимость тока обмотки от угла поворота ротора для нормально насыщенного двигателя – сплошная кривая и для сильнонасыщенного двигателя – пунктирная кривая

Как видно из рис. 6. в сильнонасыщенном двигателе максимальное значение тока в 1,42 раза превышает максимальное значение тока нормально насыщенного двигателя. Это превышение может достигать и больших величин, что чревато выходом из строя силовых элементов коммутатора либо их существенным удорожанием. Рост максимального тока обусловлен резким снижением индуктивности обмотки при насыщении рис. 7.

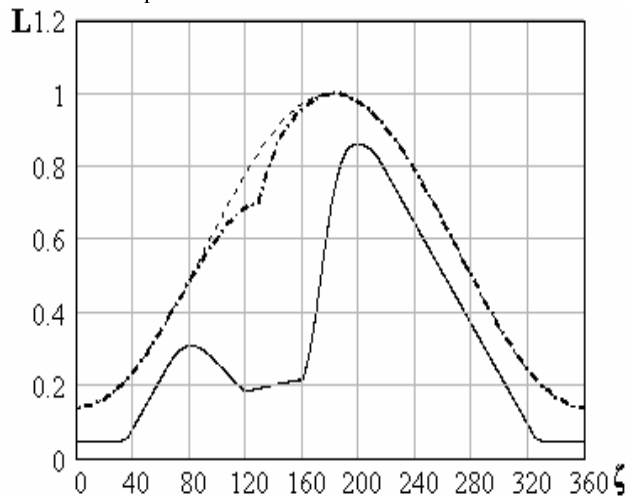


Рис. 7. Характер изменения индуктивности обмотки от угла поворота ротора для ненасыщенной машины – пунктирная кривая, для слабонасыщенной машины – пунктирно-точечная кривая и для сильнонасыщенной машины – сплошная кривая

Скорректированные длина сердечника и число витков рассчитываются по (16), (17):

$$l_{np} = \frac{B_{\delta 1} \cdot K_{\mu 1}}{B_{\delta} \cdot K_{\mu}} \times l, \quad (16)$$

где  $B_{\delta 1}$ ,  $K_{\mu 1}$  – расчетные значения магнитной индукции в зазоре и коэффициента насыщения соответственно, те же величины без 1 в индексе – ранее принятые значения. Отношение коэффициентов насыщения в (16) определяет отношение намагничивающих сил и соответственно чисел витков обмотки, а отношение индукций – изменение магнитных потоков.

$$W_{pn} = W_{pn} \frac{K_{\mu}}{K_{\mu 1}}. \quad (17)$$

Корректировка по (16), (17) позволяет за один шаг получить нужные значения индукции и коэффициента насыщения.

Проведя расчет с откорректированными длиной магнитопровода и числом витков обмотки, представляется возможным произвести уточнение высота спинки статора.

По полученным кривым изменения фазных токов и суммы токов рис. 8 можно задать мгновенные значения фазных токов в точке, где их сумма максимальна. Максимальна сумма токов в точке, в которой максимален ток какой-либо фазы.

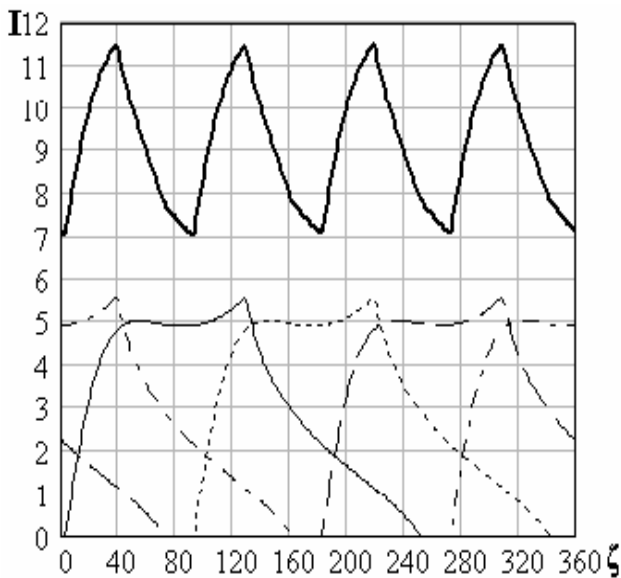


Рис. 8. Зависимость фазных токов и суммарного тока от угла поворота ротора

Токи всех фаз в этой точке определяют соответствующие намагничивающие силы, по которым производится расчет поля (рис. 9 и 10). (Расчет поля может быть произведен с помощью любой из известных программ, например ELCUT, ANSYS, femm и т.п.)

