

## Электротехника

УДК 519.6; 21.3.0; 621.313

### ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОМПАКТНЫХ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*П.Ю. Грачев, А.С. Табачинский*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** Представлены результаты разработки методик построения схем и расчета вылета лобовых частей оригинальных компактных обмоток переменного тока для асинхронных или синхронных машин, уменьшающих их объем. Одно из перспективных направлений внедрения таких инновационных машин – электрическое оборудование автономных энергоустановок. Витки компактных обмоток состоят из проводников с циклически изменяющимся прямоугольным поперечным сечением. Такое выполнение обмоток позволяет за счет существенного уменьшения вылета лобовых частей уменьшить материалоемкость и массо-объемные показатели электрических машин. Как пример представлены методики построения трех типов схем компактной обмотки статора – обмотки многополюсного асинхронного генератора. Описаны особенности методик расчета вылета лобовых частей и массы меди таких обмоток. Приведены расчетные данные уменьшения вылета лобовых частей и массы меди компактной обмотки по сравнению с традиционной.*

***Ключевые слова:** машина переменного тока, обмотка статора, методика, схема обмотки, лобовая часть, сечение проводника, материалоемкость.*

Снижение материалоемкости электрических машин представляется задачей особенно актуальной для автономных объектов [1], в том числе автомобильного транспорта [2, 3, 4]. В ветроэнергетике снижение материалоемкости, объема и массы электрооборудования установок [5, 6] делает более легкими и компактными их башни, снижает расходы при транспортировании ветроэлектрических установок в отдаленные города и поселки. При этом нужно обеспечить и энергоэффективность электрических машин. Решение этого комплекса задач обычно достигается как за счет оптимизации конструкций [7] и применения новых материалов, так и за счет внедрения новых алгоритмов управления машинами [8]. Россия продвигает на рынок общепромышленную серию асинхронных двигателей 7AVE [9], обладающих высокой энергоэффективностью и низким уровнем шума. Традиционно в этой серии отечественных двигателей, как и в других энергосберегающих машинах, эффект снижения потерь достигается увеличением объема активных материалов, что ведет к увеличению их габаритов и стоимости.

---

*Грачев Павел Юрьевич (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Теоретическая и общая электротехника».*

*Табачинский Алексей Сергеевич, аспирант, старший преподаватель кафедры «Теоретическая и общая электротехника».*

Противоречия, возникающие при расчете экономии электроэнергии при внедрении энергосберегающих машин в регулируемый электропривод, показаны в работе [10]. Показано, что помимо потерь, возникающих в силовых вентилях и электрических машинах в процессе работы электропривода, необходимо учитывать затраты на производство таких энергосберегающих машин и на их повышенную ресурсоемкость. Поэтому учеными всего мира предлагаются другие способы повышения энергосбережения за счет электрических машин – применение сосредоточенных обмоток [11] и круговых обмоток из провода прямоугольного сечения [12]. Авторами данной статьи рассматриваются инновационные электрические машины, конструкция которых позволяет уменьшить их материалоемкость и габариты (патенты [13–19]). Они включают оригинальную компактную обмотку статора, положительный эффект от применения которой достигается за счет сокращения длины фазных проводов и вылета лобовых частей [20].

В данной статье описываются методики построения схем и расчета размеров и массы обмотки статора для определения эффективности инновационных машин с компактными обмотками при выборе в качестве прототипа многополюсной машины [21].

### **Особенности конструкций инновационных машин с компактными обмотками и методика построения схем обмоток**

Инновационные машины переменного тока рассматриваемой в статье конструкции имеют компактную двухслойную волновую обмотку статора в пазах прямоугольной или кусочно-прямоугольной формы с циклически изменяющимся прямоугольным сечением проводников [19].

Рассмотрим особенности выполнения статора многополюсного генератора переменного тока с такой компактной обмоткой. В каждом пазу статора генератора находятся четыре активных проводника, по два в каждом из двух слоев. Лобовые части включают переключки уменьшенного сечения. На рис. 1 приведены части развернутой схемы обмотки генератора.

На рис. 1а изображена часть схемы обмотки с выводами фаз  $U$  и  $W$ . На рис. 1б изображена часть схемы обмотки с выводами фазы  $V$ . Обозначены полюсные деления. Эта схема по виду совпадает с развернутой схемой трехфазной двухслойной волновой стержневой обмотки с  $Z_1 = 180$ ,  $2p = 30$ ,  $q = 2$ ,  $y = 6$ , т. е. с диаметральной шагом. Однако в пазу компактных обмоток каждый слой может содержать несколько проводников. Поэтому проводники одного слоя в пазу назовем группами активных проводников. На схеме каждая из групп показана одним отрезком. Сплошными линиями показаны группы активных проводников верхнего слоя, а штриховыми линиями – нижнего слоя. Лобовые проводники, соединяющие группы активных проводников, расположены друг над другом [14]. Назовем их группами лобовых проводников. Эти группы изображены на схеме (вверху и внизу) ломаными линиями. Горизонтальными линиями обозначены группы лобовых проводников обмотки для соединения полуветвей фаз, имеющих противоположные направления намотки (например, из паза 170 в паз 176). Сплошными ломаными линиями обозначены группы лобовых проводников, соединяющих ветви фаз (например, из паза 177 в паз 3).

