

УДК 620.92+621.311+621.548

В. И. ПАНЧЕНКО, Д. В. ЦЫПЛЕНКОВ, М. С. КИРИЧЕНКО, С. И. ФЕДОРОВ, А. Н. ГРЕБЕНЮК**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВКИ С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ МУЛЬТИПЛИКАЦИЕЙ**

В работе розглянуто шляхи поліпшення масогабаритних показників генераторів для вітроустановок з аеродинамічною мультиплікацією та шляхи зменшення маси і вартості обмоток. Пропонується для покращення регулювальних властивостей генераторів, що встановлюються на лопатях вітроелектричної установки (вітроустановка з аеродинамічною мультиплікацією) частину зубців статора виконати скошеними з розташуванням на них обмотки підмагнічення. Запропоновано вирішити проблему безконтактності струмозйому з генераторів за рахунок застосування трифазної асинхронної машини з фазним ротором.

Ключові слова: вітроустановка з аеродинамічною мультиплікацією, синхронний генератор, обмотка статора, асинхронна машина з фазним ротором.

В работе рассмотрены пути улучшения массогабаритных показателей генераторов для ветроустановок с аэродинамической мультипликацией и пути уменьшения массы и стоимости обмоток. Предлагается для улучшения свойств генераторов, которые устанавливаются на лопастях ветроэлектрической установки (ветроустановка с аэродинамической мультипликацией) часть зубцов статора выполнить скошенными с размещением на них обмотки подмагничивания. Предложено решить проблему бесконтактности токосъема с генераторов за счет применения трехфазной асинхронной машины с фазным ротором.

Ключевые слова: ветроустановка аэродинамической мультипликацией, синхронный генератор, обмотка статора, асинхронная машина с фазным ротором.

Purpose. Wind-driven power plants with both horizontal and vertical axis of rotation of wind wheel are usually slow-speed. Therefore used generators are multipole performed to provide a standard frequency of output voltage that leads to a noticeable increase in weight and size of wind turbines. To reduce the weight of generator and to refuse from the use of mechanical multipliers is possible by means of placement of the generators on the blades of the main turbine, usually three-bladed, at some distance from its axis (wind turbine with a dynamic multiplication). Auxiliary wind wheels of small diameter are fixed at the ends of the generator shafts. They are streamlined by ram air flow whose speed is much greater than atmospheric one, causing the rotation of the main wind wheel. As a result, the auxiliary wind wheels will have a considerable frequency of rotation, which allow the use of high-speed electric generators. **Results.** Taking into account the location of these generators, the basic requirements for their construction are as follows: the minimum specific weight and high operation reliability. Furthermore, possibility of output voltage regulation of generators and their low cost should be provided. There have been proposed the improvement ways of weight and size of generators for wind turbines with aerodynamic multiplication and ways to reduce the weight and cost of the windings. It is proposed the part of stator teeth perform beveled with placing on them the field winding to improve the properties of generators, which are installed on the blades of a wind-driven power plant. It is proposed to solve the problem with the contactless current collection from generators through the use of three-phase asynchronous machine with wound rotor.

Keywords: wind turbine with aerodynamic multiplication, synchronous generator, stator winding, and the asynchronous machine with wound rotor.

Введение. Ветроэнергетические установки как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения ветроколеса обычно тихоходные (малооборотные). Поэтому электрогенераторы, используемые в них, для обеспечения стандартной частоты выходного напряжения выполняются многополюсными, что приводит к заметному увеличению массы и габаритов ветроустановок. Высокооборотные электрические генераторы, имеющие значительно меньшие массы, требует применения механических мультипликаторов (обычно двухступенчатых), что опять же увеличивает общую массу и габариты силовой части ветроустановки и уменьшает надежность ее работы.

Снизить массу генераторов и отказаться при этом от использования механических мультипликаторов возможно, как это предложено в работе [1], размещением генераторов на лопастях основного ветроколеса, обычно трехлопастного, на некотором расстоянии от его оси (ветроустановка с аэродинамической мультипликацией). На концах валов генераторов закрепляют вспомогательные ветроколеса небольшого диаметра, которые обтекаются набегающим потоком воздуха, скорость движения которого существенно больше скорости атмосферного, вызывающего вращение основного ветроколеса. В результате этого вспомогательные ветроколеса будут иметь значительную частоту вращения, что позволит использовать

высокооборотные электрогенераторы. Учитывая местоположение этих генераторов, основные требования к их конструкции будут такими: минимальная удельная масса и высокая надежность работы. Кроме того, необходимо обеспечить возможность регулирования выходного напряжения генераторов и низкую их стоимость. Размещение генераторов на лопастях вынуждает использовать токосъемники, устанавливаемые в гондоле ветроустановки. Так как генераторы обычно низковольтные, то их номинальные токи при мощностях более 100 кВт·А будут значительными и, соответственно, контактные токосъемники, как наиболее простые по конструкции, будут громоздкими и тяжелыми, к тому же снижающими надежность работы ветроустановки.

Цель работы. Рассмотреть требования к конструкции и массогабаритным показателям электрических генераторов ветроустановки с аэродинамической мультипликацией и обосновать возможность применения асинхронной машины с фазным ротором в качестве токосъемника.

