

ПОТЕРИ ОТ УРАВНИТЕЛЬНЫХ ТОКОВ В МНОГОЖИЛЬНЫХ ОБМОТКАХ БЕСПАЗОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А.Е.Антонов¹, докт.техн.наук, **В.Г.Киреев**², канд.техн.наук, **И.С.Петухов**³, канд.техн.наук,
^{1,2,3} – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Раскрыт механизм возникновения потерь энергии на уравнительные токи в многожильной обмотке беспазовой электрической машины магнитоэлектрического типа. Предложена модель сдвига витков, который происходит при изготовлении обмотки многожильным проводом и приводит к неравенству ЭДС в отдельных проводниках. Разработана методика оценки потерь на уравнительные токи и определены факторы, влияющие на их величину. Приведена зависимость относительной величины потерь от числа витков обмотки. Показано, что отношение потерь на уравнительные токи к электромагнитной мощности электрической машины не зависит от величины магнитной индукции и частоты вращения ротора. Библ. 2, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: беспазовая машина, потери, уравнительные токи.

Введение. Характерной особенностью беспазовых электрических машин магнитоэлектрического типа является отсутствие зубцово-пазовой зоны. Часто статор таких машин выполняется гладким, а на роторе располагается система возбуждения на основе постоянных магнитов. Витки статорной обмотки при этом располагаются непосредственно в воздушном зазоре и во время вращения ротора пересекаются магнитным потоком, создаваемым постоянными магнитами. До недавнего времени такие машины использовались ограниченно ввиду отсутствия высококоэрцитивных магнитных материалов, способных эффективно функционировать в системах с относительно большими немагнитными зазорами. С появлением интерметаллических соединений редкоземельных металлов, способных обеспечить высокую плотность магнитного потока в больших немагнитных зазорах, применение беспазовых магнитоэлектрических систем стало более целесообразным. Использование таких материалов как RCo5 и NdFeB для систем возбуждения позволило создавать электрические машины, которые имеют наилучшие массогабаритные показатели на единицу полезной мощности среди прочих типов электромеханических преобразователей. Вместе с тем, беспазовым компоновкам присущи некоторые свойства, которые необходимо учитывать при построении высокооборотных и весьма мощных электромеханических преобразователей энергии в десятки киловатт и выше.

Одной из главных особенностей беспазовых электрических машин является то, что обмотка в них пронизывается основным магнитным потоком, в то время как в традиционных электрических машинах обмотку, лежащую в пазу, пронизывает только поток пазового рассеивания. Это обстоятельство обуславливает увеличение доли потерь энергии в обмотке. Наряду с джоулевыми потерями от протекания рабочего (якорного) тока в обмотке имеют место потери электромагнитной природы на вихревые и уравнительные токи. Механизм возникновения потерь на вихревые токи в меди обмоточного провода и их связь с параметрами электромеханического преобразователя были подробно рассмотрены в [1]. Для снижения этого вида потерь обмоточный провод выполняют из нескольких параллельных проводников (жил), суммарное сечение которых соответствует требуемой величине тока при допустимой плотности. Технология изготовления такой обмотки предполагает намотку катушек проводом круглого сечения одновременно с нескольких шпиль на шаблон с последующей их формовкой и компаундированием. Число жил в проводе может достигать 1–2 десятков и выше. При намотке таким многожильным проводом (жгутом) отдельные жилы укладываются хаотично и закон их распределения в предоставленном объеме носит случайный характер. В результате ЭДС, возбуждаемые в отдельных проводниках, имеют относительные сдвиги по фазе. Все эти проводники соединены между собой параллельно на зажимах машины, образуя короткозамкнутые контуры, в которых под действием разности ЭДС и возникают токи, называемые уравнительными [2]. Эти токи, циркулируя в короткозамкнутых контурах, оказывают тормозящее воздействие на ротор, вызывая дополнительные затраты энергии на его преодоление.