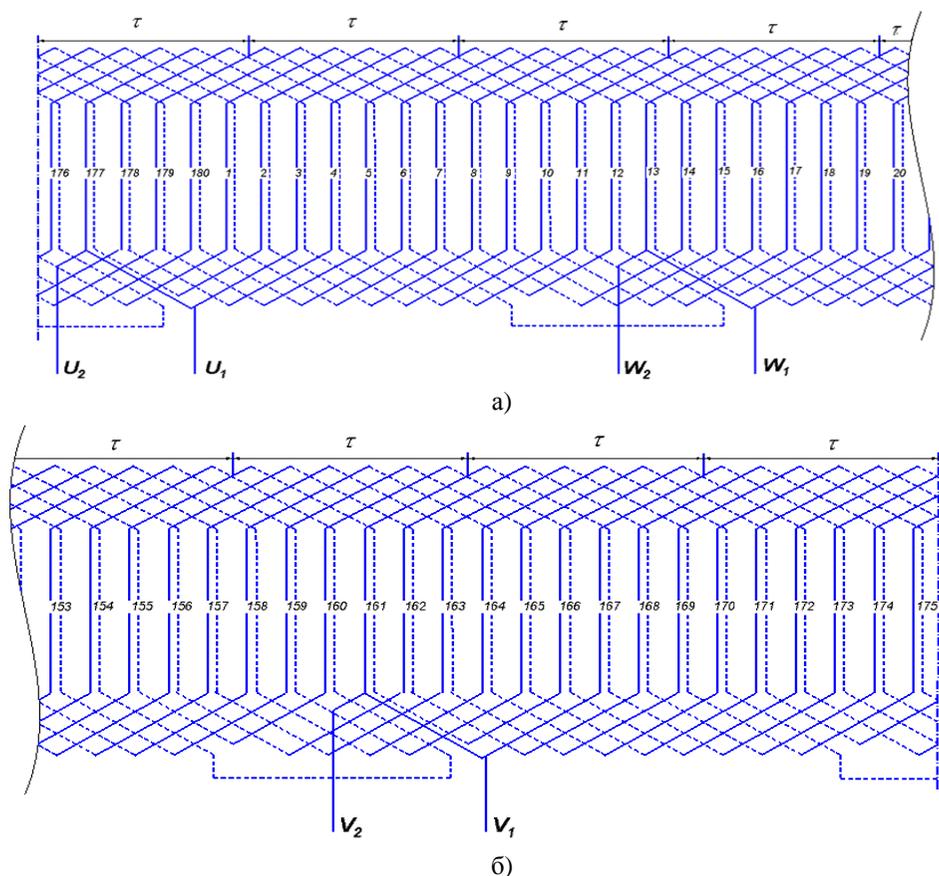


Рис. 1. Развернутая схема компактной обмотки статора генератора

Такая схема не отражает число проводников в слоях паза и недостаточно полно отражает расположение лобовых проводников обмотки над торцевыми поверхностями сердечника статора, которое представляет основную новизну компактных обмоток. Таким образом, стандартные методики проектирования не позволяют учесть особенности конструкции компактной обмотки, поэтому необходима разработка новых методик проектирования инновационных машин.

Для наглядного представления о выполнении лобовых частей компактных обмоток в части соединения групп лобовых проводников с проводниками в пазах и их расположения предложено строить специальные развернутые торцевые схемы [22]. Эти торцевые схемы позволяют оценить возможность создания обмоток с неперекрещивающимися лобовыми проводниками, т. к. иллюстрируют расположение групп лобовых проводников над торцами сердечника статора и позволяют показать последовательность соединения активных и лобовых проводников.

Авторами статьи предложена следующая методика построения развернутых торцевых схем компактных обмоток.

1. *Изображение активных проводников обмотки.* На схемах для каждого паза сердечника парой вертикальных отрезков изображают группы активных проводников обмотки каждого слоя: сплошными отрезками обозначают группы про-

водников верхнего слоя, а пунктирными – нижнего слоя. Каждый конец вертикального отрезка изображает совокупность выводов активных проводников одной группы в одном слое каждого паза, являющихся перемычками уменьшенного сечения. При этом правые верхние концы пар вертикальных отрезков схемы и левые нижние концы пар этих отрезков изображают выводы групп активных проводников, находящихся на одной торцевой поверхности сердечника. А левые верхние концы пар вертикальных отрезков схемы и правые нижние концы этих пар изображают выводы групп активных проводников, находящихся на другой торцевой поверхности сердечника.

2. *Изображение лобовых проводников обмотки.* Чтобы изобразить группы лобовых проводников витков обмотки над одной торцевой поверхностью сердечника, проводят наклонные отрезки, соединяющие верхние или нижние концы сплошных вертикальных отрезков с нижними или верхними концами пунктирных вертикальных отрезков, изображающих выводы групп активных проводников слоев, в соответствии с шагом обмотки. Соединяя левые верхние концы пар вертикальных отрезков с правыми нижними концами пар, получаем схему лобовых витковых соединений с одного торца сердечника. Соединяя правые концы пар с левыми концами пар, получаем схему лобовых витковых соединений с другого торца сердечника. Можно построить одну схему для двух торцов, но она получается громоздкой и недостаточно наглядной. Поэтому методика предполагает построение двух схем – отдельно для каждого торца машины.

