

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621:313

*А. П. Сеньков, С. Н. Лавренов, П. В. Макин, Ю Сан*

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ЗУБЦОВЫМ ШАГОМ ОБМОТКИ СТАТОРА

В вентильных электродвигателях с постоянными магнитами на роторе и зубцовым шагом обмотки статора фазы статора состоят из катушек, каждая из которых размещается на одном зубце магнитопровода статора, при этом ширина полюса ротора и зубцового наконечника магнитопровода статора примерно равны. Магнитное поле вентильных электродвигателей с постоянными магнитами на роторе с зубцовым шагом обмотки статора исследовалось на модели электромагнитной системы двигателя с помощью пакета Elcut и расчетным путем по упрощенной схеме замещения магнитной цепи. Установлено, что при расположении зубца магнитопровода статора между соседними полюсами ротора магнитные потоки этих полюсов замыкаются через зубцовый наконечник зубца статора, вызывая его насыщение и повышенные потери в магнитопроводе статора. Для того чтобы избежать насыщения магнитопровода статора, предлагается выполнять зубцовые наконечники с увеличенной радиальной высотой. При моделировании магнитного поля, созданного фазой статора, установлено, что индуктивная связь фаз статора незначительна и ее можно не учитывать. Поскольку фазы статора создают локальные магнитные поля, которые не перекрываются, сделан вывод о том, что в вентильных электродвигателях с постоянными магнитами на роторе с зубцовым шагом обмотки статора обмотка статора не создает равномерно вращающегося магнитного поля, которое характерно для «классических» синхронных и асинхронных машин.

**Ключевые слова:** вентильный электродвигатель, постоянные магниты, зубцовый шаг обмотки статора, распределенные обмотки статора, магнитное поле.

### Введение

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ), имеющие высокий КПД, минимальные массу и габариты, нашли широкое применение в управляемых электроприводах широкого диапазона мощности. Например, в приборных электроприводах малой мощности применяются двигатели серии ДБМ с моментом на выходном валу от 0,01 Нм до 16 Нм [1]. Наиболее мощные ВДПМ используются в судовых гребных электрических установках. Судостроительная фирма АББ на основе ВДПМ создала гребные электрические установки Azipod CO и Azipod CZ с номинальной мощностью на валу от 1,3 до 4,5 МВт [2]. Фирма Siemens разработала гребной электродвигатель Permasyun, предназначенный для подводной лодки U-212.

Наиболее распространенный вариант исполнения ВДПМ – трехфазная машина с двухслойной распределенной обмоткой статора и цилиндрическим ротором. В этом варианте исполнения, который применяется с 70-х гг. XX в. [3, 4], ВДПМ имеют практически равномерное вращение магнитного поля, созданного обмоткой статора, низкие пульсации момента и близкие к нулю потери в роторе.

За прошедшие годы создано много конструктивных схем ВДПМ, отличающихся большим разнообразием. По исполнению электромагнитной системы ВДПМ можно разделить на 3 группы: ВДПМ с распределенной обмоткой статора, ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора [5] и ВДПМ с поперечным магнитным потоком [6, 7].

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе с поперечным магнитным потоком появились сравнительно недавно и пока находятся на стадии исследования. ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора известны около 20 лет [8], и в ряде электроприводов эти машины предпочтительнее, чем ВДПМ с распределенной обмоткой статора. В зарубежных

публикациях ВДПМ с зубцовым шагом называют *machines with non-overlapping concentrated windings* (англ. – машины с неперекрывающимися сосредоточенными обмотками) [9]. Как и ВДПМ с распределенной обмоткой, ВДПМ с зубцовым шагом позволяет получить высокий обмоточный коэффициент для первой гармоники электродвижущей силы (ЭДС) в фазах статора и низкий обмоточный коэффициент для гармоник ЭДС более высокого порядка [9, 10]. Вследствие этого форма ЭДС в фазах статора при вращении ротора, от которой зависит КПД машины, в ВДПМ с зубцовым шагом близка к синусоиде. Преимущество ВДПМ с зубцовым шагом, по сравнению с ВДПМ с распределенной обмоткой статора, проявляется, прежде всего, в массогабаритных характеристиках статора и ротора.

Как показано в [11], в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора число пар полюсов можно значительно увеличить по сравнению с ВДПМ с распределенной обмоткой. При увеличении числа полюсов ротора магнитные потоки полюсов машины уменьшаются, и это дает возможность сократить радиальную ширину ярма магнитопровода статора и ротора. Кроме того, в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора обмотка значительно проще и имеет меньшую длину лобовых частей.

