

УДК 621.313

С.А.Кудря, докт.техн.наук, Ю.Н.Перминов, канд.техн.наук, В.Ф.Буденный, канд.техн.наук,  
Н.В.Марченко (Ин-т возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

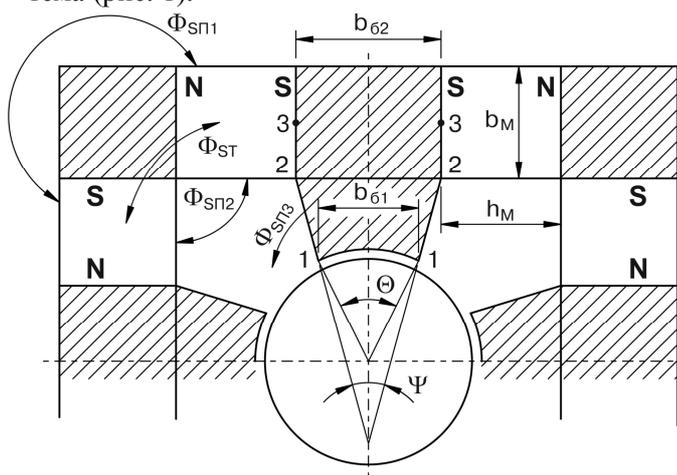
**Оптимизация систем возбуждения электрических машин**

*В статье проведена оптимизация магнитоэлектрических систем по максимуму полезного потока. Описана логическая схема поиска, приведены и проанализированы результаты оптимизации для электрических машин малой мощности.*

*У статті проведено оптимізацію магнітоелектричних систем по максимуму корисного потоку. Описано логічну схему пошуку, наведено і проаналізовано результати оптимізації для електричних машин малої потужності.*

Рассмотрена оптимизация по максимуму полезного потока магнитоэлектрических систем возбуждения двигателей с угловым расположением постоянных магнитов. Описана логическая схема поиска, приведены и проанализированы результаты оптимизации для машин малой мощности.

Одним из факторов повышения быстродействия исполнительных двигателей является обеспечение максимального полезного потока машины ( $p\Phi_\delta$ ). Это возможно за счет рационального выбора типа магнитной системы возбуждения и оптимизации ее геометрии. Анализ ряда магнитных систем [1] показал, что одной из перспективных в этом отношении является угловая магнитная система (рис. 1).



**Рис. 1. Магнитная система с угловым расположением магнитов:**  $b_m$  – ширина половины магнита;  $h_m$  – высота половины магнита;  $b_{\delta 2}$  – средняя ширина полюсного наконечника;  $b_{\delta 1}$  – ширина полюсного наконечника в нижней кромке;  $\theta$  – угол полюсного перекрытия.

Эта конструкция позволяет создать достаточно высокие значения индукции в зазоре  $B_\delta$  и полезного потока, несмотря на наличие внешнего поля рассеяния. Достигается это благодаря лучшему заполнению объема магнитотвердым материалом, а также снижению потока рассеяния с боковых поверхностей полюсных наконечников. Ширина полюсного наконечника в индукторе с угловым расположением магнитов определяется не шириной магнита, а величиной предельно допустимой индукции для магнитомягкого материала. Использование для этих целей сталей с высокой индукцией насыщения позволяет существенно сузить полюсный наконечник, в связи с чем увеличивается длина магнитной силовой линии этой части поля и снижается проводимость путей потоков рассеяния.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы оптимизации угловой магнитной системы.

Критерием оптимальности была принята величина максимума полезного потока машины ( $p\Phi_\delta$ )<sub>макс</sub>, а независимыми переменными – диаметр якоря  $D_a$ , относительный немагнитный зазор  $\delta^*$ , угол полюсного перекрытия  $\theta$ , ширина и высота магнита  $b_m$  и  $h_m$ , ширина полюсного наконечника  $b_{\delta 2}$ .

Выбор в качестве варьируемого параметра угла полюсной дуги был продиктован желанием определить характер и скорость изменения полезного потока с ростом  $\theta$  и установить факторы,

ограничивающие рост полезного потока при снятом ограничении по допустимой ширине коммутационной зоны [2].