3. *Построение торцевой схемы без выводов фаз обмотки.* Для ее построения достаточно двух предыдущих этапов методики, т. к. на ней не изображаются лобовые проводники, соединяющих полуветви и ветви фаз обмотки, а также выводы фаз.

4. Для построения торцевой схемы, где находятся выводы фаз обмотки, необходимо провести следующие дополнительные построения. Изображают группы лобовых проводников, соединяющих полуветви и ветви фаз обмотки, горизонтальными отрезками. Пунктирными отрезками изображают группы лобовых проводников, соединяющих активные проводники нижних слоев, расположенные над ярмом сердечника. Сплошными отрезками изображают группы лобовых проводников, соединяющих активные проводники верхнего слоя. Эти группы лобовых проводников расположены со стороны воздушного зазора. Выводы начал и концов фаз могут быть сделаны из верхнего или нижнего слоя активных проводников.

На рис. 2 показана развернутая торцевая схема двухслойной волновой обмотки статора многополюсного генератора для торца с выводами фаз. Она построена в соответствии с изложенной методикой. Группы лобовых проводников, соединяющих полуветви фаз, обозначены  $U, V, W$ . Группы лобовых проводников, соединяющих ветви фаз, обозначены  $U_1 - U_2, V_1 - V_2, W_1 - W_2$ .

Группы лобовых проводников для соединения полуветвей фаз соединяют активные проводники нижнего слоя, а группы лобовых проводников для соединения ветвей фаз – активные проводники верхнего слоя. В отличие от стержневых, компактные обмотки имеют несколько ветвей в фазе. Однако приведенные выше схемы не позволяют определить число ветвей в фазе. Поэтому для полного представления о конструкции компактных обмоток необходимо дополнять развернутые и торцевые схемы компактных обмоток схемами последовательности соединения проводников фаз, аналогичными тем, что применяются для стержневых обмоток [22].

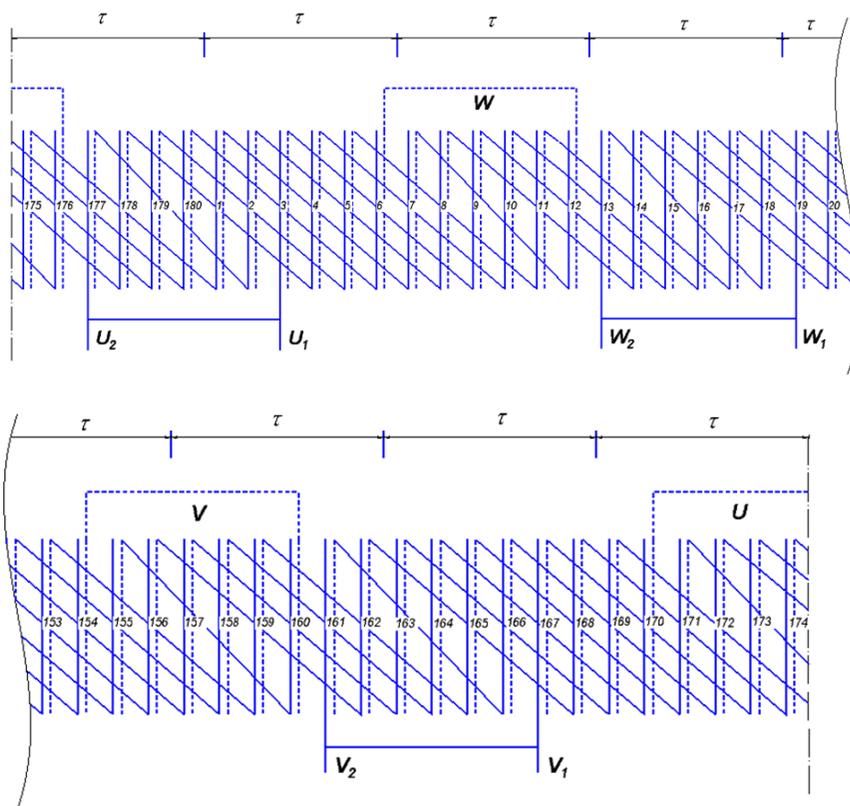


Рис. 2. Торцевая схема компактной обмотки статора генератора

На рис. 3 показана схема последовательности соединения проводников для одной фазы обмотки статора генератора. Она позволяет получить полное представление о числе ветвей в фазе, соединении активных и лобовых проводников в каждом витке, о соединении полуветвей и ветвей фаз, а также о каждом шаге обмотки по пазам.