Машины с зубцовым шагом работоспособны при определенных сочетаниях числа полюсов ротора и числа зубцов статора. В машинах этого вида ширина полюса ротора и ширина зуба статора близки по величине и момент, действующий на ротор, создается в результате действия на полюсы ротора тангенциальных сил, возникающих при взаимодействии полюсов ротора и зубцов статора. Правила выбора сочетаний числа полюсов ротора и числа зубцов статора для ВДПМ с зубцовыми обмотками приведены в [8]. Число полюсов ротора  $2p$  и число зубцов статора  $z$  связаны соотношением

$$2p = \theta(mz_{гр} \pm 1),$$

где  $p$  – число пар полюсов ротора;  $m$  – число фаз;  $\theta = 1, 2, 3, \dots$  – число повторяющихся частей статора, в каждой из которых содержится  $m$  катушечных групп;  $z_{гр} = 2, 3, 4, \dots$  – число катушек в катушечной группе ( $z_{гр} = 1$  практически не применяется).

Если  $z_{гр}$  – нечетное число, то катушечные группы каждой фазы соединены между собой согласнo, если  $z_{гр}$  – четное число, то катушечные группы каждой фазы соединены между собой встречно.

Особенности конструкции ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора обуславливают и особенности магнитного поля ротора и статора. Целью статьи является исследование особенностей магнитного поля ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора.

### Анализ магнитного поля ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора

Структура магнитного поля ВДПМ с зубцовым шагом исследовалась на модели электромагнитной системы двигателя с помощью программы Elcut, которая, так же как и программа Ansys Maxwell, позволяет с высокой точностью рассчитать и наглядно продемонстрировать структуру магнитного поля машины.

На рис. 1 приведена схема типичного трехфазного ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора, у которого  $z = 18$ ;  $\theta = 2$ ;  $z_{гр} = 3$ ;  $p = 8$ ;  $m = 3$  и число пазов на полюс и фазу  $q = 0,375$ .

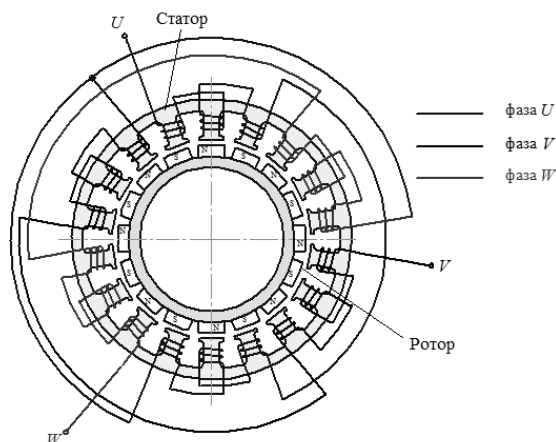


Рис. 1. Схема трехфазного ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора:  $z = 18$ ;  $\theta = 2$ ;  $z_{гр} = 3$ ;  $p = 8$ ;  $m = 3$

На рис. 2 – линейная развертка электромагнитной системы двигателя.

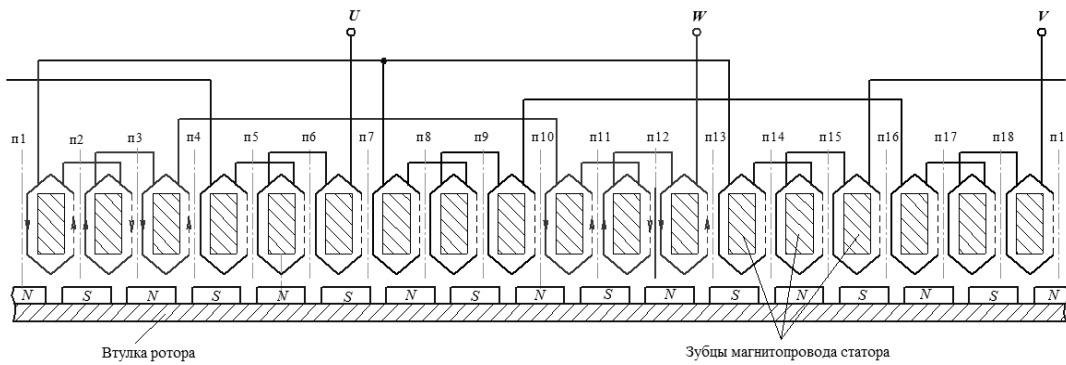


Рис. 2. Линейная развертка электромагнитной системы двигателя

Ротор выполнен по схеме «звездочка» – постоянные магниты расположены на поверхности магнитной втулки ротора и имеют радиальное направление намагниченности, полярность постоянных магнитов чередуется по угловой координате ротора. Зубцы статора разделены на 2 диаметрально расположенные зоны по 9 зубцов, схема соединения зубцовых катушек в фазы в обеих зонах одинакова. В каждой зоне катушки одной и той же фазы размещены на 3-х расположенных подряд зубцах магнитопровода статора и соединяются так, чтобы при постоянном токе в фазе полярность зубцов фазы чередовалась. Поскольку  $z_{тр}$  – нечетное число, то обе катушечные группы одной и той же фазы соединены согласно. В схеме на рис. 1 катушки в фазах соединены последовательно, а фазы соединены звездой.

