

**ВЫБОР КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБМОТКИ В ЭМУ  
С ГЛАДКИМ ЯКОРЕМ****А. И. Скороспешкин, А. И. Вильнер, Б. И. Костылев**

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Все современные ЭМУ поперечного поля выполняются с компенсацией реакции якоря выходного каскада, так как при существующей величине коэффициента усиления намагничивающая сила обмотки управления мала, а размагничивающее действие реакции якоря при работе на нагрузку весьма значительно и получение более или менее жесткой внешней характеристики без компенсации невозможно.

Компенсационная обмотка в ЭМУ поперечного поля с зубчатым якорем выполняется распределенной, так как при сосредоточенной компенсационной обмотке уменьшение воздушного зазора ограничивается допустимым искажением магнитного потока [1]. Это усложняет конструкцию машины, но позволяет уменьшить величину воздушного зазора и значительно увеличить коэффициент усиления.

При проектировании ЭМУ поперечного поля число витков и распределение компенсационной обмотки выбирается следующим образом: из условий наименьшего магнитного шума и пульсационных потерь в зависимости от шага пазов якоря выбирается шаг малых пазов; расточка статора разбивается на эквивалентные деления так, чтобы каждому малому, среднему и большому пазам соответствовало целое число эквивалентных делений. Число витков компенсационной обмотки на полюс берется

$$W_{\text{кю}} = k_{\text{т}} W_{\text{я}}, \quad (1)$$

где

$W_{\text{я}}$  — число последовательных витков обмотки якоря на полюс,  $k_{\text{т}} = 1,03 \div 1,08$  — коэффициент трансформации, дающий возможность построить компенсационную обмотку на перекомпенсацию.  $W_{\text{кю}}$  распределяется по пазам согласно количеству эквивалентных делений [2].

Рассмотрим распределение компенсационной обмотки более подробно. Намагничивающая сила гладкого якоря имеет форму треугольника (реальная кривая намагничивающей силы якоря зубчатой машины также приводится к гладкому якорю), намагничивающая сила компенсационной обмотки — ступенчатый характер, следовательно, и при настройке единичной компенсации (то есть равенстве площадей этих двух фигур) обязательно имеются некомпенсированные участки. Очевидно, что наилучшее распределение компенсационной обмотки такое, когда амплитуды намагничивающих сил некомпенсированных участков для выбранного числа малых пазов по всей расточке одинаковы. Кроме того, компенсацию целесообразно рассматривать только в зоне частичных и дополнительных полюсов, поскольку воздушный зазор в зоне большого и среднего пазов, по крайней мере, на порядок выше и намагничивающие силы

якоря и компенсационной обмотки будут вызывать там очень малые индукции.

Аналогичным действием малых пазов пренебрегаем, так как раскрытие их невелико, учитываем только увеличение рабочего воздушного зазора коэффициентом Картера.

На рис. 1 показано наложение кривых намагничивающих сил реакции якоря и компенсационной обмотки (с обратным знаком) для  $\frac{\tau}{2}$  с полюсным перекрытием  $\alpha_1=0,6$  и двумя малыми пазами на частичном полюсе ( $N_M=2$ ); ширина дополнительного полюса  $b_d$ .