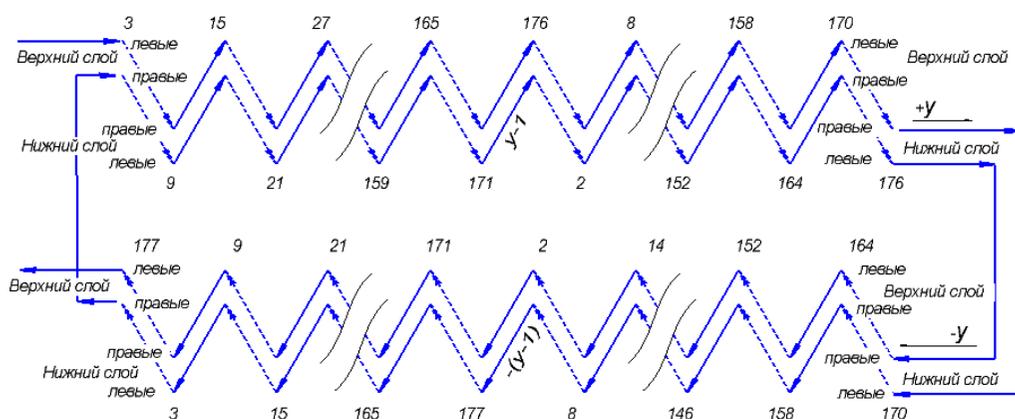


Рис. 3. Схема соединений проводников фазы U (два проводника в слое паза)

На схеме рис. 3 показана нумерация пазов сердечника статора, обозначен  $y$  – шаг обмотки, выделены ее верхний и нижний слои, обозначены правые и левые проводники в слоях пазов. Сплошными отрезками обозначены лобовые проводники со стороны торца с выводами фаз, а штриховыми отрезками – с другого торца. Соединения сплошных отрезков со штриховыми отрезками изображают активные проводники, как бы перпендикулярные плоскости чертежа. Каждое соединение – это левый или правый проводник (по направлению чередования пазов) в нижнем или верхнем слое паза.

Рассмотрение схемы позволяет сделать вывод, что фазы инновационного многополюсного генератора включают две ветви, соединенные последовательно, каждая из которых состоит из двух полуветвей, соединения которых показаны слева. Направления намотки полуветвей противоположные. В середине полуветвей обмотка имеет укороченный шаг  $y-1$ . Выводы фазы и соединения между ветвями находятся в верхнем слое обмотки, а соединения между полуветвями – в нижнем слое обмотки.

На рис. 4 показан вид торца сегмента активной части инновационного многополюсного генератора.

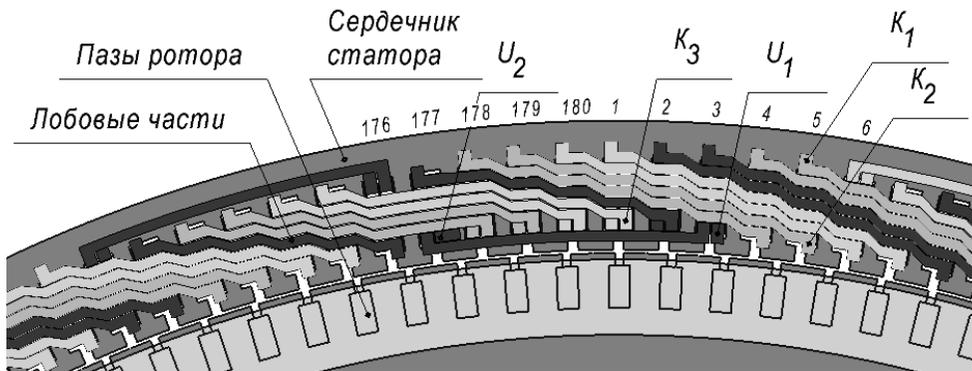


Рис. 4. Активная часть генератора с компактной обмоткой статора

На рис. 4 изображены лобовые проводники трех фаз обмотки статора. Фазы обозначены различными оттенками серого цвета. Лобовые проводники, расположенные у воздушного зазора, соединяют полуветви, а около ярма статора – ветви фазы. В нижней части рисунка изображен короткозамкнутый ротор асинхронной машины. Здесь  $U_1$ ,  $U_2$  – выводы фазы компактной обмотки;  $K_1$ ,  $K_3$ ,  $K_2$  – обозначения различных видов соединений активных и лобовых проводников;  $1 \dots 180$  – номера пазов сердечника статора.

#### **Особенности расчета лобовых частей и массы меди обмотки инновационной машины**

Особенности расчета связаны с наличием в фазах обмотки так называемых перемычек – проводников с уменьшенным сечением для соединения активных и основных лобовых проводников. В этом случае основные лобовые проводники располагаются в плоскостях, параллельных торцам статора, без взаимного перекрещивания. Предлагаемые инновационные электрические машины могут иметь

различные виды этих перемычек. Один из вариантов соединения активных и основных лобовых проводников обмотки изображен на рис. 5.