Магнитное поле ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора исследовалось на машине, выполненной по схеме, показанной на рис. 1, и имеющей следующие параметры: наружный диаметр магнитопровода статора  $D1 = 101$  мм; внутренний диаметр магнитопровода статора  $D2 = 78$  мм; число зубцов магнитопровода статора  $z = 18$ ; ширина зубца магнитопровода статора  $t_3 = 5$  мм; ширина зубцового наконечника зубца магнитопровода статора  $t_{3н} = 11$  мм; радиальная высота зубцового наконечника  $h_n = 1,5$  мм; наружный диаметр ротора  $D = 77$  мм; длина ротора  $l = 60$  мм; число постоянных магнитов на поверхности ротора  $2p = 16$ ; длина магнитов в направлении намагниченности  $l_m = 4$  мм; ширина постоянного магнита  $b_m = 11$  мм; коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha = 0,73$ ; коэрцитивная сила материала постоянных магнитов  $H_c = 900$  кА/м; остаточная индукция постоянных магнитов  $B_r = 1,2$  Тл; материал магнитопровода статора – электротехническая сталь 1212; материал втулки ротора – сталь 10880.

На рис. 3 показано распределение магнитных потоков в диаметральном сечении машины, созданных постоянными магнитами ротора, при обесточенных фазах статора.

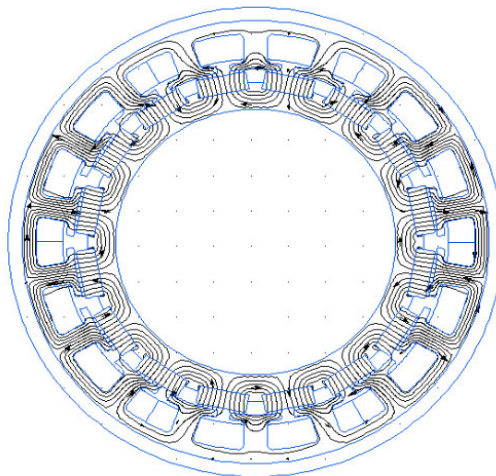


Рис. 3. Распределение магнитных потоков, созданных постоянными магнитами ротора, в элементах магнитопровода двигателя при обесточенных фазах статора

В структуре магнитного поля, созданного постоянными магнитами ротора, в рабочем зазоре можно выделить 4 зоны. Две аналогичные зоны А расположены на горизонтальном диаметре. В этих зонах ось полюсов ротора примерно совпадает с осью зубцов статора. На рис. 4 приведена структура магнитного поля в одной из зон А.

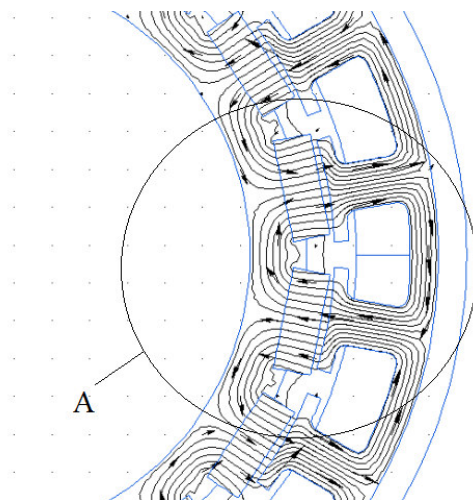


Рис. 4. Структура магнитного поля, созданного постоянными магнитами ротора, в зоне горизонтальной оси диаметрального сечения машины

В зоне А магнитный поток полюса ротора практически полностью проходит через один зубец магнитопровода статора. При правильном выборе ширины зубца статора максимальная индукция магнитного поля в этих зубцах статора имеет приемлемые значения (1,4–1,6 Тл).

Две другие характерные зоны – зоны В – расположены на вертикальном диаметре. В этих зонах ось зубцов статора расположена примерно посередине между осями соседних полюсов ротора. На рис. 5 изображено магнитное поле ротора в одной из зон В.