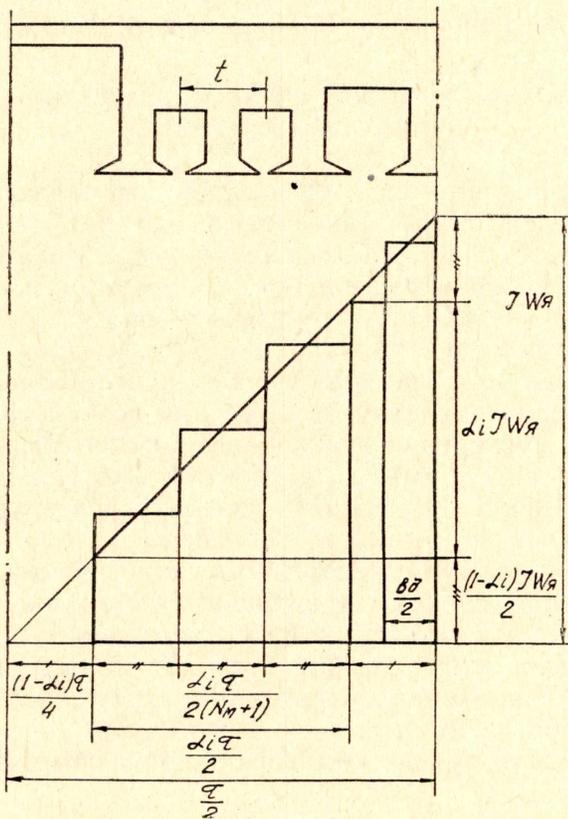


Рис. 1

Как видно, картина эта построена, исходя из вышеприведенных рассуждений.

Рассматривая в этом наложении целую систему подобных треугольников, можем получить величину намагничивающей силы компенсационной обмотки, приходящуюся на каждый паз, общую величину намагничивающей силы компенсационной обмотки и амплитуду пульсаций намагничивающих сил некомпенсированных участков, а приняв ток якоря равным единице, — число витков компенсационной обмотки в каждом пазу. (Расчетные формулы записаны для единичной компенсации, перекомпенсация задается в обычных пределах).

Число витков большого паза

$$W_{KB} = W_{я} \left( 1 - \frac{\alpha_1 N_M}{N_M + 1} \right), \quad (2)$$

Число витков малого паза

$$W_{км} = \frac{W_{я} \cdot \alpha_i}{N_M + 1} \quad (3)$$

Число витков среднего паза

$$W_{кс} = \frac{W_{я}}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_i N_M}{N_M + 1} - \frac{b_d}{\tau} \right) \quad (4)$$

Витки, идущие на создание коммутирующей намагничивающей силы дополнительного полюса, в (4) не подсчитываются. Общее число витков компенсационной обмотки на полюс

$$W_{ко} = \frac{W_{я}}{2} \left( 2 - \frac{b_d}{\tau} \right) \quad (5)$$

Амплитуда пульсаций под частичным полюсом

$$F_{п} = \frac{I \alpha_i W_{я}}{2(N_M + 1)} \quad (a) \quad (6)$$

Амплитуда пульсаций под дополнительным полюсом

$$F_{пд} = \frac{I b_d W_{я}}{2\tau} \quad (a) \quad (7)$$

Как видно, равенство  $W_{ко} = W_{я}$  при  $k_T = 1$ , как это дается в [2], не совсем справедливо. Число витков в среднем пазу, а, следовательно, и общее число витков компенсационной обмотки несколько меньше.

Эффективность витков, лежащих в разных пазах, неодинакова, так как по мере приближения к среднему пазу они охватывают все меньшее сечение магнитопровода.

Коэффициент эффективности среднего паза

$$k_{эс} = \frac{b_d}{b_d + \alpha_i \tau} \quad (8)$$

Коэффициент эффективности малых пазов и большого паза

$$k_{э} = \frac{(N_M + 1)b_d + \alpha_i \tau p}{(N_M + 1)(b_d + \alpha_i \tau)} \quad (9)$$

где  $p = 1, 2, \dots, N_M + 1$ ;  $p = 1$  ближайший к среднему малый паз, а  $p = N_M + 1$  — большой паз.

Из формулы (6) видно, что на амплитуду пульсаций под частичным полюсом, кроме величины тока якоря, влияет коэффициент полюсного перекрытия и количество малых пазов.

При одинаковых  $I$  и  $\alpha_i$  величина пульсаций при распределенной обмотке управления в  $N_M + 1$  раз меньше, чем при сосредоточенной, а число их на частичный полюс в  $N_M + 1$  раз больше.