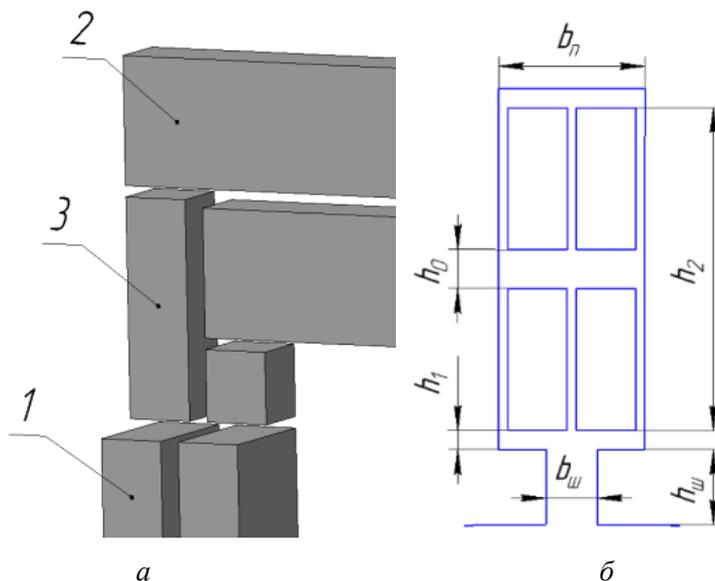


Рис. 5. К расчету компактной обмотки статора

На рис. 5а показаны соединения активных и лобовых проводников перемычками уменьшенного сечения, которые для наглядности отделены от активных и лобовых проводников. 1 обозначает активные проводники в пазу сердечника статора, 2 – основные лобовые проводники, параллельные торцу сердечника статора, 3 – перемычки уменьшенного сечения. Длина перемычек может изменяться в зависимости от зазора между лобовыми частями и торцом сердечника. На рис. 5б представлен паз статора генератора с четырьмя проводниками двухслойной компактной обмотки. В каждом слое находится группа из двух проводников. На рис. 5б обозначены размеры паза, применяющиеся в формулах расчета обмоток статора электрических машин.

Для определения размеров и массы меди обмотки инновационной машины предложено пользоваться следующими выражениями. Полагаем, что площадь сечения перемычек в два раза меньше площади сечения активных и лобовых проводников; зазор между лобовыми частями и сердечником статора отсутствует.

Габариты лобового проводника компактной обмотки (с учетом изоляции) зависят от размеров паза статора и активного проводника:

$$b_{лп} = \frac{h_2 - 2h_{неп}}{y - 2}; h_{лп} = \frac{S_{ан}}{b_{лп}} \quad (1)$$

Здесь  $b_{лп}$  – ширина изолированных лобовых проводников;

$h_2$  – высота части паза, занятая обмоткой (рис. 5б);

$h_{неп}$  – высота мест соединения активных и лобовых проводников (в данном случае – половина высоты активного проводника);

$S_{ан}$  – сечение активного проводника, равное сечению лобового проводника.

Расчет вылета лобовых частей стержневой обмотки по стандартной методике [23] зависит от высоты паза, внутреннего диаметра статора, числа полюсов и прямолинейной части лобовых проводников и производится по выражению

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{л}} \frac{\pi(D + h_{\text{л}})}{2p} + B. \quad (2)$$

Вылет лобовых частей статора для компактной обмотки зависит от зазора между лобовыми частями и торцом сердечника, а также от количества проводников в пазу  $u_n$ . Для двухслойной обмотки, если зазор между лобовыми частями и сердечником статора отсутствует, вылет лобовых частей  $l_{\text{выл}}$  предлагается определять по следующему выражению:

$$l_{\text{выл}} = \frac{u_n}{2} h_{\text{л}}. \quad (3)$$

Длина лобовых проводников  $l_{\text{л}}$  стержневой обмотки статора в соответствии со стандартной методикой [23]

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} \frac{\pi(D + h_{\text{л}})}{2p} + 2B. \quad (4)$$

Длина лобового проводника  $l_{\text{л}}$  компактной обмотки зависит от размеров паза сердечника и шага обмотки. Эту длину предлагается определять по следующему выражению:

$$l_{\text{л}} = \sqrt{\left( h_{\text{л}} + \left[ \frac{D}{2} + h_{\text{ш}} \right] \left[ 1 - \cos \frac{2\pi y}{Z_1} \right] \right)^2 + \left( 2b_{\text{л}} \left[ \frac{D}{2} + h_{\text{ш}} \right] \sin \frac{2\pi y}{Z_1} \right)^2}. \quad (5)$$

Здесь  $h_{\text{л}}$  – высота паза;  $h_{\text{ш}}$ ,  $b_{\text{л}}$ ,  $b_{\text{ш}}$  указаны на рис. 5б;  $D$  – внутренний диаметр статора;  $y$  – шаг обмотки;  $Z_1$  – число зубцов статора.

Вес меди в обмотке статора для обычной стержневой двухслойной обмотки можно определить:

$$m_{\text{медь}} = \rho S_{\text{ан}} Z_1 u_n (l_{\delta} + l_{\text{л}}). \quad (6)$$

Вес меди компактной обмотки статора предложено определять, зная длины проводников: длины активных  $l_{\delta}$  и лобовых  $l_{\text{л}}$  проводников, а также перемычек уменьшенного сечения, равных высоте основных лобовых проводников  $h_{\text{лн}}$ :

$$m_{\text{медь}} = \rho S_{\text{ан}} Z_1 [u_n (l_{\delta} + l_{\text{л}}) + h_{\text{лн}}]. \quad (7)$$

Методики построения схем и расчета лобовых частей и массы меди обмоток инновационных машин могут быть применены при расчете асинхронных машин с короткозамкнутым и фазным ротором, расчете синхронных машин, расчете машин двойного питания для любого числа полюсов.