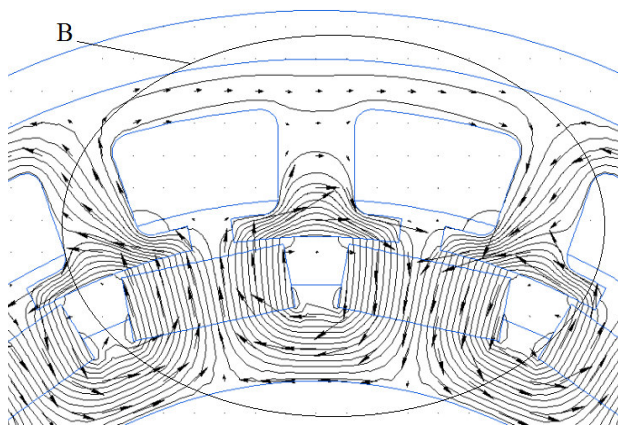


Рис. 5. Структура магнитного поля, созданного постоянными магнитами ротора, в зоне вертикальной оси диаметрального сечения машины

Магнитный поток соседних полюсов ротора замыкается через зубец магнитопровода статора – это одна из особенностей машин с зубцовым шагом обмотки статора. У машин с распределенной обмоткой статора на дуге между соседними полюсами ротора располагаются 2 или больше зубца магнитопровода статора, разделенные воздушным зазором.

Зоны насыщения магнитопровода статора находятся в зубцах, расположенных между полюсами ротора; индукция магнитного поля составляет здесь 2,0–2,2 Тл. При вращении ротора и его магнитного поля в зоне насыщения зубцовых наконечников возникнут существенные потери. По оценке, приведенной в [9], эти потери могут составлять около половины общих потерь

в магнитопроводе статора. Применение открытого паза, т. е. выполнения зубцов статора без зубцовых наконечников, позволяет избежать насыщения магнитопровода статора. Однако средняя индукция магнитного поля в зазоре существенно снижается (на 25–30 %), что неизбежно снизит момент на валу двигателя. Более приемлемые результаты дает увеличение радиальной высоты зубцового наконечника. На рис. 6 показана зона В машины, у которой радиальная высота зубцового наконечника  $h_n$  увеличена с 1,5 до 2,5 мм.

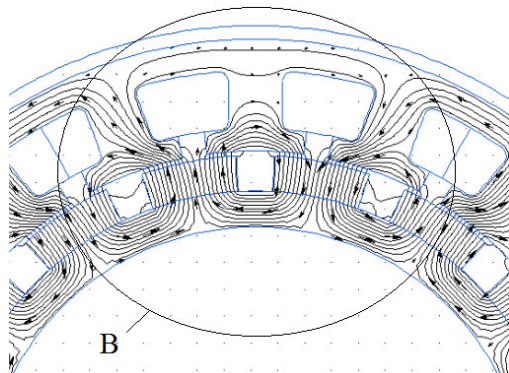


Рис. 6. Структура магнитного поля, созданного постоянными магнитами ротора, в зоне вертикальной оси диаметрального сечения машины с увеличенной радиальной высотой зубцового наконечника

Увеличение радиальной высоты зубцового наконечника  $h_n$  позволяет снизить индукцию магнитного поля в зубцах магнитопровода статора до 1,4–1,6 Тл. Однако следует учитывать, что увеличение  $h_n$  приведет к увеличению потоков рассеяния фазы, т. к. соседние зубцы магнитопровода статора, на которых располагаются катушки фазы, намагничиваются с различной полярностью. Поэтому увеличение  $h_n$  должно быть только в необходимых пределах, чтобы избежать насыщения зубцов магнитопровода.

Для анализа магнитного поля, созданного фазой ВДПМ, магнитные потоки фазы рассматривались при условии, что намагничивающая сила постоянных магнитов равна нулю. Относительная магнитная проницаемость постоянных магнитов равна  $\mu_{пм} = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} = 1,06$ . На рис. 7 изображено магнитное поле, созданное фазой  $U$ , при намагничивающей силе одной катушки фазы 600 ампер-витков и обесточенных фазах  $V$  и  $W$ .

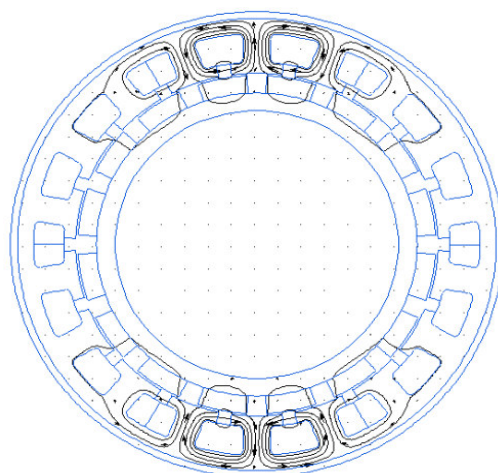


Рис. 7. Распределение магнитных потоков, созданных катушками фазы  $U$ , в элементах двигателя

На рис. 8 показано изменение индукции магнитного поля в зазоре двигателя от линейной координаты. Линейная координата зазора отсчитывалась по средней линии рабочего зазора от правой горизонтальной полуоси против часовой стрелки (см. рис. 1).