Оптимизация проводилась при следующих ограничениях:

- отношение активной длины к наружному диаметру якоря:  $\lambda = \frac{l_a}{D_a} = 4$ ;
- относительное значение диаметра вала под пакетом:  $\frac{d_B}{D_a} = 0,4$ ;
- действительное значение индукции в нейтральном сечении спинки якоря не выше:  $B_{Я'} \leq 2,2$  Тл;
- допустимое значение индукции в наиболее насыщенном сечении полюсного наконечника не выше:  $B_{\delta i} \leq 2,2$  Тл;
- материал ярма якоря – сталь Э43;
- материал полюсного наконечника – сталь 49КФ2ВИ или Э330;
- материал магнита – сплав ЮН15ДК25БА или ЮНДК35Т5БА.

Расчет магнитной системы возбуждения проводился методом последовательных приближений по схеме замещения, представленной на рис. 2.

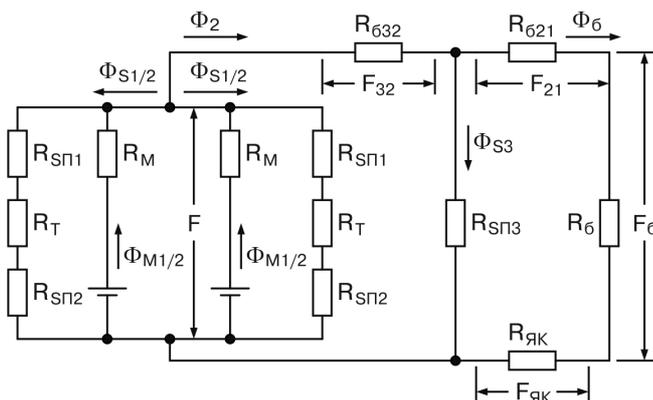


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи двигателя с угловой магнитной системой.

Здесь  $\Phi_{M1/2}$  – магнитный поток в нейтральной половине магнита;  $\Phi_{S1/2}$  – суммарный поток рассеяния с половины магнита;  $\Phi_2$  – поток через сечение полюсного наконечника 2–2 (рис. 1);  $\Phi_{S3}$  –

поток рассеяния с поверхности полюсного наконечника;  $\Phi_{\delta}$  – полезный поток одного полюса.

$R_{S11}$ ;  $R_T$ ;  $R_{S12}$ ;  $R_{S13}$  – соответственно магнитные сопротивления рассеяния: с внешней поверхности половины магнита; с торцов половины магнита; с внутренней поверхности половины магнита; с боковой поверхности полюсного наконечника.

$R_{\delta 32}$ ;  $R_{\delta 21}$  – магнитные сопротивления полюсного наконечника на участках 3–2 и 2–1.

$R_{\delta}$  и  $R_{ЯК}$  – магнитные сопротивления немагнитного зазора и спинки якоря.

$F$ ;  $F_{32}$ ;  $F_{21}$ ;  $F_{\delta}$ ;  $F_{ЯК}$  – намагничивающая сила (НС) магнита, приходящаяся соответственно: на всю внешнюю цепь; на участок 3–2; на участок 2–1; на немагнитный зазор; на якорь.

Выбрав для заданных значений  $D_a$ ,  $\delta^*$  и  $\theta$  начальные значения ширины  $b_m$  и высоты  $h_m$  магнита, а также ширины полюсного наконечника  $b_{\delta 2}$ , задаются предварительно намагничивающей силой магнита  $F$  и определяют поток  $\Phi_M$  в его нейтральном сечении.

Вычитая последовательно из потока в нейтральной уходящие потоки рассеяния, определяют индукцию, напряженность магнитного поля и падение НС на всех участках магнитной цепи. Расчет варианта считается законченным, если НС, создаваемая магнитом, соответствует сумме падений НС на отдельных участках. В этом случае подсчитываются масса и габаритные размеры индуктора. Затем индукция в зазоре данного варианта сравнивается с предыдущим значением, и в случае, если скорость нарастания  $B_{\delta}$  не превышает 0,005 Тл, осуществляется переход на новые размеры магнита. В противном случае оптимизация заканчивается, и при постоянных величинах  $D_a$  и  $\delta^*$  происходит переход на следующее значение  $\theta$ .

Алгоритм предусматривает проверку уровня индукции в трех сечениях полюсного наконечника (3–3; 2–2; 1–1) и в нейтральном сечении спинки



на высоту спинки якоря (при увеличении  $D_a$  зазор в свету составляет меньшую долю):

$$h_{як} = \frac{D_a - d_B - 2(\delta^* \cdot D_a - \delta_T)}{2},$$

где  $h_{як}$  – высота спинки якоря;  $d_B$  – диаметр вала под пакетом;  $\delta_T$  – зазор в свету (в расчетах принимался  $\delta_T = 0,25 \cdot 10^{-3}$  м).