Устранить уравнильные токи в многожильном проводе можно свивая его перед намоткой катушек. Однако при этом заметно ухудшается коэффициент заполнения обмотки, что отрицательно сказывается на показателях машины. Поэтому в задачу настоящего исследования входили оценка величины потерь от уравнильных токов для более точного их учета в общем балансе мощности и выработка рекомендаций по их минимизации без применения свивки многожильного жгута.

Математическая модель и гипотеза перемешивания проводников. Рассмотрим четыре витка N_w однослойной обмотки беспазовой электрической машины, пространственно распределенных на интервале 2τ и выполненных в виде мягкого жгута высотой h_w и шириной b_w (рис. 1). Будем считать, что магнитное поле бежит вдоль координаты x , а нормальная составляющая магнитной индукции – вдоль координаты y . Жгут будем считать состоящим из N_a параллельных элементарных проводников (жил). В левой катушечной стороне на рис. 1 показано возможное «наползание» одного проводника на другой в пределах жгута, которое может иметь место в реальной обмотке. Для упрощения задачи и выделения только потерь от уравнильных токов сделаем следующие допущения.

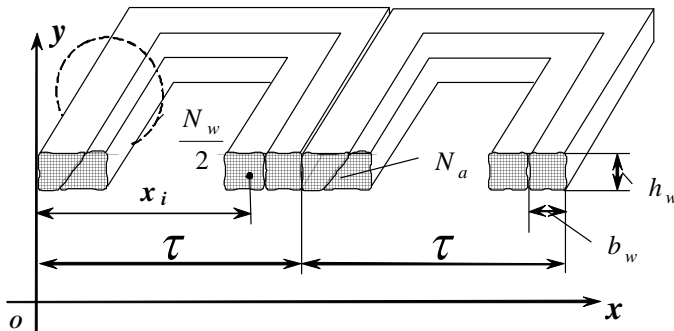


Рис. 1

1. Магнитная индукция в каждой точке воздушного зазора направлена нормально к направлению движения поля, распределена по гармоническому закону вдоль полюсной дуги и постоянна вдоль оси вращения.

2. Кривизной воздушного зазора пренебрегаем.

3. Ток в пределах поперечного сечения каждого элементарного проводника (жилы) распределен равномерно.

4. Внешняя цепь электрической машины имеет бесконечно большое сопротивление (считается разомкнутой для уравнильных токов).

5. Проводники в активной зоне не перемешиваются, перемешивание происходит только в лобовых частях. На первый взгляд, это допущение ограничивает адекватность принимаемой модели. Однако, ввиду того, что часто по технологическим соображениям на каждом полюсном делении укладывается по одному витку (в каждом из которых содержится по две активных стороны), а общее число витков может достигать десятка и более, возможностей для перемешивания в математической модели будет достаточно.

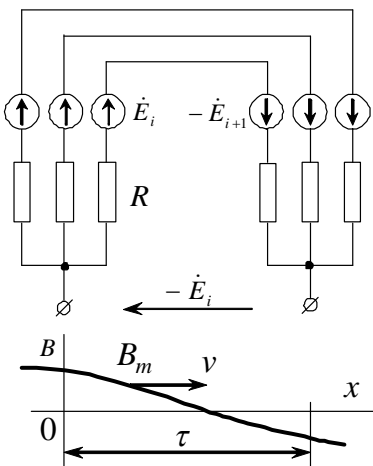


Рис. 2

С учетом сделанных допущений можно составить схему замещения обмотки, которая показана на рис. 2, и для простоты изложения состоит из одного витка, содержащего три жилы. Как показано на рис. 2, бегущая со скоростью v в воздушном зазоре волна нормальной составляющей магнитной индукции с амплитудой B_m наводит в каждом проводнике ЭДС \dot{E}_i , определяемые направлением вектора магнитной индукции и пространственной координатой проводника x_i (рис. 1). Для определения разности потенциалов на выводах обмотки \dot{U} (рис. 2) в соответствии с методом узловых напряжений можно составить уравнение

$$\dot{U} N_a / (2R) = \sum_{g=1}^{N_a} (\dot{E}_i - \dot{E}_{i+1}) / (2R), \quad (1)$$