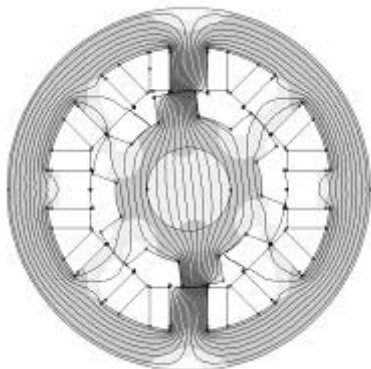


Рис. 9. Расчетная картина поля при встречном включении всех обмоток

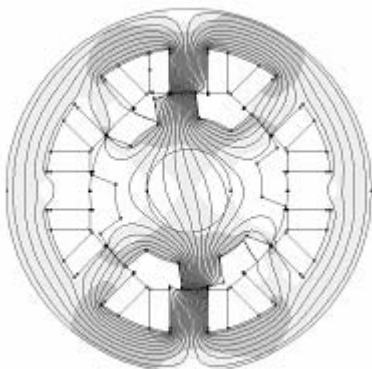


Рис. 10. Расчетная картина поля при согласованном включении обмоток (полюса по окружности чередуются)

По [3] предпочтение следует отдавать согласованному включению обмоток, так как при согласованном включении момент получается больше за счет

суммирования магнитных потоков соседних обмоток. Но это имеет место не всегда, так как с ростом двигательного момента увеличивается и тормозной момент соседней фазы (рис. 10 правая фаза относительно вертикальной оси). На испытанном двигателе, экспериментально, больший момент получен при встречном включении рис. 9). Если расчетная индукция в спинке статора отличается от ранее принятой, то высоту спинки статора необходимо изменить:

$$h_{a1н} = h_{a1р} \cdot \frac{B_{a1н}}{B_{a1р}}, \quad (18)$$

где  $h_{a1р}$  и  $B_{a1р}$  - ранее принятые значения высоты спинки статора и индукции в ней соответственно;  $h_{a1н}$  и  $B_{a1н}$  - значения указанных величин, полученные при расчете поля.

При новом значении высоты спинки статора расчет следует повторить.

После определения окончательных геометрических размеров статора и ротора и обмоточных данных представляется возможным определение оптимальных углов включения, отключения и закорачивания обмотки. Если при совмещении оси зубца статора с осью зубца ротора ток в обмотке на зубце статора не равен нулю, то возникает тормозной момент. Но, учитывая то, что зависимость магнитного потока от угла поворота ротора представляет собой равнобедренный треугольник соблюдение этого условия возможно только при одиночной коммутации с интервалом коммутации тока секции до 90 электрических градусов. При симметричной и несимметричной коммутации и интервале коммутации тока превышающем 90 электрических градусов габаритная мощность двигателя увеличивается. Это обусловлено двумя факторами:

- на участках одновременной работы нескольких фаз увеличивается момент двигателя;
- в определенном интервале углов коммутации, превышающем 90 электрических градусов разность двигательной и тормозной мощностей с ростом интервала коммутации растет, а потом уменьшается.

Произведя расчеты с малым изменением интервала коммутации можно определить его величину, при которой полезная мощность двигателя будет максимальной (рис. 11).

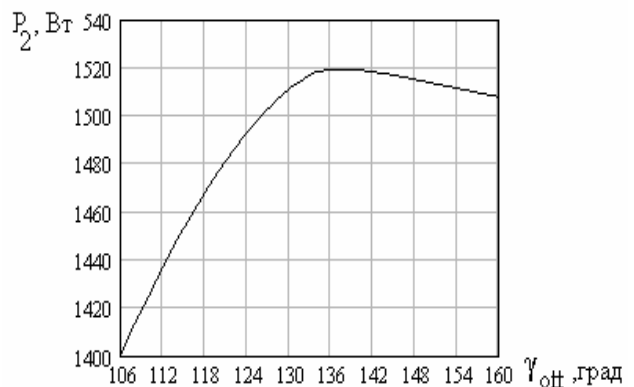


Рис. 11. Зависимость полезной мощности от угла отключения (противовключения) обмотки

Большое влияние на характеристики двигателя оказывает интервал углов коммутации, при котором обмотка находится в закороченном состоянии. На рис. 12 представлены зависимости величины пульсации момента (в % относительно среднего значения) от величины угла закорачивания обмотки и от угла включения обмотки.