## Сравнение размеров и массы меди обмотки статора инновационного генератора с прототипом

Размеры и масса меди обмотки статора многополюсной машины прототипа [21] определялись для варианта петлевой обмотки с жесткими секциями.

Исходные параметры сердечника и обмотки статора многополюсной машины приведены в табл. 1, где размерные величины длины указаны в мм, а площади – в мм<sup>2</sup>.

Таблица 1

Параметры сердечника и обмотки статора электрической машины

$2p$	$Z_1$	$q$	$y$	$w_1$	$u_n$	$D$	$D_a$	$l_\delta$	$\tau$	$t_z$
<b>30</b>	<b>180</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>120</b>	<b>4</b>	<b>307</b>	<b>338</b>	<b>242</b>	<b>32,13</b>	<b>5,43</b>
$\delta$	$h_2$	$h_1$	$h_n$	$h_{ш}$	$b_n$	$b_{ш}$	$B$	$S_{ан}$	$k_{об}$	
<b>0,4</b>	<b>8,1</b>	<b>0,48</b>	<b>9,04</b>	<b>1,9</b>	<b>3,65</b>	<b>1,3</b>	<b>15</b>	<b>5,17</b>	<b>0,9</b>	

Результаты расчета параметров компактной обмотки и их сравнение с результатами расчета параметров обмотки базовой машины (традиционной конструкции) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение результатов расчета параметров электрической машины

Показатель	Базовая машина	Машина с компактной обмоткой	Относительная разница
Вылет лобовых частей $d_{ов}, мм$	<b>64</b>	<b>9,4</b>	<b>85,3 %</b>
Длина лобовых проводников $l_{ов}, мм$	<b>79</b>	<b>36</b>	<b>52,2 %</b>
Вес меди обмотки $Q_{срр}, г$	<b>10634</b>	<b>9270</b>	<b>12,7 %</b>

Результаты расчета позволяют оценить положительный эффект от применения компактной обмотки. Уменьшение вылета лобовых частей дает сокращение размеров корпуса асинхронного генератора, а сокращение длины лобовых частей обмотки приводит к уменьшению длины фазного провода и, соответственно, к уменьшению активных потерь в меди. Упомянутые особенности конструкции компактной обмотки нуждаются в дальнейшем исследовании.

### Выводы

1. Авторами показано, что стандартные методики проектирования не позволяют учесть особенности конструкции компактной обмотки, поэтому необходима разработка новых методик при проектировании инновационных машин.

2. Для проектирования электрических машин с компактными обмотками статора авторами предлагается методика построения специальных торцевых схем обмотки, учитывающих особенности конструкции путем выделения групп активных и лобовых проводников, и схем последовательности соединения проводников компактных обмоток, позволяющих учесть число ветвей в фазе и способы соединения этих ветвей.

3. Предложенные методики применены для построения схем компактной обмотки статора многополюсного асинхронного генератора с четырьмя проводниками в пазу сердечника статора. Даны рекомендации по области применения этих методик для расчета других электрических машин.