Основной материал работы. Рассмотрим конструкции электрогенераторов на предмет их пригодности к размещению на лопастях ветроколеса. Синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением имеют значительную удельную массу, сравнительно сложную конструкцию и малую

© В.И. Панченко, Д.В. Цыпленков, М. С. Кириченко, С. И. Федоров, А. Н. Гребенюк, 2016

надежность работы из-за явнополюсной конструкции ротора и наличия скользящих контактов в цепи обмотки возбуждения. Использование таких генераторов на лопастях ветроколеса малоперспективно, хотя они позволяют сравнительно просто регулировать величину выходного напряжения.

Синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов имеют малую удельную массу и высокий коэффициент полезного действия, но сравнительно низкую надежность работы. Последнее вызвано, во-первых, трудностью крепления магнитов на вращающемся роторе, во-вторых, конструкцией традиционных обмоток статора, имеющих сложные лобовые части со значительной осевой длиной. Это затрудняет их крепление, учитывая значительные динамические усилия, действующие на них при вращении лопастей ветроколеса, и увеличивает расход меди. Также нужно учитывать высокую стоимость современных высокоэнергетических магнитов и невозможность регулирования величины выходного напряжения в таких генераторах.

Известно использование синхронных индукторных генераторов в ветроустановках с генераторами на лопастях ветроколеса [2]. Такие генераторы бесконтактные, обмотка возбуждения в них неподвижна, ротор конструктивно прост и не имеет обмотки. Статор снабжен зубцовой обмоткой, т.е. на каждом зубце магнитопровода размещена одна из катушек такой обмотки. Лобовые части здесь имеют малую осевую длину (длину вылета), а сама обмотка надежно фиксируется в пазах магнитопровода. Генератор позволяет сравнительно просто регулировать выходное напряжение, надежный в работе, но имеет значительную удельную массу и повышенный расход проводникового материала.

Соотношение между числами зубцов статора Z_1 и ротора Z_2 в работе [2] принято таким: $Z_1 = 2Z_2 + K$, где $K = 1, 2, 3$, причем $Z_2 = p$, т.е. равно числу пар полюсов генератора. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{2p + K}{2pm} = \frac{1}{m} + \frac{K}{2p},$$

где m – число фаз.

Так, при $Z_2 = 8$, $K = 2$ и $m = 3$, имеем $q = \frac{1}{3} + \frac{2}{2 \cdot 8 \cdot 3} = 0.375$. При таком значении q коэффициент дифференциального расстояния $K_\sigma = 1.2$, т.е. значительно превышает его величину для обмоток с $q > 1$, что в итоге приведет к значительному падению напряжения в обмотке при номинальной нагрузке генератора.

Возможно использование асинхронных генераторов, которые обычно снабжены короткозамкнутым ротором (простым по конструкции, дешевым и надёжным в работе) и статором с трехфазной обмоткой. Удельная масса таких генераторов сравнительно невелика, но использованию их на лопастях ветроколеса мешает, как и в случае генераторов с постоянными магнитами,

проблема с креплением лобовых частей обмотки статора. При использовании таких генераторов в большинстве случаев необходимы электрические конденсаторы, подключаемые обычно к выводам обмотки статора, что можно сделать после токоъемника и, следовательно, не увеличивать массу оборудования, размещаемого на лопастях ветроколеса. При параллельной работе с сетью асинхронные генераторы взаимодействуют с ней лучше, чем синхронные, особенно при переменной скорости ветрового потока.

Рассмотрим возможность использования в асинхронных генераторах зубцовой обмотки. В работе [3] предложена такая обмотка для трехфазной машины переменного тока с когтеобразными зубцами в количестве $9p$ на статоре. Первая катушечная группа фазы такой обмотки состоит из трёх катушек, расположенных на зубцах 2, 3 и 4 (рис. 1, фаза А) с соотношением чисел витков в катушках 1:3:1. Вторая катушечная группа (на следующем полюсном делении) состоит из двух катушек с соотношением чисел витков в них 2:2, расположенных через два зубцовых деления от первой группы (рис. 1, фаза А, зубцы 7 и 8). Обмотка [3] по утверждению авторов эквивалентна по создаваемой ею магнитодвижущей силе (МДС) двухслойной петлевой обмотке с числом пазов на полюс и фазу $q = 1,5$ и относительным шагом

$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{4}{4,5}$. Коэффициент дифференциального рассеяния для такой обмотки $K_\sigma = 0,04$. Указанная обмотка имеет малую длину вылета лобовых частей.