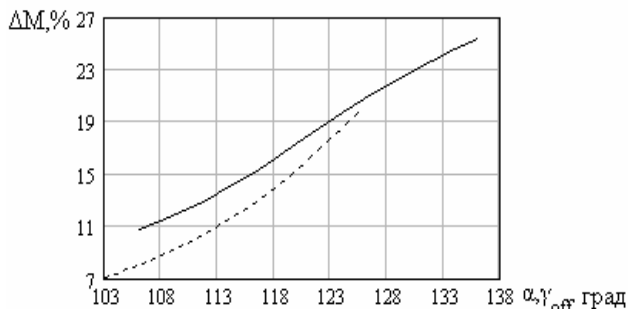


Рис. 12. Зависимость величины пульсации момента двигателя от угла включения обмотки – сплошная кривая и от угла закорачивания обмотки – пунктирная кривая

Подбором угла включения и угла закорачивания обмотки можно существенно снизить пульсации момента. На рис. 13 показан характер изменения момента без закорачивания обмотки – сплошная кривая, при этом пульсация момента составляет 23% и при значении угла закорачивания обмотки 104 электрических градуса (пунктирная кривая) - при этом пульсация момента составляет 7,08%.

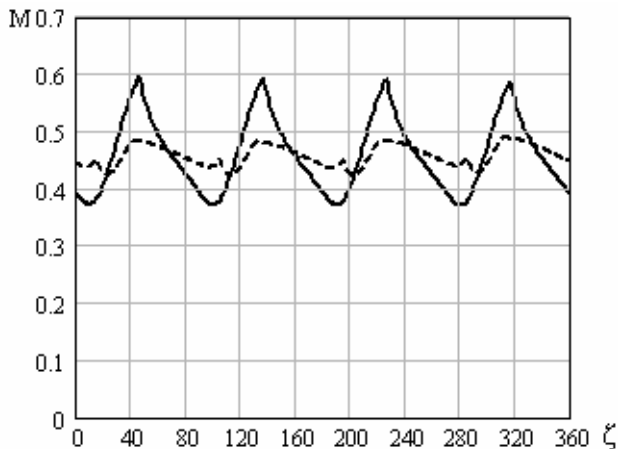


Рис. 13. Характер изменения момента в Нм от угла поворота ротора в электрических градусах при отсутствии закорачивания обмотки (сплошная кривая) и при закорачивании обмотки (пунктирная кривая)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наилучшие энергетические и массогабаритные показатели вентильных индукторно-реактивных двигателей имеют место при раскрое листов статора и ротора по критерию максимального магнитного потока, приходящегося на единицу тока.

Величины воздушных зазоров вентильных индукторно-реактивных двигателей следует принимать по восьмиполюсным асинхронным двигателям соответствующих высот осей вращения.

Оптимальные значения индукции в зазоре и диаметр расточки статора могут быть определены при

этом по рис. 3 и (1) соответственно.

Для вентильных индукторно-реактивных двигателей наиболее целесообразной привязкой мощности к высотам осей вращения является привязка по CENEL.

Предпочтительное подключение обмоток к источнику питания в каждом конкретном случае должно определяться на базе полевых расчетов.

Путем многократных расчетов с малым изменением интервала коммутации могут быть определены оптимальные углы включения, противовключения и закорачивания обмотки из условий получения максимальной габаритной мощности и минимальной пульсации момента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T.J.E. Miller: Optimal Design of Switched Reluctance Motors. - IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 1, February 2002.
2. M. Barnes, C. Pollock: Power Electronic Converters for Switched Reluctance Drives. - IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 6, November 19.
3. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. Санкт-Петербург: 2003. – 149 с.
4. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Раскрой листов магнитопровода вентильных индукторно-реактивных двигателей // Электротехника і електромеханіка. – 2008. - №5. – С. 16-19.
5. Зинченко Е.Е. Математическая модель вентильного индукторно-реактивного двигателя питающегося от выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2009. - №4 – С. 23-28.
6. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Методика аппроксимации кривых намагничивания вентильных индукторно-реактивных двигателей // Электротехніка і електромеханіка. – 2009. - №1. – С. 13 – 16.
7. Мнушкин Ю.В. Вентильный реактивный двигатель с программным формированием выходных характеристик. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. ДонНТУ. Донецк, 2005.
8. Рымша В.В. Математическое моделирование линейных вентильно-реактивных двигателей // Электротехніка і електромеханіка, 2003. - №4. – С. 72 – 76.
9. Ткачук В.І. Електромеханотроніка. – Львів: видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006.- 440 с.
10. A. Matveev, J. Peter van Duijsen: Novel Caspos-based for Multilevel Simulation of Switched Reluctance Drives.
11. Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др. Асинхронные двигатели общего назначения. – М.: Энергия, 1980. – 488 с.

Поступила 26.03.2009

*Зинченко Елена Евгеньевна*

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

*Финкельштейн Владимир Борисович, д.т.н.*

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