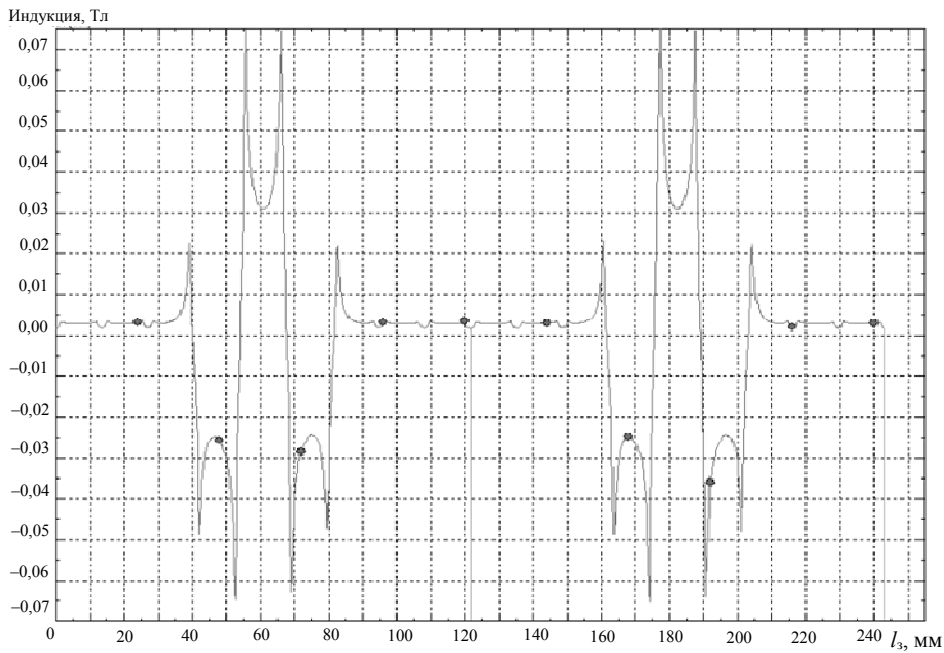


Рис. 8. Изменение индукции магнитного поля, созданного фазой  $U$ , в рабочем зазоре двигателя в зависимости от линейной координаты точки зазора  $l_3$

На рис. 8 линейная координата точки зазора между ротором и статором в диаметральной сечении машины равна  $l_3 = \alpha(DI + D)/2$ , где  $\alpha$  – центральный угол, изменяющийся от 0 до  $2\pi$ . Как видно из рис. 7 и 8, средняя индукция магнитного поля под зубцами статора, на которых размещены катушки включенной фазы  $U$ , примерно на порядок выше, чем индукция под зубцами статора, на которых размещены катушки обесточенных фаз  $V$  и  $W$ . Магнитные потоки двигателя замыкаются практически только через зубцы магнитопровода статора, на которых расположены катушки включенной фазы  $U$ . Объяснить характер изменения индукции в зазоре при включении фазы  $U$  можно с помощью упрощенной схемы замещения.

На упрощенной схеме замещения магнитное сопротивление магнитопровода статора и ротора будем считать равным нулю. Поскольку магнитная проницаемость постоянных магнитов близка к магнитной проницаемости воздуха, то можно считать магнитную проницаемость постоянных магнитов равной магнитной проницаемости воздуха. Электромагнитная система двигателя состоит из 2-х одинаковых зон, в каждую из которых входят 9 зубцов магнитопровода статора с катушками и 8 полюсов ротора. На схеме замещения достаточно рассмотреть одну из зон электромагнитной системы машины (рис. 9), т. к. вторая зона аналогична.

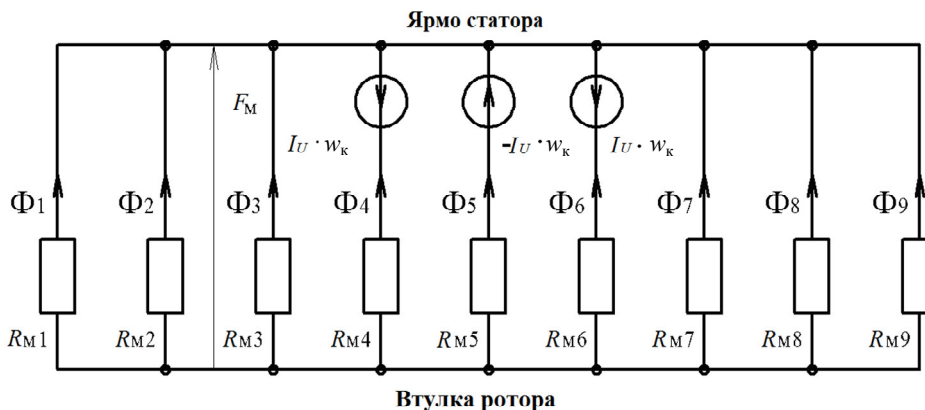


Рис. 9. Упрощенная схема замещения электромагнитной системы двигателя при включении катушек фазы  $U$