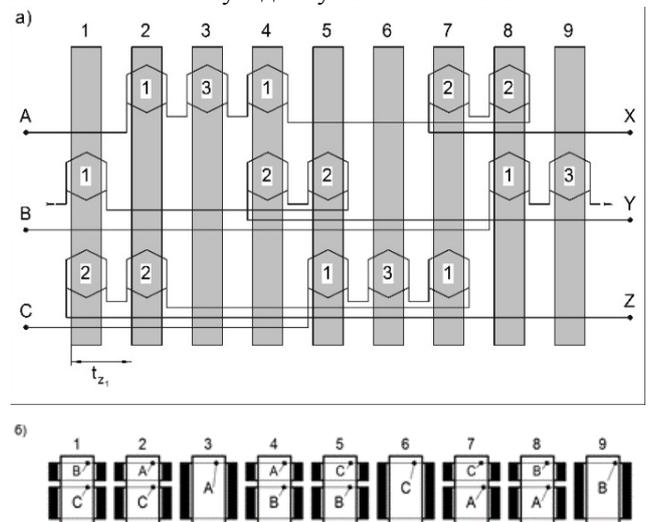


Рис. 1 – Схема трехфазной обмотки с катушками на каждом зубце магнитопровода (а) и поперечное сечение зубцовой зоны статора (б)

Рассмотрим возможность использования такой обмотки для электрических машин с цилиндрическим шихтованным магнитопроводом статора. При этом на двух полюсных делениях, на зубцах 3, 6 и 9 магнитопровода, будет размещено по одной катушке каждой из фаз (рис. 1, б) с числом витков, которые обозначим как $3W_{K1}$. На других зубцах расположено по две катушки разных фаз, причем в нижней части

пазов-катушки с числом витков $2W_{K1}$, а в верхней части – с числом витков W_{K1} .

Определим объем проводникового материала, расходуемого на выполнение обмотки. Примем, что каждая фаза на протяжении двух полюсных делений состоит из девяти условных катушек, каждая с числом витков W_{K1} . Тогда число витков фазы будет: $W_{\phi 1} = 9pW_{K1}$. Запишем выражение для электродвижущей силы (ЭДС) фазы:

$$E_1 = 4.44fW_{\phi 1}K'_{o\phi 1}\Phi,$$

где f – частота ЭДС;

$K'_{o\phi 1} = K'_{p1}K'_{y1}$ – коэффициенты, соответственно, обмоточный, распределения и укорочения для основной гармонической ЭДС; Φ – магнитный поток полюса.

Коэффициент укорочения $K'_{y1} = \sin \frac{y}{\tau} \cdot 90^\circ$,

где $\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{9p}{2p} = 4.5$ – полюсное деление;

y – относительная ширина катушки.

Реальная ширина катушки равна зубцовому делению $t_{z1} = \frac{\pi D}{Z_1}$,

где D – диаметр расточки, следовательно, относительная ширина $y = 1$ и

$$K'_{y1} = \sin \frac{1}{4.5} \cdot 90^\circ = 0.342.$$

Для определения коэффициента K_{p1} используем звезду пазовых ЭДС обмотки (рис. 2). Фазовый сдвиг ЭДС соседних пазов (зубцов) $\alpha = \frac{2\pi p}{Z_1} = \frac{2\pi p}{9p} = 40$ эл. градусов. Количество векторов ЭДС на двойном полюсном делении равно $\frac{360^\circ}{40^\circ} = 9$. Из рис. 2, учитывая соотношение витков в катушках и последовательно – встречное соединение катушек соседних полюсных делений, следует

$$K'_{p1} = \frac{3 + 2 \cdot 2 \cos 20^\circ + 2 \cos 40^\circ}{9} = 0.921$$

$$K'_{o\phi 1} = 0.342 \cdot 0.921 = 0.315$$

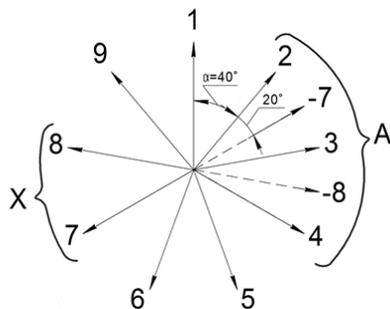


Рис. 2 – Звезда пазовых ЭДС обмотки

Средняя длина одного витка катушки согласно

[4] равна

$$\ell_{cp1} \approx 2(\ell + b_{z1}) + \pi b_K,$$

где ℓ – длина магнитопровода статора; b_{z1} , b_K – соответственно, ширина зубца и толщина катушки, причем $b_K \approx 0.5b_{z1}$, $b_{z1} \approx 0.5t_{z1}$.

Тогда

$$\ell_{cp1} = 2\ell \left(1 + 0.893 \frac{t_{z1}}{\ell} \right).$$

Учитывая, что $\frac{t_{z1}}{\ell} = \frac{\pi D}{Z_1 \ell} = \frac{\pi}{Z_1 \lambda}$, где $\lambda = \frac{\ell}{D}$,

примем, согласно [4] $\lambda = 0.8$; получим $\frac{t_{z1}}{\ell} = \frac{3.925}{Z_1}$ и

$$\ell_{cp1} = 2\ell \left(1 + \frac{3.5}{Z_1} \right) = 2\ell \left(1 + \frac{3.5}{9p} \right) = 2K_1 \ell,$$

где $K_1 = \left(1 + \frac{3.5}{9p} \right)$.