Введение ограничения по допустимой ширине коммутационной зоны, которое при осуществлении данной оптимизации было снято, приведет, как показывает практика проектирования подобных систем, к некоторому уменьшению целесообразного угла полюсного перекрытия лишь при малых диаметрах якоря ( $D_a \approx 10$  мм), что обусловит некоторое снижение полезного потока и соответствующего значения индукции в зазоре, то есть, функции  $B_\delta = f(D_a)$  станут более пологими, чем представленные на рис. 5.

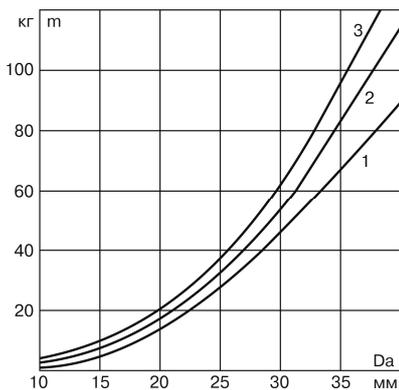


Рис. 6. Зависимость массы угловой магнитной системы от диаметра якоря: 1 –  $\delta^* = 0,075$ ; 2 –  $\delta^* = 0,1$ ; 3 –  $\delta^* = 0,125$ .

При проектировании исполнительных двигателей для быстродействующих высокоточных автономных систем автоматического регулирования важным параметром является не только быстродействие двигателя, но и его масса. Поскольку в быстродействующих малоинерционных двигателях с гладким якорем магнитная система возбуждения обычно составляет до 70% всей массы машины, представляет интерес функциональная связь индукции в зазоре с массой системы. Чем выше индукция в зазоре, тем выше не только быстродействие, но и масса системы  $m$ .

Полученные при оптимизации зависимости  $m = f(D_a)$  для  $\delta^* = const$  и максимальных значе-

ний  $B_\delta$  при соответствующих целесообразных величинах  $\theta$  (рис. 6) показывают, какой "ценой" покупается предельное быстродействие. На рис. 7 представлена зависимость  $B_\delta = f(m)$  для  $D_a = 20$  мм;  $\theta = 0,96 \div 1,135$  рад и трех значений  $\delta^* = 0,075$ ;  $\delta^* = 0,1$ ;  $\delta^* = 0,125$ , которая позволяет оценить уменьшение массы при снижении требуемой величины индукции.

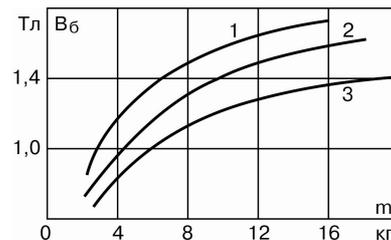


Рис. 7. Зависимость индукции в зазоре  $B_\delta$  от массы угловой магнитной системы: 1 –  $\delta^* = 0,075$  ( $\theta = 1,135$ ); 2 –  $\delta^* = 0,1$  ( $\theta = 0,96$ ); 3 –  $\delta^* = 0,125$  ( $\theta = 0,96$ ).

Представляет интерес проведенное сравнение сталей Э330 и 49КФ2ВИ для полюсных наконечников. Так как колено насыщения стали 49КФ2ВИ находится в области индукции 2,2 Тл, а стали Э330 – в области индукций 1,9-2 Тл, то применение последней приводит к некоторому снижению предельной индукции в зазоре (приблизительно на 6%).

**Выводы.** Таким образом, в результате оптимизации установлено, что в рассмотренном диапазоне диаметров (10÷40 мм) оптимальный угол полюсного перекрытия наконечника угловой системы  $\theta = 0,96 \div 1,1$ . Меньшие значения соответствуют большему относительному зазору.

Определены предельные возможности рассмотренных индукторов по полезному магнитному потоку и индукции в зазоре и соответствующие им значения массы. Это позволяет при проектировании быстродействующего двигателя с подобным индуктором оценить его возможное максимальное быстродействие и целесообразность изготовления или обоснованно выбрать достижимый уровень  $B_\delta$ .

1. Васильев Ю.К. и др. Выбор магнитной системы для быстродействующих исполнительных двигателей постоянного тока. – В сб.: Электромашинные средства автоматики. – Киев: Изд-во Института автоматики, 1975. – С. 12–15.
2. Рубан Н.С. Исполнительные двигатели постоянного тока с гладким якорем малой мощности. – Автор. дис. канд. техн. наук. – Киев: Изд-во КПИ, 1974. – 40 с.