4. Выявлены особенности расчета длины фазного провода и вылета лобовых частей компактных обмоток, а также массы меди таких обмоток. Доказано, что в обмотках существенно снижается вылет лобовых частей и длина лобовых проводников, что приводит к экономии меди, уменьшению объема и массы машины. Для тридцатиполюсного асинхронного генератора на базе ТАД 60 кВт экономия меди при изготовлении обмотки статора составляет 12,7 % за счет сокращения длины лобовых проводников на 52,2 %. Уменьшение вылета лобовых частей на 85,3 % позволяет сократить длину асинхронного генератора.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Грачев П.Ю., Костырев М.Л., Мязков Ф.Н., Кунцевич П.А.* Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов // *Электротехника*. – 2005. – № 12. – С. 23–27.
2. *Cheng M., Sun L., Buja G. and. Song L.* Advanced electrical machines and machine-based systems for electric and hybrid vehicles, *Energies*, vol. 9, Oct. 2015, pp. 9541–9564.
3. *Patzak A., Gerling D.* Design of an automotive 48V integrated starter-generator on the basis of an induction machine with concentrated windings, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS, 2014, pp. 2583–2589.
4. *Subotic I., Bodo N., Levi E.* An EV Drive-Train With Integrated Fast Charging Capability, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, Is. 2, Apr. 2015, pp. 1461–147.
5. *Табачинский А.С.* Использование возобновляемых источников энергии для нужд объектов АПК в Саратовской области // *Актуальные проблемы энергетики АПК: VI Междунар. науч.-практ. конф.* Под общ. ред. В.А. Трушкина. – 2015. – С. 289–291.
6. *Bu F., Hu Y., Huang W., Zhuang S., Shi K.* Wide-speed-range-operation dual stator-winding induction generator DC generating system for wind power applications, *IEEE Transactions on Power Electronics* №30 (2), 2015, pp. 561–573.
7. *Livadaru L., Munteanu A., Simion A., Cantemir C.-G.* Design and finite element analysis of high-density torque induction motor for traction applications, 2015, 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2015, 7133766, pp. 211–214.
8. *Васильев Б.Ю., Козярук А.Е.* Повышение эффективности асинхронных электроприводов с прямым управлением моментом // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика*. – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 75–84.
9. *Беспалов В.Я., Кобелев А.С., Кругликов О.В., Макаров Л.Н.* Разработка и освоение производства энергоэффективных асинхронных двигателей массовых серий // *Электротехника*. – 2015. – № 4. – С. 194–200.
10. *Козярук А.Е., Макаров Л.Н., Русаковский А.М.* Концепция разработки электромагнитного ядра асинхронных электродвигателей энергоэффективных серий // *Электротехника*. – 2008. – № 11. – С. 608–613.
11. *Takizawa D., Takahashi T., Shimizu H., Kato R.* Development of transverse flux motor with improved material and manufacturing method SAE, *International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems* 6 (1), 2013, pp. 366–376.
12. *Ishigami T., Tanaka Y., Nomma H.* Motor stator with thick rectangular wire lap winding for HEVs, *IEEE Transactions on Industry Applications* Volume 51, Issue 4, 1 July 2015, pp. 2917–2923.
13. *Грачев П.Ю., Сарапулов Ф.Н., Ежова Е.В.* Обмотка электрической машины. Патент на изобретение *RUS 2275729 15.10.2004*.
14. *Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е.* Энергоэффективная электрическая машина. Патент на изобретение *RUS 2526835 03.08.2012*.
15. *Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е.* Обмотка электрической машины. Патент на изобретение *RUS 2509402 07.08.2012*.
16. *Грачев П.Ю., Горшков Р.Г., Костюченко А.П.* Асинхронная энергоэффективная машина. Патент на изобретение *RUS 2558672 26.11.2013*.
17. *Грачев П.Ю., Макаров Д.В., Горшков Р.Г., Карсаков А.Ю.* Экономичная двухслойная обмотка электрической машины. Патент на изобретение *RUS 2568186 12.03.2014*.

18. *Грачев П.Ю., Стрижакова Е.В., Горбачев Е.Е.* Энергоэффективная электрическая машина с компактными лобовыми частями обмотки. Патент на изобретение RUS 2602511. 10.08.2015.
19. *Грачев П.Ю., Стрижакова Е.В., Горбачев Е.Е., Макаров Д.В.* Энергоэффективная электрическая машина с нетрадиционным электромагнитным ядром. Патент на изобретение RUS 2658903. 5.10.2015.
20. *Grachev P.Yu., Gorbachev E.E., Tabachinskiy A.S.* Power Converters with Compact Winding SCIGs for HEVs, Micro Hydroelectric Power Stations and Wind Turbines International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2016), May 19-20, Chelyabinsk, 2016.
21. *Беспалов В.Я., Красовский А.Б., Панихин М.В., Фисенко В.Г.* Исследование многополюсного асинхронного тягового частотно-регулируемого двигателя // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 5. – С. 295–307.
22. *Грачев П.Ю., Беспалов В.Я., Табачинский А.С., Стрижакова Е.В.* Энергоэффективные асинхронные машины с нетрадиционным электромагнитным ядром // Электротехника. – 2018. – № 2. – С. 7–12.
23. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

*Статья поступила в редакцию 1 декабря 2018 г.*

## SCHEME DESIGN AND CALCULATION FEATURES OF COMPACT WINDINGS IN AC MACHINES

***P.Yu. Grachev, A.S. Tabachinskiy***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper presents the results of scheme design and overhang deviation calculation for original mass-reduced compact windings of induction and synchronous machines. Electrical equipment of autonomous energy units is among the proposed implementations of these innovative machines. Compact winding's turns consist of rectangular conductors with periodically irregular cross-section. This solution allows to decrease material intensity and volume of electrical machines due to reduced overhang deviation. Design methodic of three different types of schemes of the stator compact winding - multipolar induction generator winding are given as an example. Calculation features of overhang deviation and copper mass for compact windings are described. Calculation results can estimate the difference between compact and traditional windings.*

**Keywords:** *AC machine, stator winding, methodic, winding scheme, overhang part, conductor's cross-section, material intensity.*

### REFERENCES

1. *Grachev P.Yu., Kostyrev M.L., Myagkov F.N., Kunceвич P.A.* Многообмоточные преобразователи энергии для автономных объектов // Электротехника. 2005. no. 12. pp. 23-27. (In Russian)
2. *Cheng M., Sun L., Buja G. and Song L.* “Advanced electrical machines and machine-based systems for electric and hybrid vehicles,” *Energies*, vol. 9, Oct. 2015, pp. 9541–9564.
3. *Patzak A., and Gerling D.* “Design of an automotive 48V integrated starter-generator on the basis of an induction machine with concentrated windings,” 17th International Conference on Electrical Machines and Systems ICEMS, 2014, pp. 2583–2589.
4. *Subotic I., Bodo N. and Levi E.* “An EV Drive-Train With Integrated Fast Charging Capability,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, Is. 2, Apr. 2015, pp. 1461–147.
5. *Tabachinskiy A.S.* Ispol'zovanie возобновляемых источников энергии для нужд объектов АПК в Саратовской области // *Aktual'nye problemy energetiki APK VI Mezhdunarodnaya nauchno-*