Длина провода фазной обмотки при одной параллельной ветви в ней

$$\ell_{np1} = 9pW_{K1}\ell_{cp1}. \quad (1)$$

Длина вылета лобовой части $\ell_{\phi 1}$ обмотки несколько превышает толщину катушки, а именно

$$\ell_{\phi 1} = 1.2b_K = 1.2 \cdot 0.25t_{z1} = 0.3t_{z1}. \quad (2)$$

Сравним показатели обмотки по рис. 1 с такими же для обычной двухслойной петлевой обмотки. Средняя длина витка катушки последней

$$\ell_{cp} = 2(\ell + \ell_n) = 2\ell \left(1 + \frac{\ell_n}{\ell} \right),$$

где ℓ_n – средняя длина одной лобовой части. Согласно [5] для электрических машин с катушками из прямоугольного провода

$$\ell_n = K_n b_{cp} + 2B + h_n, \text{ мм}$$

где $K_n = 1.16$ – коэффициент, $b_{cp} = \frac{\pi(D + h_n)}{2p}\beta$ –

средняя ширина катушки, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высот пазов, h_n – высота паза; β – относительный шаг катушки; D – длина вылета прямолинейной части катушки из паза; $D = 25 \text{ мм}$ при напряжении машины $U \leq 660 \text{ В}$.

Запишем, с учетом того, что $D = \frac{2p\tau}{\pi}$,

$$b_{cp} = \frac{\pi D}{2p} \left(1 + \frac{h_n}{D} \right) \beta = \tau \left(1 + \frac{\pi}{2p} \cdot \frac{h_n}{\tau} \right) \beta = \tau \left(1 + \frac{0.4}{p} \right) \beta = K_2 \beta \tau$$

где $K_2 = \left(1 + \frac{0.4}{p} \right)$.

В последнем соотношении, исходя из экономических и технических соображений, принято $\frac{h_n}{\tau} = 0.25$ [4].

Далее

$$\ell_{\text{н}} = \left(K_{\text{н}} K_2 \beta + \frac{2B}{\tau} + \frac{h_{\text{н}}}{\tau} \right) \tau = \left(K_{\text{н}} K_2 \beta + 0,25 + \frac{2B}{\tau} \right) \tau$$

Запишем соотношение для полюсного деления в виде $\tau = mqt_{z1}$. Согласно рекомендации [5] для машин, мощностью более 100 кВт значение $t_{z1} = (20 \div 25)$ мм. Тогда, при $m = 3$, $q = 1.5$ и $t_{z1} = 25$ мм получим $\tau = 3 \cdot 1.5 \cdot 25 = 112.5$ мм. Отношение $\frac{2B}{\tau} = \frac{2 \cdot 25}{112.5} = 0.44$. Приняв $\beta = 0.833$ и $\frac{\tau}{\ell} = 0.65$ получим:

$$\ell_{\text{н}} = (0,96K_2 + 0,25 + 0,44)\tau = 0,65(0,96K_2 + 0,69)\ell$$

и окончательно:

$$\ell_{\text{ср}} = 2\ell[1 + 0,65(0,96K_2 + 0,69)] = 2K_3\ell$$

где K_3 соответствует выражению в квадратных скобках в последней формуле.

Длина провода фазной обмотки при одной параллельной ветви в ней

$$\ell_{\text{нр}} = W_{\phi} \ell_{\text{ср}} = 2K_3 \ell W_{\phi} \quad (3)$$

Длина вылета лобовой части обмотки согласно [5]:

$$\ell_{\text{с}} = K_{\text{с}} b_{\text{ср}} + B + 0,5h_{\text{н}}$$

где $K_{\text{с}} = 0.29$ – коэффициент.

После преобразований последнего соотношения получим

$$\ell_{\text{с}} = 0.6\tau \quad (4)$$

При сравнении затрат проводникового материала на изготовление обмоток, примем расчетные мощности $P' = 3E_1 I_1$ сравниваемых генераторов одинаковыми. Здесь E_1, I_1 – ЭДС и ток фазы, причем

$$I_1 = j_1 S_{\text{нр}}$$

где j_1 – плотность тока, $S_{\text{нр}}$ – поперечное сечение проводника.

Считаем одинаковыми величины ЭДС, плотности тока, длину магнитопроводов статора и диаметры расточки. Фазная ЭДС генератора с обычной обмоткой $E = 4.44fW_{\phi} K'_{\text{об1}} \Phi$, $K'_{\text{об1}}$ – обмоточный коэффициент. Из равенства $E = E_1$ получим $W_{\phi} K'_{\text{об1}} = 9W_{K1} K'_{\text{об1}} P$, откуда

$$W_{K1} = \frac{W_{\phi} K'_{\text{об1}}}{9K'_{\text{об1}} P} = \frac{W_{\text{н}} p q K'_{\text{об1}}}{9K'_{\text{об1}} P} = \frac{W_{\text{н}} q K'_{\text{об1}}}{9K'_{\text{об1}} P} \quad (5),$$

где $W_{\text{н}}$ – число проводников обычной обмотки в одном пазу. Примем $K'_{\text{об1}} = 0,92$, тогда

$$W_{K1} = \frac{1.5 \cdot 0.92}{9 \cdot 0.315} W_{\text{н}} = 0.487 W_{\text{н}}$$

и число проводников в одном пазу обмотки по рис. 1 будет $W_{\text{н1}} = 3W_{K1} = 1.46W_{\text{н}}$, что вынудит при данном диаметре расточки увеличить высоту паза и,

соответственно, внешний диаметр магнитопровода статора.