На рис. 9 обозначены:  $I_U$  – ток в фазе  $U$ ;  $w_k$  – число витков зубцовой катушки;  $R_{m1} - R_{m9}$  – суммарное магнитное сопротивление рабочего зазора и постоянных магнитов между зубцом магнитопровода статора соответствующего номера и втулкой ротора. Зубцы статора в машине пронумерованы от правой горизонтальной полуоси (см. рис. 1) против часовой стрелки. При принятом выше допущении о равенстве магнитной проницаемости воздуха и постоянных магнитов немагнитный зазор между магнитопроводом статора и втулкой ротора получается равномерным, поэтому  $R_{m1} = \dots = R_{m9} = R_m$ . Падение магнитного потенциала  $F_m$  между магнитопроводом статора и втулкой ротора можно определить методом узлового напряжения:

$$F_m = \frac{2I_U w_k \frac{1}{R_m} - I_U w_k \frac{1}{R_m}}{18 \frac{1}{R_m}} = \frac{I_U w_k}{9}. \quad (1)$$

Таким образом, магнитные потоки  $\Phi_n$  в зубцах статора номер  $n$ , на которых размещены катушки фазы  $U$ , будут равны

$$\Phi_{4,6} = \frac{F_m - I_U w_k}{R_m} = \frac{-8I_U w_k}{9R_m}; \quad \Phi_5 = \frac{F_m + I_U w_k}{R_m} = \frac{10I_U w_k}{9R_m}.$$

Магнитные потоки в зубцах статора 1–3, 7–9, на которых размещены катушки обесточенных фаз  $V$  и  $W$ , будут равны

$$\Phi_{1-3,7-9} = \frac{F_m}{R_m} = \frac{I_U w_k}{9R_m}.$$

Результаты расчета упрощенной схемы замещения совпадают с результатами моделирования – магнитные потоки, которые создает фаза  $U$  в зубцах магнитопровода, на которых размещены катушки обесточенных фаз  $V$  и  $W$ , на порядок меньше магнитных потоков в зубцах магнитопровода включенной фазы  $U$ . При нечетном числе  $z_{гр}$  катушек в катушечной группе чем больше  $z_{гр}$ , тем меньше магнитные потоки, которые создает включенная фаза через зубцы магнитопровода, на которых расположены катушки других фаз. Это объясняется тем, что при любом нечетном числе  $z_{гр}$  числитель выражения (1) будет равен  $I_U \cdot w_k$ , т. к. намагничивающие силы катушек включенной фазы чередуются по направлению.

При четном числе  $z_{гр}$  катушек в катушечной группе числитель выражения (1) будет равен нулю, получим  $F_m = 0$ , и включенная фаза через зубцы магнитопровода статора других фаз магнитных потоков создавать практически не будет.

При определении потокосцепления  $\Psi_U$  фазы  $U$  нужно учесть, что направление намотки катушек фазы чередуется, поэтому потокосцепление всех катушек фазы  $U$  суммируется со знаком «+» и равно

$$\Psi_U = 2w_k \left( \frac{10I_U w_k}{9R_m} + \frac{-8I_U w_k}{9R_m} \right) = \frac{52I_U w_k}{9R_m}.$$

Отсюда получим приближенное выражение для определения индуктивности фазы ВДПМ, изображенного на рис. 1, 2:

$$L = \frac{\Psi_U}{I_U} = \frac{52w_k^2}{9R_m}. \quad (2)$$

Магнитные потоки через все зубцы статора, на которых размещены катушки обесточенных фаз  $V$  и  $W$ , имеют одинаковое радиальное направление. Учитывая, что направление намотки катушек фаз чередуется, потокосцепление катушек фазы  $V$ , созданное током фазы  $U$ , будет равно

$$\Psi_{UV} = 2w_k (2\Phi_{1,3} - \Phi) = 2w_k \frac{I_U w_k}{9R_m} = \frac{I_U w_k^2}{9R_m}.$$

Отсюда получим коэффициент взаимной индуктивности фаз  $U$  и  $V$ :

$$M_{UV} = \frac{\Psi_{UV}}{I_U} = \frac{2w_k^2}{9R_m}. \quad (3)$$

Фазы ВДПМ симметричны, поэтому коэффициент взаимной индуктивности фаз  $M_{UV}$  и  $M_{VW}$  будут иметь аналогичное выражение. Из упрощенной схемы замещения индуктивность фаз (2) и взаимная индуктивность (3) отличаются в 26 раз.