где R – активное сопротивление части проводника, размещенного в зазоре, g – индекс жилы, i – сквозной индекс по всем активным (лежащим в зазоре) участкам жилы. Вид уравнения (1) показывает, что решение не зависит от сопротивления жилы. В действительности число витков почти всегда больше одного и суммирование ЭДС вдоль каждой жилы должно производиться по всем виткам. В свою очередь, действующие значения ЭДС, входящее в правую часть уравнения (1), определяется через пространственную координату x_i с помощью выражения

$$\dot{E}_i = 1/\sqrt{2} \cdot E_m \cdot e^{j\frac{\pi}{\tau} x_i}, \quad (2)$$

где $E_m = B_m L v$ – ЭДС движения, L – активная длина машины, j – мнимая единица.

ЭДС в жилах \dot{E}_g определяются суммированием вдоль каждой жилы, а токи в них \dot{I}_g – из выражения

$$\dot{I}_g = (\dot{U} - \dot{E}_g) / R, \quad (3)$$

откуда легко найти суммарные потери

$$P_{yp} = \sum_i I_g^2 R. \quad (4)$$

Схема на рис. 2 соответствует случаю идеализированной укладки проводников (без свивания жгута), когда жила с внутреннего радиуса полувитка переходит также на внутренний радиус полувитка (из положения i переходит в положение $i+1$) и т.п. В случае же случайного перемешивания жилы могут лежать в произвольном порядке, в том числе и в разных горизонтальных слоях жгута (вдоль координаты y , рис. 1). Однако предположение о существовании только нормальной составляющей магнитной индукции позволяет упростить задачу. Так, можно показать, что вклад в разность потенциалов на выводах обмотки приносят только проводники с различной пространственной координатой x_i . Этот факт иллюстрируется на рис. 3, где показано, что в однослойной обмотке можно объединить жилы, лежащие в разных слоях многослойной обмотки, не изменяя при этом разности ЭДС ΔE , наводимой в них. Следовательно, жгут проводников, образующий обмотку, можно считать состоящим из N_a параллельных ветвей, каждая из которых характеризуется своей пространственной координатой x_i и размером вдоль этой координаты b_w / N_a , где b_w – ширина жгута (рис. 1). Таким образом, расчет потерь сводится к многократному решению уравнения (1) и определению потерь по выражениям (2)...(4) при различных вариантах перемешивания проводников в жгуте.