- prakticheskaya konferenciya. Pod obshchej redakciej Trushkina V.A.. 2015. pp. 289-291. (In Russian)
6. *Bu F., Hu Y., Huang W., Zhuang S. and Shi K.* "Wide-speed-range-operation dual stator-winding induction generator DC generating system for wind power applications," IEEE Transactions on Power Electronics №30 (2), 2015, pp. 561–573.
  7. *Livadaru L., Munteanu A., Simion A. and Cantemir C.-G.* "Design and finite element analysis of high-density torque induction motor for traction applications," 2015, 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2015, 7133766, pp. 211–214.
  8. *Vasil'ev B.Yu., Kozyaruk A.E.* Povyshenie effektivnosti asinhronnykh elektroprivodov s pryamym upravleniem momentom // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. 2013. Vol. 13, issue 2. pp. 75-84. (In Russian)
  9. *Bespalov V.Ya., Kobelev A.S., Kruglikov O.V., Makarov L.N.* Razrabotka i osvoenie proizvodstva energoehffektivnykh asinhronnykh dvigatelej massovykh serij // Elektrotehnika. 2015. no.4. pp. 194–200. (In Russian)
  10. *Kozyaruk A.E., Makarov L.N., Rusakovskij A.M.* Konceptiya razrabotki elektromagnitnogo yadra asinhronnykh elektrodvigatelej energoehffektivnykh serij // Elektrotehnika. 2008. no.11. pp. 608–613. (In Russian)
  11. *Takizawa D., Takahashi T., Shimizu H. and Kato R.* "Development of transverse flux motor with improved material and manufacturing method SAE," International Journal of Passenger Cars – Electronic and Electrical Systems 6 (1), 2013, pp. 366–376.
  12. *Ishigami T., Tanaka Y., and Homma H.* "Motor stator with thick rectangular wire lap winding for HEVs," IEEE Transactions on Industry Applications Volume 51, Issue 4, 1 July 2015, pp. 2917–2923.
  13. *Grachev P.Yu., Sarapulov F.N., Ezhova E.V.* Obmotka elektricheskoy mashiny. Patent na izobretenie RUS 2275729 15.10.2004. (In Russian)
  14. *Grachev P.Yu., Gorbachev E.E.* Energoehffektivnaya elektricheskaya mashina. Patent na izobretenie RUS 2526835 03.08.2012. (In Russian)
  15. *Grachev P.Yu., Gorbachev E.E.* Obmotka elektricheskoy mashiny. Patent na izobretenie RUS 2509402 07.08.2012. (In Russian)
  16. *Grachev P.Yu., Gorshkov R.G., Kostyuchenko A.P.* Asinhronnaya ehnergoehffektivnaya mashina. Patent na izobretenie RUS 2558672 26.11.2013. (In Russian)
  17. *Grachev P.Yu., Makarov D.V., Gorshkov R.G., Karsakov A.Yu.* Ekonomichnaya dvuhslojnaya obmotka elektricheskoy mashiny. Patent na izobretenie RUS 2568186 12.03.2014. (In Russian)
  18. *Grachev P.Yu., Strizhakova E.V., Gorbachev E.E.* Energoehffektivnaya elektricheskaya mashina s kompaktnymi lobovymi chastyami obmotki. Patent na izobretenie RUS 2602511. 10.08.2015. (In Russian)
  19. *Grachev P.Yu., Strizhakova E.V., Gorbachev E.E., Makarov D.V.* Energoehffektivnaya elektricheskaya mashina s netraditsionnym ehlektromagnitnym yadrom. Patent na izobretenie RUS 2658903. 5.10.2015. (In Russian)
  20. *Grachev P.Yu., Gorbachev E.E., Tabachinskiy A.S.* Power Converters with Compact Winding SCIGs for HEVs, Micro Hydroelectric Power Stations and Wind Turbines International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM-2016), May 19-20, Chelyabinsk, 2016.
  21. *Bespalov V.Ya., Krasovskij A.B., Panihin M.V., Fisenko V.G.* Issledovanie mnogopolyusnogo asinhronnogo tyagovogo chastotno-reguliruemogo dvigatelya // Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MG TU im. N.EH. Baumana. 2014. no. 5. pp. 295–307. (In Russian)
  22. *Grachev P.Yu., Bespalov V.Ya., Tabachinskiy A.S., Strizhakova E.V.* Energoehffektivnyye asinhronnye mashiny s netraditsionnym elektromagnitnym yadrom // Elektrotehnika. 2018. no. 2. pp. 7–12. (In Russian)
  23. *Kopylov I.P.* Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov – 4-e izd., ispravlenn. i dop. – M.: Vysshaya shkola, 2005. – 767 p. (In Russian)