Сравним длину проводов фазных обмоток, обычной и по рис. 1. Запишем отношение

$$\frac{\ell_{\text{нр1}}}{\ell_{\text{нр}}} = \frac{18pW_{K1}K_1\ell}{2W_{\phi}K_3\ell}$$

и, далее, учитывая соотношение (5),

$$\frac{\ell_{\text{нр1}}}{\ell_{\text{нр}}} = \frac{K_1 K'_{\text{об1}}}{K_3 K'_{\text{об1}}}$$

При $p = 8$ отношение

$$\frac{\ell_{\text{нр1}}}{\ell_{\text{нр}}} = \frac{(1 + \frac{3,5}{9 \cdot 8})^{0,92}}{[1 + 0,65 \cdot (0,96 \cdot 1,05 + 0,69)]^{0,315}} = \frac{0,965}{0,662} = 1,46$$

Сравним длины вылета лобовых частей обмоток. Для обмотки по рис. 1 $\tau = 4,5t_{z1}$; длина вылета обычной обмотки с указанным τ будет: $\ell_{\text{с}} = 0.6 \cdot 4.5t_{z1} = 2.7t_{z1}$.

Отношение длин $\frac{\ell_{\text{с1}}}{\ell_{\text{с}}} = \frac{0.3t_{z1}}{2.7t_{z1}} = 0.11$. По другому:

$$\ell_{\text{с}} = 9\ell_{\text{с1}}$$

Итак, при одинаковых плотностях тока и поперечных сечениях проводов, обмотка по рис. 1 будет иметь увеличенный в 1,46 раз объем по сравнению с обычной, но значительно меньшую длину вылета лобовых частей. Последнее позволит уменьшить осевой размер машины и, соответственно, расход материалов на изготовления вала и корпуса.

В работе [6] предложен усовершенствованный вариант обмотки по рис. 1, согласно которому первая катушечная группа каждой из фаз состоит из двух катушек (вместо трех), первая из них с числом W_{K2} охватывает три соседних зубца - 2, 3, и 4 (рис. 3) и размещена в нижней части соответствующих пазов магнитопровода; вторая – с числом витков $2W_{K2}$ охватывает средний из указанных зубцов и размещена в верхней части соответствующих пазов. Вторая катушечная группа каждой из фаз состоит из одной катушки с числом витков $2W_{K2}$, которая охватывает два соседних зубца - 7 и 8 (рис. 3) и размещена в верхней части соответствующих пазов. По распределению МДС в воздушном зазоре машины обмотки по рис. 1 и рис. 3 идентичны.

Определим затраты проводникового материала на выполнение обмотки по рис. 3, учитывая, что на протяжении двух полюсных делений в состав каждой фазной обмотки входят 5 условных катушек различной ширины, но с одинаковым числом витков W_{K2} . ЭДС фазы обмотки по рис. 2

$$E_2 = 4.44fW_{\phi 2} K''_{\text{об1}} \Phi$$

где $W_{\phi 2} = 5pW_{K2}$ – число витков фазы; $K''_{\text{об1}} = K''_{p1} \cdot K''_{y1}$ – обмоточный коэффициент, причем

$K'_{p1} = 1.0$, что следует из анализа звезды пазовых ЭДС (рис. 3); $K''_y = \frac{1}{5} [K_{y(1)} + 2(K_{y(2)} + K_{y(3)})]$ – средний коэффициент укорочения, где $K_{y(1)}$, $K_{y(2)}$, $K_{y(3)}$ – коэффициенты укорочения катушек, соответственно, шириной $3t_{z1}$; $1t_{z1}$; $2t_{z1}$, или в относительных единицах $y_1 = 3$, $y_2 = 1$, $y_3 = 2$.

Значения коэффициентов:

$$K_{y(1)} = \sin \frac{y_1}{\tau} 90^\circ = \sin \frac{3}{4.5} 90^\circ = 0.87 ;$$

$$K_{y(2)} = \sin \frac{1}{4.5} 90^\circ = 0.342 ;$$

$$K_{y(3)} = \sin \frac{2}{4.5} 90^\circ = 0.64.$$

$$K''_{o\phi 1} = K''_{y1} = \frac{0.87 + 2(0.342 + 0.64)}{5} = 0.567$$

Из условия равенства фазных ЭДС E и E_2 обмоток получим

$$W_\phi K_{o\phi 1} = 5W_{K2} K''_{y1} p ,$$

откуда число витков условной катушки

$$W_{K2} = \frac{W_\phi K_{o\phi 1}}{5K''_{y1} p} = \frac{W_n q K_{o\phi 1}}{5K''_{y1}} = \frac{1.5 \cdot 0.92 \cdot W_n}{5 \cdot 0.567} = 0.487 W_n \quad (6)$$

т.е. такое же, как и в условной катушке обмотки по рис. 1.