В усилителе поперечного поля с гладким якорем коммутация исключительно хорошая даже при больших перегрузках, необходимость в дополнительном полюсе отпадает. На рис. 1 нужно рассматривать компенсацию только в зоне частичного полюса, тогда выражения (2) и (3) сохраняются, а (5) приобретает вид

$$W_{ко} = \frac{W_{я}}{2} \left( 1 + \frac{\alpha_i N_M}{N_M + 1} \right) \quad (10)$$

Здесь  $W_{ко}$  уже значительно меньше  $W_{я}$ , а коэффициент эффективности витка определяется отвлеченно от геометрических размеров

$$k_{\text{э}} = \frac{n}{N_{\text{м}} + 1} \quad (11)$$

Если при проектировании ЭМУ с гладким якорем мы задаемся целью получить наименьшие пульсации нескомпенсированных намагничивающих сил, то мы должны выбрать количество малых пазов на частичный полюс примерно таким, как в ЭМУ с зубчатым якорем при равной ширине частичного полюса. Но поскольку обмотка на гладком якоре распределена равномерно, мы не можем ориентироваться на соотношение шагов пазов якоря и статора.

В этом случае определяем суммарную ширину зубцов на частичный полюс

$$b_{z'} = \frac{B_{\delta\varphi} \tau \alpha_i}{B_{z\varphi} k_c}, \quad (12)$$

где  $B_{\delta\varphi}$  и  $B_{z\varphi}$  — максимальная индукция в воздушном зазоре и зубцах статора при заданной форсировке по напряжению.

Принимаем  $B_{z\varphi} = 1,7 \div 1,8$  тл, а ширину зуба  $b_z = 3 \div 4$  мм из условия механической прочности, тогда число малых пазов на частичный полюс равно

$$N_{\text{м}} = \frac{b_{z'}}{b_z} - 1. \quad (13)$$

Дальнейший расчет компенсационной обмотки ведется по формуле (2), (3), (10).

Особенностью ЭМУ с гладким якорем является довольно значительный немагнитный зазор, определяемый, кроме собственно воздушного зазора, диаметром обмоточного провода и изоляцией.

В усилителях с гладким якорем мощностью  $1 \div 2,5$  квт, например, зазор  $\delta = 1,6 \div 2$  мм, тогда как в аналогичных ЭМУ с зубчатым якорем  $\delta = 0,35 \div 0,5$  мм. Следовательно, одинаковые по величине пульсации намагничивающей силы нескомпенсированных участков создадут в ЭМУ с

гладким якорем значительно меньшие пульсации индукции  $B \equiv \frac{F}{\delta}$ , чем в усилителе с зубчатым якорем.

Например, пульсации индукции при одинаковых  $I$  и  $\alpha_i$  в усилителе с зубчатым якорем при  $\delta = 0,4$  мм и  $N_{\text{м}} = 4$  и в усилителе с гладким якорем при  $\delta = 2$  мм и сосредоточенной компенсационной обмотке  $N_{\text{м}} = 0$  равны.

Картина, аналогичная рис. 1, для сосредоточенной компенсационной обмотки дана на рис. 2.

В этом случае число витков компенсационной обмотки на полюс

$$W_{\text{ко}} = \frac{W_{\text{я}}}{2}. \quad (14)$$

В большом пазу

$$W_{\text{кб}} = W_{\text{я}}. \quad (15)$$

Амплитуда пульсаций намагничивающей силы

$$F_{\text{п}} = \frac{I \alpha_i W_{\text{я}}}{2} \text{ (а)}. \quad (16)$$

Отсутствие зубцов на частичных полюсах позволяет гораздо лучше использовать сталь якоря, значительно повысить индукцию в воздушном зазоре, получить в прежнем объеме большую выходную мощность, увеличить форсировку по напряжению, упрощает конструкцию машины, сокращается расход меди на компенсационную обмотку.