### Обсуждение полученных результатов

Таким образом, магнитное поле ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора имеет несколько особенностей. Первая особенность связана с близкими значениями ширины полюса ротора и зубца статора. При расположении зубца статора между соседними полюсами ротора магнитные потоки соседних полюсов ротора замыкаются через зубцовый наконечник зубца статора, создавая насыщение зубцового наконечника. Вследствие насыщения при вращении ротора в зубцовых наконечниках возникнут большие потери. Снизить потери в зубцовых наконечниках можно, увеличив радиальную высоту наконечников.

Вторая особенность магнитного поля ВДПМ с зубцовым шагом обусловлена способом выполнения обмотки статора. Каждая фаза состоит из 2-х или более групп зубцовых катушек, направление намагничивающих сил которых чередуется. В ходе моделирования и расчета установлено, что в таких машинах индуктивная связь между фазами незначительна и коэффициенты взаимной индуктивности фаз можно принять равными нулю. Каждая фаза ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора создает пульсирующее магнитное поле, и поскольку магнитные поля фаз не накладываются друг на друга, общего вращающегося магнитного поля, как в классических синхронных и асинхронных машинах, в этих машинах нет. Так как в этих машинах обмотка статора не создает равномерно вращающегося магнитного поля, то в постоянных магнитах и втулке ротора возникнут потери на вихревые токи и гистерезис. Для снижения потерь втулку ротора целесообразно выполнять из шихтованной стали, а каждый полюс ротора формировать из постоянных магнитов малого размера.

### Выводы

1. При расположении зубца статора между соседними полюсами ротора магнитные потоки соседних полюсов ротора замыкаются через зубцовый наконечник зубца статора, создавая насыщение зубцового наконечника и увеличивая потери в стали. Устранить насыщение в зубцовых наконечниках магнитопровода статора можно, увеличив радиальную высоту зубцовых наконечников.
2. Каждая фаза ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора создает магнитные потоки, замыкающиеся практически только через зубцы магнитопровода статора, на которых катушки данной фазы расположены, взаимной индуктивностью фаз можно пренебречь.
3. Общего равномерно вращающегося магнитного поля фазы статора не создают, вследствие чего необходимо принимать конструктивные меры для снижения потерь в постоянных магнитах и магнитопроводе ротора на гистерезис и вихревые токи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленький Ю. М., Зеленков Г. С., Микеров А. Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. Л.: ЛДНТП, 1987. 28 с.
2. Королева Т. Н., Сеньков А. П. Судовые гребные электрические установки: учеб. пособие. СПб.: СПбГМТУ, 2014. 84 с.
3. Лебедев Н. И., Овчинников И. Е. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979. 270 с.
4. Ледовский А. Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
5. Баранов М. В. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 240 с.
6. Chen A. Y., Nilssenand R., Nysveen A. Performance comparisons among radial-flux, multistage eaxial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications // IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2009. P. 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.



7. Калмыков А. Н., Сеньков А. А., Сеньков А. П., Рябов А. А. Вентильный электродвигатель с поперечным магнитным потоком и дисковым ротором // Электротехника. 2016. № 4. С. 24–28.
8. Пат. 2047936 Российская Федерация, МПК H02K 21/00 (1995.01). Синхронный электродвигатель / Бродовский В. Н., Иванов Е. С., Лузин М. И., Петухов В. П., Пятков М. И.; № 4001093/63; заявл. 02.01.1986; опубл. 10.11.1995.
9. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications. Stockholm: KTH, 2008. 165 p.
10. Сеньков А. П., Бормотов А. В., Седунов Д. Ю. Обмоточный коэффициент и потери в роторе вентильных электродвигателей с зубцовыми обмотками статора // Вестн. Моск. авиац. ин-та. 2015. Т. 22. № 3. С. 122–131.
11. Сан Ю, Сеньков А. П. Сравнение массогабаритных показателей вентильных электродвигателей с распределенной и зубцовой обмотками статора // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2016. Вып. № 3 (37). С. 174–180.

Статья поступила в редакцию 01.09.2016

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сеньков Алексей Петрович** – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; г-р техн. наук, доцент; профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов; senkov@smtu.ru.

**Лавренов Сергей Николаевич** – Россия, 195267, Санкт-Петербург; ОАО «НИИ Электротера»; начальник отдела силовой электроники и преобразовательной техники; sergeylavrenov@mail.ru.