По высоте паза, хотя и в разных пазах, расположены три условных катушки с числом витков W_{K2} (рис. 3, б), что соответствует числу проводников в одном пазу

$$W_{n2} = 3W_{K2} = 3 \cdot 0.487 W_n = 1.46 W_n .$$

Следовательно размеры пазов статора при выполнении обмотки по рис. 1 и рис. 3 будут одинаковыми, но в последнем случае в $\frac{2}{3}$ числа пазов по их высоте размещено две условных катушки с числом витков W_{K2} , а в $\frac{1}{3}$ пазов – одна катушка с таким же числом витков.

Длина провода фазной обмотки по рис. 3 при одной параллельной ветви в ней

$$\begin{aligned} \ell_{np2} &= 5pW_{K2}\ell_{cp2} = \\ &= 5pW_{K2} \left[\frac{\ell_{K1} + 2(\ell_{K2} + \ell_{K3})}{5} \right] = 5pW_{K2}\ell_{cp2} , \end{aligned}$$

где ℓ_{cp2} – часть последней формулы в квадратных скобках; ℓ_{K1} , ℓ_{K2} , ℓ_{K3} – средняя длина витка катушек шириной, соответственно, $3t_{z1}$, $1t_{z1}$ и $2t_{z1}$, причем

$$\begin{aligned} \ell_{K1} &= \ell_{cp1} + 2t_{z1} = 2\ell \left(1 + 0.893 \frac{t_{z1}}{\ell} \right) + 2t_{z1} = \\ &= 2\ell \left(1 + 1.893 \frac{t_{z1}}{\ell} \right) \end{aligned}$$

$$\ell_{K2} = \ell_{cp1} = 2\ell \left(1 + 0.893 \frac{t_{z1}}{\ell} \right)$$

$$\ell_{K3} = \ell_{cp1} + t_{z1} = 2\ell \left(1 + 1.393 \frac{t_{z1}}{\ell} \right)$$

Средняя длина витка группы катушек на двойном полном делении

$$\begin{aligned} \ell_{cp2} &= 2\ell \left(1 + 1.3 \frac{t_{z1}}{\ell} \right) = 2\ell \left(1 + \frac{5.07}{Z_1} \right) = \\ &= 2\ell \left(1 + \frac{0.56}{p} \right) = 2\ell K_4 , \end{aligned}$$

где $K_4 = 1 + \frac{0.56}{p}$.

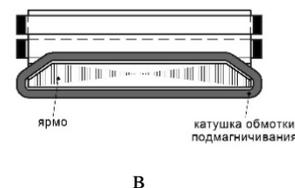
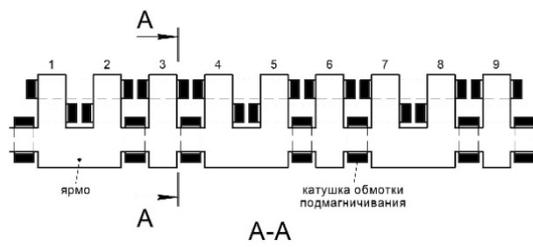
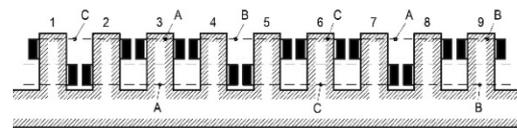
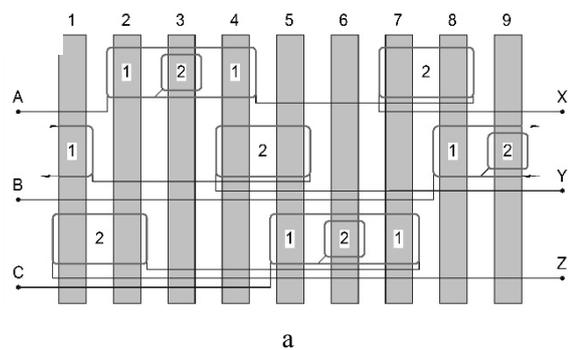


Рис. 3 – Усовершенствованная трехфазная обмотка а – схема; б – поперечное сечение зубцовой зоны статора; в – поперечное сечение с обмоткой подмагничивания

Длина проводника фазной обмотки

$$\ell_{np2} = 10pW_{K2}\ell K_4 \quad (7)$$

Сравним длины проводов фазных обмоток, обычной и выполненной по рис. 3. Отношение длин:

$$\frac{\ell_{np2}}{\ell_{np}} = \frac{10pW_{K2}\ell K_4}{2\ell K_3W_{cp}}$$

Подставив в последнюю формулу соотношение (6), получим

$$\frac{\ell_{np2}}{\ell_{np}} = \frac{K_4K_{об1}}{K_3K_{y1}''}$$

Для генератора с $p = 8$ отношение

$$\frac{\ell_{np2}}{\ell_{np}} = \frac{\left(1 + \frac{0.56}{8}\right)0.92}{[1 + 0.65(0.96 \cdot 1.05 + 0.69)]0.567} = \frac{0.984}{1.193} = 0.82$$

Следовательно, трехфазная обмотка по схеме рис. 3 позволит уменьшить расход проводникового материала по сравнению с обычной обмоткой почти на 20%. При этом, как и в обмотке по схеме рис. 1, упрощаются лобовые части и уменьшается длина их вылета, что обеспечит надежную фиксацию этих частей, учитывая воздействие на обмотку внешних значительных динамических нагрузок.