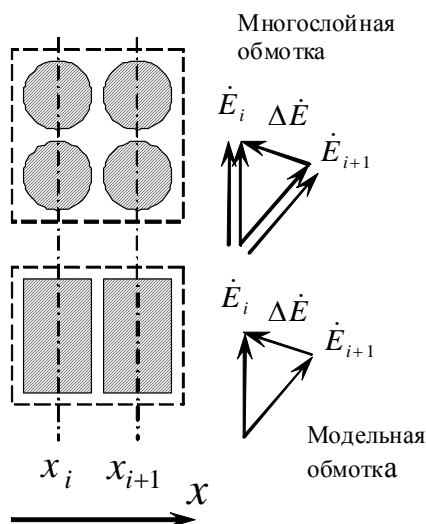


Рис. 3

Практика намотки многожильным жгутом показывает, что полностью случайным перемешивание проводников считать нельзя. В действительности, при переходе от одного полувитка к другому жгут может незначительно «перекрутиться», в результате чего произойдет нечто подобное циклической перестановке проводников местами, причем «перекручивание» это может происходить как в одну, так и в другую сторону. Еще одним фактором, влияющим на распределение проводников в активной зоне, является возможный «нахлест» соседних участков жгута. Это явление схематически показано на рис. 1. Для моделирования отмеченных особенностей перемешивания используем следующий алгоритм. Пусть в жгуте имеется для определенности 10 жил, которые в первом полувитке расположены в порядке возрастания координаты x . Выдвинем гипотезу о том, что при перемешивании случайным образом смещается лишь часть проводников, а остальные занимают место в том же порядке, в каком и были, но только на свободных местах. Рассмотрим случай, когда при переходе от одного полувитка в активной части к другому полувитку изменяет положение только один проводник. Этот случай поясняется табл. 1. Элементарные проводники (обозначенные буквами) в жгуте расположены в первом полувитке в порядке возрастания координат.

Таблица 1

Положение в порядке возрастания координаты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Первый полувиток	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К
Второй полувиток	К	Б	А	В	Г	Д	Е	Ж	З	И

Допустим, при переходе ко второму полувитку проводник А перемещается с первой на третью пространственную позицию. В случае, если смещение всех остальных проводников положить равным нулю, они остаются на своих местах или, если их место уже занято, смещаются циклически на следующую позицию в направлении возрастания пространственной координаты. В результате во втором полувитке получим распределение проводников, показанное во второй строке табл. 1. Как видим, проводники А и Б поменялись местами, а остальные сместились на одну позицию (проводник К циклически переместился на первую позицию).

Будем вычислять смещение очередного проводника по формуле

$$dN = \left(N_a - \text{fix} \left((R n d)^\alpha N_a \right) \right) \beta, \quad (5)$$

где fix – обозначает взятие целой части, Rnd – псевдослучайное число в диапазоне от 0 до 1, α – коэффициент, моделирующий степень «перемешивания» проводников в жгуте, – коэффициент, служащий для моделирования «нахлеста» витков друг на друга. Так, при $\alpha = 1$ получается неискаженное псевдослучайное число и (при $\beta = 1$) максимальное перемешивание. В случае $\alpha \rightarrow 0$; $\beta = 1$ все меньшее количество проводников получают начальное смещение при переходе от одного полувитка к другому. При $\beta > 1$ получается эффект «нахлеста» соседних витков жгута, как показано на рис. 1.

Отметим, что в этом случае во второй строке табл. 1 должны появиться пустые места за счет «перехода» проводников в область соседнего витка. При этом предполагается, что в действительности свободное место будет занято некоторыми проводниками из соседних витков. Ввиду того, что проводников (параллельных ветвей) в жгуте может быть до 20 и более, при аналогичных значениях чисел витков, можно предположить, что при $\beta > 1$ число проводников, «перешедших» в соседние витки, будет примерно одинаковым, что вполне соответствует реальности. На практике отмеченный «дисбаланс» количества проводников устраняется формовкой обмотки, у которой всегда есть некий запас пространства для размещения деформировавшихся проводников. Как показал численный эксперимент, описанный алгоритм при $\alpha = 1$ дает результаты, совпадающие с алгоритмом случайного перемешивания, входящим в состав среды моделирования MatLab.

Для оценки величины исследуемых потерь в общем балансе мощностей будем рассматривать их относительную величину (отнесенную к электромагнитной мощности машины). В качестве исходных данных для ее расчета далее будут использоваться действующее значение плотности тока в обмотке J и коэффициент заполнения проводниками области поперечного сечения обмотки ($k_{3П}$), который в расчетах принимался равным 0,4. При этом заметим, что влияние этого коэффициента крайне невелико при изменении в пределах, имеющих место в реальных обмотках.