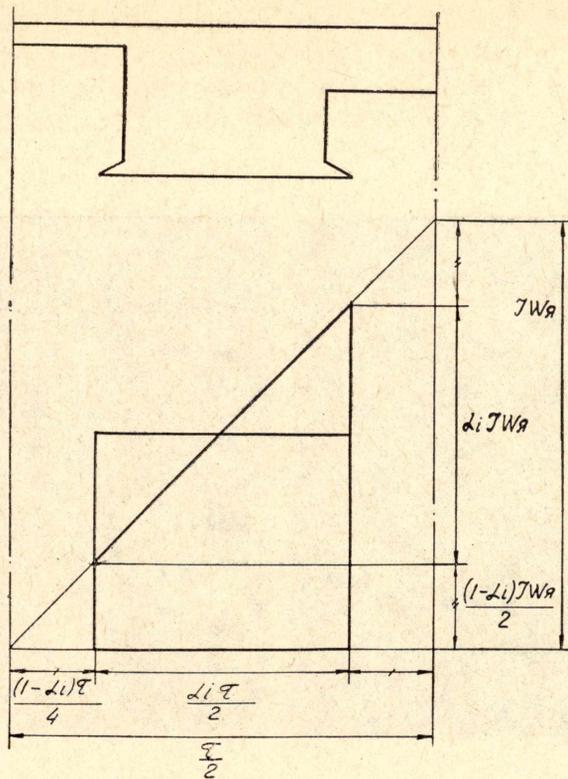


Рис. 2

Существенно отличается характер результирующего поля в воздушном зазоре в случае распределенной компенсационной обмотки (рис. 3 а) и сосредоточенной (рис. 3 б). (Пунктиром показана картина поля в режиме холостого хода усилителя). В первом случае на частичный полюс накладывается  $N_M + 1$  пиков индукции, но наклон кривой индукции сохраняется как при холостом ходе; во втором — наклон кривой на набегающем крае увеличивается, а на сбегающем при достаточно большом токе  $I$  даже изменяет направление, поворачиваясь вокруг центра частичного полюса, но изменяется индукция монотонно без пульсаций.

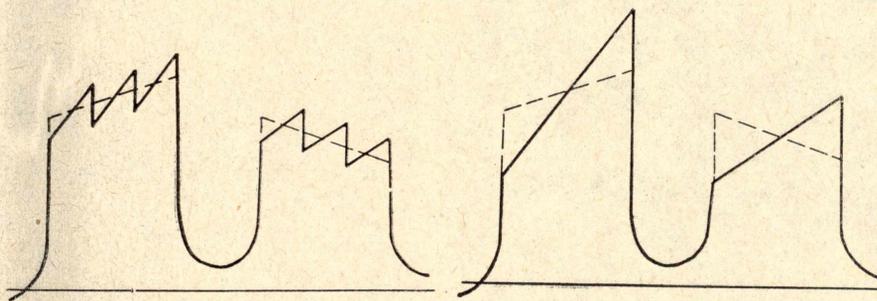


Рис. 3 а

Рис. 3 б

Для проверки влияния распределения компенсационной обмотки на работу ЭМУ с гладким якорем была изготовлена машина с выводами компенсационной обмотки от каждого паза.

При включении компенсационной обмотки, начиная с большого пазы и затем прибавляя по одному малому, настраивалась единичная компенсация и осциллографировалось поле в воздушном зазоре. Ниже приведены осциллограммы:

- рис. 4 — режим холостого хода  $I=0$ ,  
 рис. 5 — распределенная обмотка  $N_M=4$ ,  $I=I_H$ ,  
 рис. 6 — сосредоточенная обмотка  $I=0,25 I_H$ ,  
 рис. 7 — сосредоточенная обмотка  $I=I_H$ .