**Макин Павел Владимирович** – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; магистрант кафедры электротехники и электрооборудования судов; 3013039@gmail.com.

**Сан Ю** – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; аспирант кафедры электротехники и электрооборудования судов; kws@smtu.ru.



*A. P. Senkov, S. N. Lavrenov, P. V. Makin, Yu Thsan*

### PARAMETERS OF MAGNET FIELD OF PERMANENT MAGNET MOTORS WITH TOOTH PITCH OF STATOR WINDING

**Abstract.** In the permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding, stator phases consist of coils, each of them is placed on a tooth of the magnetic circuit of the stator, wherein, the width of the rotor pole and tooth ending of the magnet circuit of the stator is approximately equal. The magnet field of permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding was investigated on the model of electromagnet system of the engine using program package Elcut and calculating method by the simple substitution in the magnet circuit. It is stated that when the magnet circuit tooth of stator is placed between rotor poles, the magnet fluxes of these poles become closed through this tooth ending of the tooth stator, causing its saturation and high losses in the magnet circuit of stator. To avoid saturation of the stator magnetic circuit, it is proposed to make tooth endings with bigger radial height. While modeling the magnet field, made by a phase of the stator, it is found that inductive coupling of the phases is insignificant and cannot be taken into account. Though the phases of stator make local magnet fields, which are not overlapped, it is assumed that in permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding the stator winding does not make evenly rotating magnet field, which is typical for classic synchronous and asynchronous motors.

**Key words:** permanent magnet motor, constant magnets, tooth pitch of stator winding, distributed magnet circuits of stator, magnet field.

## REFERENCES

1. Belen'kii Iu. M., Zelenkov G. S., Mikerov A. G. *Opyt razrabotki i primeneniia beskontaktnykh momentnykh privodov* [Experience of development and application of contact-free moment drives]. Leningrad, Izd-vo LDNTP, 1987. 28 p.
2. Koroleva T. N., Sen'kov A. P. *Sudovye grebnye elektricheskie ustanovki: uchebnoe posobie* [Marine propeller power installations: textbook]. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGMTU, 2014. 84 p.
3. Lebedev N. I., Ovchinnikov I. E. *Beskontaktnye dvigateli postoiannogo toka* [Contact-free engines of direct current]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 270 p.
4. Ledovskii A. N. *Elektricheskie mashiny s vysokokoertsitivnymi postoiannymi magnitami* [Electric motors with highly coercitive magnets]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 168 p.
5. Baranov M. V. *Elektricheskie slediashchie privody s momentnym upravleniem ispolnitel'nymi dvigateliami* [Electric serving drives with instant control of operating motors]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2006. 240 p.
6. Chen A. Y., Nilssenand R., Nysveen A. Performance comparisons among radial-flux, multistage eaxial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2009. Pp. 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.
7. Kalmykov A. N., Sen'kov A. A., Sen'kov A. P., Riabov A. A. Ventil'nyi elektrodvigatel' s poperechnym magnitnym potokom i diskovym rotorom [Permanent magnet motor with transverse magnet flux and disc rotor]. *Elektrotehnika*, 2016, no. 4, pp. 24–28.
8. Brodovskii V. N., Ivanov E. S., Luzin M. I., Petukhov V. P., Piatkov M. I. *Sinkhronnyi elektrodvigatel'* [Synchronous electric drive]. Patent RF no. 2047936, 10.11.1995.
9. Meier F. *Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications*. Stockholm: KTH, 2008. 165 p.
10. Sen'kov A. P., Bormotov A. V., Sedunov D. Iu. Obmotochnyi koeffitsient i poteri v rotore ventil'nykh elektrodvigatelei s zubtsovymi obmotkami statora [Winding factor and losses in rotor of the permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 122–131.
11. San Iu, Sen'kov A. P. Sravnenie massogabaritnykh pokazatelei ventil'nykh elektrodvigatelei s raspredelei i zubtsovoi obmotkami statora [Comparison of mass-dimensional parameters of permanent magnet motors with distributed and tooth stator winding]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, iss. no. 3 (37), pp. 174–180.

The article submitted to the editors 01.09.2016

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Senkov Alexey Petrovich** – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Electrical Engineering and Marine Equipment; senkov@smtu.ru.

**Lavrenov Sergey Nikolaevich** – Russia, 195267, Saint-Petersburg; JSC "Scientific Research Institute Electromera"; Head of the Department of Power Electronics and Converter Equipment; sergeylavrenov@mail.ru.

**Makin Pavel Vladimirovich** – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Master's Course Student of the Department of Electrical Engineering and Marine Equipment; 3013039@gmail.com.

**Thsan Yu** – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Marine Equipment; kws@smtu.ru.