Из рис. 3, б видно, что пазы магнитопровода статора по их высоте не полностью заняты проводами обмотки. Свободное пространство пазов можно использовать для интенсификации охлаждения лобовых частей или для укладки в нижнюю часть пазов (рис. 3, в) проводов обмотки подмагничивания, обхватывающей ярмо магнитопровода и питаемой постоянным током. Изменяя величину тока в обмотке, можно влиять на значение эффективной магнитной проницаемости ярма статора и таким образом изменять общее магнитное сопротивление на пути рабочего магнитного потока и, следовательно, величину ЭДС генератора. Для реализации такого способа регулирования необходимо сделать дополнительные пазы во внешней части магнитопровода, а основные пазы в их концевых зонах по оси выполнить со скосом в сторону внешнего диаметра (рис. 3, в).

Проблема бесконтактности токосъема с обмоток статора генераторов, расположенных на лопастях ветроколеса, одновременно с повышением выходного напряжения ветроустановки решена в работе [7], где предложено в качестве токосъемника использовать трехфазную асинхронную машину (АМ) с фазным ротором. Вал машины со стороны ветроколеса выполнен полым и соединен с валом последнего с помощью полумуфт. В магнитопроводе ротора в одних и тех же пазах размещены три одинаковые трехфазные обмотки, соединенных каждая по схеме «звезда», и начала которых подключены к выводам трехфазных обмоток соответствующих генераторов. Статор асинхронной машины снабжен обычной трехфазной обмоткой, выводы которой посредством выключателя соединены с линией электропередачи. Соотношение числа витков каждой из обмоток ротора и фазной обмотки статора выбрано таким, чтобы получить выходное напряжение АМ на уровне 6,3 или 10 кВ. Корпус АМ предлагается сделать герметичным,

а внутреннее пространство его заполнить электроизоляционной жидкостью с целью интенсификации охлаждения обмоток.

После синхронизации генераторов на лопастях с внешней системой электроснабжения частота ЭДС и токов в их обмотках будет такой

$$f_z = \frac{p_z n_z}{60},$$

где p_z, n_z – число пар полюсов и частота вращения роторов, которая одинакова для всех генераторов, так как вспомогательные ветроколеса находятся в одинаковых условиях по отношению к встречному потоку воздуха. Взаимный фазовый угол токов в обмотках генераторов после их синхронизации равен нулю. Указанные токи, протекая по обмоткам ротора АМ, создают магнитный поток, вращающийся относительно ротора с частотой вращения

$$n_n = \frac{60f_z}{p} = \frac{p_z n_z}{p},$$

где p – число пар полюсов АМ.

Сам ротор вращается ветроколесом с частотой вращения n_K , причем направления вращения ротора и его магнитного потока совпадают. Частота пересечения этим потоком обмотки статора АМ будет равна $n = n_n + n_K$, а частота наводимой в этой обмотке ЭДС

$$f = \frac{pn}{60} = f_z + f_K,$$

где $f_K = \frac{pn_K}{60}$ – составляющая, вызванная вращением основного ветроколеса.

Действующее значение фазной ЭДС

$$E = 4.44fW_{\phi}K_{об1}\Phi = 4.44W_{\phi}K_{об}\Phi(f_z + f_K) = E_z + E_K,$$

где E_z, E_K – составляющее ЭДС, вызванные, соответственно, вращением вспомогательного и основного ветроколеса.

При частоте вращения вспомогательных ветроколес $n_z = 375$ об/мин частота ЭДС генераторов $f = 50$ Гц обеспечивается при $p_z = 8$. При использовании АМ в качестве бесконтактного токосъемника и при частоте вращения основного ветроколеса $n_K = 28$ об/мин для обеспечения той же частоты выходного напряжения частота ЭДС генераторов должна быть такой: $f_z = f - f_K$ и соответственно частота вращения их роторов $n'_z = \frac{60f_z}{p_z} = \frac{60f}{p_z} + \frac{p}{p_z}n_z$. При $p = 2$, $p_z = 8$ получим $n'_z = \frac{60 \cdot 50}{8} - \frac{2 \cdot 28}{8} = 375 - 7 = 368$ об/мин или $n'_z = 0,98n_z$, т.е. вклад от вращения основного ветроколеса в создание выходного напряжения и суммарной мощности ветроустановки составит в данном случае около 2%. Следовательно, асинхронная машина в составе ветроустановки с генераторами на

лопастях основного ветроколеса практично виконує функції бесконтактного токоємника і трансформатора, підвищуючого вихідне напруга. При цьому конденсаторні установки, як джерела реактивної потужності, слід включати на виході обмотки статора АМ, що дозволить зменшити ємність і габарити таких установок.

Висновки. 1. Розглянуті вимоги до конструкції і до масогабаритним показателям електричних генераторів, встановлюваних на лопастях основного ветроколеса.