Электромагнитную мощность можно определить как произведение интегральной силы Ампера, действующей на обмотку, и скорости бегущего поля. Интегрирование по области поперечного сечения обмотки произведения $B_m L dI$, представляющего собой силу, действующую на элемент тока dI , позволяет получить выражение искомой мощности.

$$P_{ЭМ} = \sqrt{2} p B_m J k_{3П} h_w t L v, \quad (6)$$

где p – число пар полюсов. При выводе (6) учитывались только первые пространственные гармоники индукции и плотности тока, при допущении о том, что эти гармоники не имеют пространственного сдвига, что обеспечивает максимальную интегральную силу.

Рассмотрим зависимость величины потерь от числа витков обмотки N_w и числа параллельных проводников N_a в жгуте. Предполагая, что конфигурация лобовых частей близка к полуокружности и учитывая, что витки имеют укорочение шага (рис. 1), определим среднюю длину витка в соответствии с выражением

$$L_w = 2L + p(t - b_w \pi N_w / 2). \quad (7)$$

Заданные геометрические размеры позволяют вычислить сопротивление единицы длины жгута

$$R_1 = k_{3П} \gamma_{Cu} / (b_w h_w), \quad (8)$$

где γ_{Cu} – удельное электрическое сопротивление меди. Отсюда можно определить сопротивление R одного проводника, входящее в схему замещения обмотки (рис. 2),

$$R = R_1 L_w N_w N_a. \quad (9)$$

Результаты моделирования. Прежде всего оценим влияние степени перемешивания проводников (жил) внутри жгута при переходе от одного полувитка к другому. Рассмотрим обмотку, намотанную жгутом, состоящим из 17 жил. Результаты расчета среднего относительного значения потерь, выраженного в процентах для числа витков 2, 4, 6 при различных значениях показателя α , приведены в табл. 2. В первом столбце указаны величина показателя α и приблизительное количество жил, получивших смещение более, чем на одну позицию (при малых значениях α). Количество испытаний для каждого значения степени перемешивания составляло одну тысячу.

Как следует из данных таблицы, даже небольшие искажения в порядке укладки витков приводят к росту потерь. Напомним, что смещение одного проводника на какое-либо количество позиций в большинстве случаев приводило к смещению целого блока расположенных рядом проводников, что можно проследить по табл. 1.

Вероятность же того, что два проводника просто поменяются местами весьма мала. В частности, поэтому, когда с исходных позиций смещено 5..7 жил (почти половина), степень перемешивания названа умеренной – в этом случае остальные 10–12 жил сохраняют прежнее упорядоченное положение друг относительно друга. Из данных табл. 2 также следует, что при увеличении числа витков потери резко уменьшаются.

Обращает на себя внимание тот факт, что при числе витков жгута 4 и более перемешивание проводников (по сравнению с упорядоченным их расположением) может привести к увеличению потерь от уравнительных токов более, чем в 100 раз (табл. 2). При моделировании «нахлеста» соседних витков, как и следовало ожидать, потери увеличиваются за счет увеличения углового пространственного сдвига жил и соответственного увеличения разностной ЭДС между ними.

Отметим, что в дальнейших результатах исследований степень перемешивания всегда считалась максимальной. Рассмотрим влияние на величину потерь числа витков и числа проводников в жгуте. Как следует из приведенной модели, при заданном числе проводников в жгуте увеличение числа витков приводит к уменьшению сечения жгута (а следовательно и проводника) и увеличению длины проводника. Как следствие, увеличивается сопротивление каждого проводника, входящее в схему замещения на рис. 2. Поэтому с ростом чисел витков и проводников естественно ожидать уменьшения потерь. Эта тенденция и отражена на рис. 4, где показаны зависимости средних значений исследуемых потерь от уравнительных токов $P_{ур}$, в процентном отношении к электромагнитной мощности от числа витков N_w при различном числе жил в жгуте, равном 5, 10 и 15. Каждая из зависимостей сверху и снизу обрамлена штриховыми линиями, показывающими среднеквадратичное отклонение значений от среднего. Показанные на рис. 4 результаты свидетельствуют, что кривые для различного числа параллельных проводников в жгуте N_a практически совпадают. Что касается среднеквадратичных отклонений, то с ростом числа параллельных проводников эти отклонения монотонно уменьшаются, то есть при пяти параллельных проводниках отклонения значений потерь от среднего – наибольшие и, наоборот, при пятнадцати проводниках эти отклонения для всех значений чисел витков – наименьшие. Графики также показывают, что при увеличении числа витков от 2 до 10 среднее значение потерь уменьшается с 7% до 0,06%, причем для большого числа параллельных проводников среднеквадратичное отклонение уменьшается с 2% до 0,02%. То есть, наблюдается резкое уменьшение потерь с ростом числа