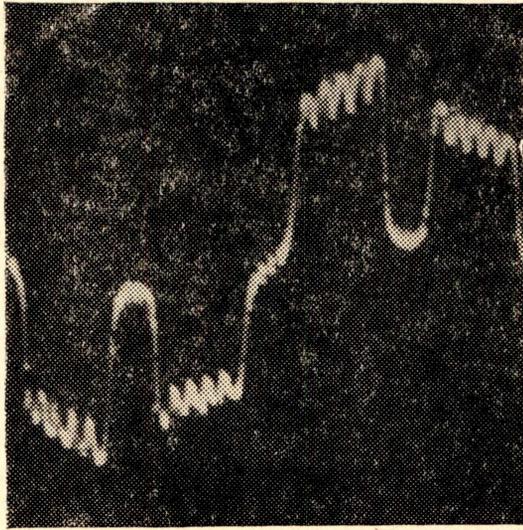


Рис. 4

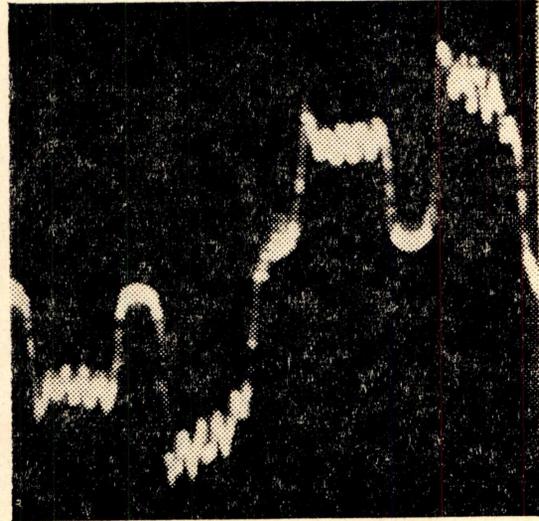


Рис. 5

Как видно, осциллограммы хорошо согласуются с рис. 3 а и 3 б, некоторое несоответствие объясняется не совсем верным распределением витков компенсационной обмотки в экспериментальном усилителе. Одновременно с осциллографированием поля снимались все характеристики усилителя, при разном распределении компенсационной обмотки они практически не менялись. Сохранилась безыскровая коммутация.

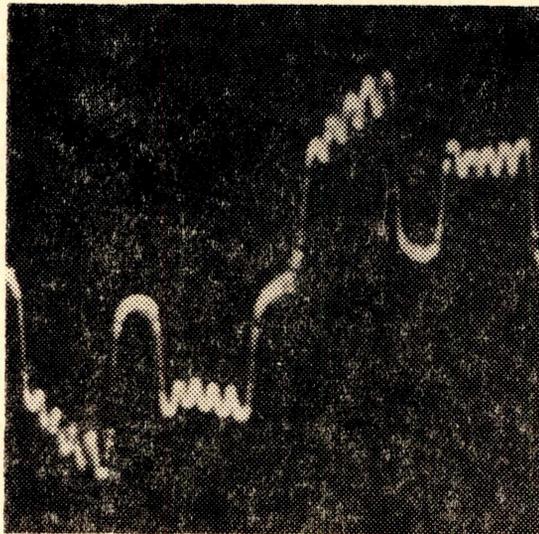


Рис. 6

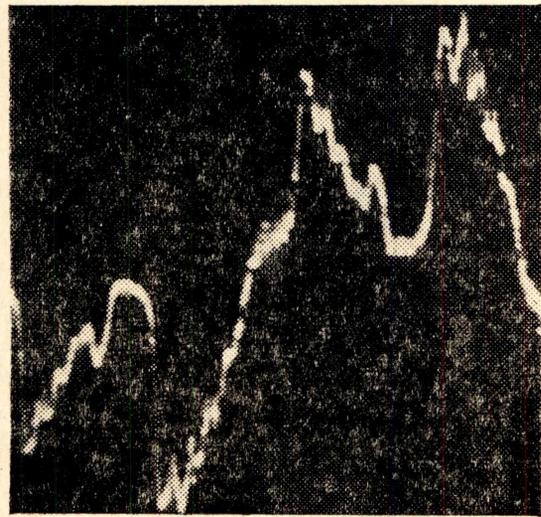


Рис. 7

Результат работы можно сформулировать следующим образом:

1. Получены простые расчетные формулы для определения числа витков и распределения компенсационной обмотки в усилителе поперечного поля с гладким и зубчатым якорем.

2. Усилитель с гладким якорем без ухудшения его характеристик можно изготовлять с сосредоточенной обмоткой. Это позволяет создать ЭМУ более простой конструкции с лучшим использованием стали, более высокой форсировкой напряжения, меньшим расходом обмоточной меди.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Сей. Электромашинные усилители. ГЭИ, 1959.
  2. Ф. А. Горяинов. Электромашинные усилители. ГЭИ, 1962.
-