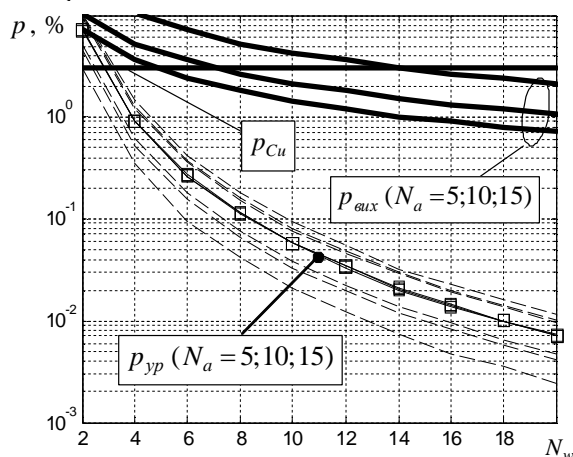


Рис. 4

витков, приводящее к увеличению степени перемешивания и росту сопротивления каждой жилы. При этом среднеквадратичное отклонение может составлять третью часть и даже более (при малом числе параллельных проводников) от среднего значения. Для сравнения на этом же рисунке показаны зависимости от числа витков потерь на вихревые токи в проводниках обмотки $P_{вих}$, которые вычислялись по формуле, полученной в [1] для беспазовых электрических машин при условии гармонического пространственного распределения магнитной индукции и частоте поля 1750 Гц. Очевидно, что величина этих потерь снижается с уменьшением диаметра жилы [1], то есть с ростом числа параллельных жил. Здесь же сплошной горизонтальной линией отражено значение джоулевых потерь в меди $P_{Си}$, которое имело бы место при протекании по обмотке якорного тока, определяемого заданной плотностью J .

Таблица 2

Степень перемешивания, показатель a	Число витков жгута		
	2	4	6
Отсутствует ($a = 0$)	0,15	0,009	0,002
Очень слабая ($a = 0,001$), 1 жила	1,53	0,094	0,018
Слабая ($a = 0,01$), 1...2 жилы	1,82	0,15	0,043
Умеренная ($a = 0,1$), 5...7 жил	4,08	0,75	0,300
Существенная ($a = 0,25$)	6,65	0,85	0,305
Сильная ($a = 0,5$)	8,33	1,04	0,313
Максимальная	9,14	1,14	0,340
«Нахлест» ($\beta = 1,1$)	12,0	1,37	0,410
«Нахлест» ($\beta = 1,2$)	13,2	1,52	0,480

Рассмотрим теперь зависимость потерь в проводе от числа витков жгута N_w при фиксированном диаметре провода d . Заметим, что при фиксированном d с ростом числа витков необходимо уменьшать число параллельных проводников в жгуте, чтобы не изменился объем зазора, отведенный под обмотку. Соответственно, сопротивление одного проводника будет увеличиваться только за счет увеличения числа витков N_w , т.е. его полной длины. Результаты численного эксперимента при этих исходных посылаках показаны на рис. 5. В данном случае исходной величиной являлся ряд из трех диаметров провода, отличающихся в $\sqrt{2}$ раз, и число витков обмотки. По диаметру провода и числу витков при заданном поперечном сечении фазы обмотки и коэффициенте заполнения обмотки медью определялось число параллельных жил в жгуте.

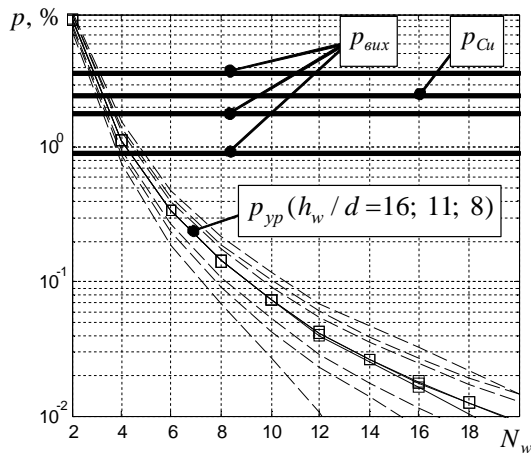


Рис. 5

Как видно, кривые на рис. 4 и рис. 5 подобны, а относительные значения потерь очень близки. Отметим, что для кривых на рис. 5 среднее квадратичное отклонение тем больше, чем больше диаметр провода, т.е. чем меньшее число параллельных жил содержится в жгуте.

Поскольку в данном численном эксперименте исходной величиной служил диаметр проводника, потери на вихревые токи не зависят от числа витков, что отражено на рис. 5 горизонтальными линиями, показывающими величину этих потерь. Как и в предыдущем случае, эти потери тем больше, чем толще обмоточный провод. Сплошной линией показано значение джоулевых потерь в обмотке.

Анализ результатов на рис. 4 и рис. 5 позволяет установить, что основным фактором, влияющим на величину потерь от уравнительных токов, является число витков обмотки. Причем уменьшение числа витков (при фиксированном объеме обмотки) в два раза приводит к возрастанию потерь приблизительно в 9...10 раз. Число параллельных проводников (жил) влияет лишь на величину среднее квадратичного отклонения величины этих потерь.

Если известны число витков и вероятная степень перемешивания их между собой, то это позволяет нам оценивать величину потерь при любой заранее известной степени «нахлеста» витков в пределах фазовой зоны. Пусть, например, обмотка содержит четыре витка. В соответствии с рис. 4 искомые потери составляют 0,9%. Если мы предполагаем, что два соседних витка 1-2 или 3-4 могут случайным образом поменяться местами, то фактически это эквивалентно случаю обмотки с двумя витками, уложенными рядом. При этом потери составят около 8% (рис. 4). В действительности они будут еще больше, так как возможна перемена мест между вторым и третьим витками. Если же в обмотке возможно полное перемешивание витков, то для оценки потерь ее нужно рассматривать как один виток с соответствующим числом жил.

В заключение следует заметить, что полученная относительная величина потерь на уравнительные токи не зависит ни от величины магнитной индукции, ни от частоты вращения, так как и электромагнитная мощность и ЭДС в проводниках линейно зависят от этих составляющих.

Что же касается плотности тока в меди J , то при проведении расчетов использовалось конкретное значение – 8 А/мм². Поскольку эта величина входит лишь в выражение для электромагнитной мощности, то при других ее значениях и результаты будут иными. Однако, ввиду линейности математической модели, реальное значение потерь P_J может быть вычислено по значению потерь $P_{J=8}$ (при плотности тока 8 А/мм²) из кривых рис. 4 путем пропорционального пересчета

$$p_J = (p_{J=8} / 8) J . \quad (9)$$

Такой простой пересчет нельзя осуществить при оценке потерь на вихревые токи, поскольку, как показано в [1], их величина пропорциональна квадрату частоты, квадрату магнитной индукции и четвертой степени диаметра провода. Вот почему данные о величине этих потерь, приведенные на рис. 4, 5, носят только оценочный характер для конкретных значений указанных величин.

Сравнивая величины потерь от уравнительных токов и основных электрических потерь, можно отметить следующее. При плотностях тока порядка 5...8 А/мм², умеренной степени перемешивания витков и жил потери на уравнительные токи могут в 3...10 раз быть меньше, чем основные потери в меди.

При высокой степени перемешивания проводников потери от уравнильных токов могут быть сравнимы и даже превышать величину основных электрических потерь. Заметим также, что приведенные данные применимы к беспазовым электрическим машинам любого типоразмера, в которых обмотка выполнена в виде мягких секций и наматывается «в навал» с последующим компаундированием и формовкой.

Выводы. 1. При изготовлении обмотки жгутом, состоящим из множества отдельных проводников, имеет место взаимное хаотичное перемещение этих проводников при намотке. Это приводит к возникновению уравнильных токов, протекающих в отдельных проводниках и обусловленных фазовым сдвигом ЭДС, возбуждаемых в них вращающимся магнитным полем ротора. В результате возникают потери, величина которых может в 100 и более раз превышать таковые для случая идеального концентрического или конгруэнтного расположения жил в витках.

2. Эффективным средством уменьшения потерь на уравнильные токи служит увеличение числа витков обмотки. Так, при увеличении числа витков в 2 раза и предотвращении перемешивания их в разных сторонах катушки, потери от уравнильных токов уменьшаются в 9...10 раз.

3. Разброс расчетных значений потерь от уравнильных токов тем больше, чем меньше параллельных жил в жгуте. Поэтому, для более точного прогнозирования ожидаемых параметров следует стремиться к увеличению числа элементарных параллельных проводников.

1. Антонов А.Е., Петухов И.С. Потери на вихревые токи в обмотке беспазовой электрической машины // Техн. електродинаміка. – 2010. – №4. – С. 38–42.

Antonov A.E., Petuhov I.S. Eddy current losses in the winding of slotless electrical machine // Tekhnichna elektrodynamika. – 2010. – №4. – P. 38–42. (Rus.)

2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

Ivanov-Smolenskii A.V. Electrical machines. – Moskva: Energiia, 1980. – 928 p. (Rus.)

УДК 621.313.8

О.Є.Антонов¹, докт.техн.наук, В.Г.Кіреєв², канд.техн.наук, І.С.Петухов³, канд.техн.наук,
^{1,2,3} – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Втрати від зрівняльних струмів в багатожильних обмотках беспазових електричних машин

Розкрито механізм виникнення втрат енергії на зрівняльні струми в багатожильній обмотці беспазової електричної машини магнітоелектричного типу. Запропоновано модель зсуву витків при виготовленні обмотки багатожильним проводом, внаслідок чого виникає нерівність ЕРС в окремих провідниках. Розроблено методику оцінки втрат на зрівняльні струми і визначено чинники, що впливають на їхню величину. Наведено залежність відносної величини втрат від числа витків обмотки. Показано, що відношення втрат на зрівняльні струми до електромагнітної потужності електричної машини не залежить від величини магнітної індукції і частоти обертання ротора. Бібл. 2, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: беспазова машина, втрати, зрівняльні струми.

A.Antonov¹, V.Kireiev², I.Petuhov³,

^{1,2,3} – Institute of electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Power losses from misbalanced current in multi-stranded windings of slotless electric machines

The mechanism of electric power losses from misbalanced currents in multi-stranded winding of slotless permanent magnet electric machine is determined. The model of coils displacement during manufacturing causing inequality of the coil's EDS is proposed. The method for estimation of the losses from misbalanced currents is developed and the factors, influencing on its value, are specified. The dependence of relative value of the losses on the number of winding coils is given. It is shown that the ratio of the losses from misbalanced currents to electromagnetic power of the electric machine does not depends on the value of magnetic induction and rotation frequency of rotor. References 2, tables 2, figures 5.

Keywords: slotless machine, losses, misbalanced currents.

Надійшла 28.12.2010

Received 28.12.2010