2. Проведено розрахунок витрат провідникового матеріалу на виконання обмоток статора: звичайної двохшляхової петлевої і двох варіантів зубцової обмотки. В першому варіанті котушки обмотки мають однакову ширину, але різне число витків; в другому – котушки різні по ширині і з різним числом витків. Показано, що виконання зубцової обмотки по другому варіанту забезпечує зменшення витрат провідникового матеріалу (приблизно на 20 %) порівняно з звичайною обмоткою.

3. Показано, що при виконанні зубцової обмотки по другому варіанту можливо введення в конструкцію статора подмагнічуваної обмотки, забезпечуючої регулювання вихідного напруга генератора.

4. Рекомендовано в якості бесконтактного токоємника для генераторів на лопастях використовувати асинхронну машину з фазним ротором, розташовану в гондолі ветроустановки.

Список літератури:

1. Голубенко М. С. Пат. 49970, UA. Вітродвигун / М. С. Голубенко, О. Л. Кадацький, В. С. Легеза та ін. – 2002.
2. Голубенко Н. С. Сравнительный анализ характеристик индукторных синхронных генераторов с синхронными

генераторами на постоянных магнитах для ВЭУ малой и большой мощности / Н. С. Голубенко, О. Б. Довгало, В. И. Панченко и др. // Материалы XI международной конференции «Возобновляемая энергетика XXI века». АР Крым, 2010. – С. 258-260.

3. Лушчик В. Д., Асанбаев В. Н. А. с. 1684868, СССР. Трехфазная 2p-полосная машина / В. Д. Лушчик, В. Н. Асанбаев. – 1991.
4. Постников И. М. Проектирование электрических машин / И. М. Постников. – К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1960. – 910 с.
5. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, П. В. Морозник и др. – М.: Высш. шк., 2002. – 757 с.
6. Панченко В. И. Патент 95545, UA. Тривафазна 2p-полосна електрична машина / В. И. Панченко. – 2011.
7. Панченко В. И., Кириченко М. С., Федоров С. И. Патент 107740, UA. Вітроенергетична установка / В. И. Панченко, М. С. Кириченко, С. И. Федоров. – 2015.

References (transliterated):

1. Holubenko M. S., Kadats'kyu O. L., Leheza V. S. ta in. *Vitrodvyhyn* [The wind turbine]. Patent UA, no. 49970, 2002.
2. Golubenko N. S., Dovhalyuk O. B., Panchenko V. I. i dr. Sravnitel'nyj analiz harakteristik induktornyh sinhronnyh generatorov s sinhronnymi generatorami na postojannyh magnitah dlja VEU maloj i bol'shoj moshhnosti [Comparative analysis of the characteristics of the inductor synchronous generators with synchronous generators with permanent magnets for low and high power wind turbines]. *Materialy XI mezhdunarodnoj konferencii «Vozobnovljaemaja energetika XXI veka»*. [Proc. of the Int. Conf. "Renewable Energy of XXI century"]. AR Krym, 2010, pp. 258-260.
3. Lushhik V. D., Asanbaev V. N. *Trehfaznaja 2p-poljuznaja mashina* [Three-phase 2p-pole machine]. A. s. SSSR, no. 1684868, 1991.
4. Postnikov I. M. *Proektirovanie elektricheskij mashin* [The design of electrical machines]. Kiev, Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehnichekoj literatury USSR Publ., 1960, 910 p.
5. Kopylov I. P., Klokov B. K., Moroznik P. V. *Proektirovanie elektricheskij mashin* [The design of electrical machines]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2002. 757 p.
6. Panchenko V. I. *Tryfazna 2p-polyusna elektrichna mashyna* [Three-phase 2p-pole machine]. Patent UA, no. 95545, 2011.
7. Panchenko V. I., Kyrychenko M. S., Fedorov S. I. *Vitroenergetichna ustanovka* [Wind power turbine]. Patent UA, no. 107740, 2015.

Поступила (received) 26.08.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Усовершенствование конструкции генераторов для ветроустановки с аэродинамической мультипликацией / В. И. Панченко, Д. В. Цыпленков, М. С. Кириченко, С. И. Федоров, А. М. Гребенюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 102–109. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Усовершенствование конструкции генераторов для ветроустановки с аэродинамической мультипликацией / В. И. Панченко, Д. В. Цыпленков, М. С. Кириченко, С. И. Федоров, А. М. Гребенюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 102–109. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2409-9295.

Improving the generators design for wind turbine with aerodynamic multiplication / V. I. Panchenko, D. V. Tsyplenkov, M. S. Kyrychenko, S. I. Fedorov, A. M. Grebeniuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 102–109. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Панченко Віктор Іванович – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», доцент кафедри відновлюваних джерел енергії, м. Дніпропетровськ; тел.: (056) 373-07-43; e-mail: nmu.em@ua.fm

Панченко Виктор Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», доцент кафедры возобновляемых источников энергии, г. Днепропетровск; тел.: (056) 373-07-43; e-mail: nmu.em@ua.fm

Panchenko Viktor Ivanovych – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Associate Professor at the Department of Renewable Energy Sources, Dnipropetrovsk; tel.: (056) 373-07-43; e-mail: nmu.em@ua.fm

Цыпленков Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук (Ph. D.), доцент, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», доцент кафедри відновлюваних джерел енергії; тел.: (056) 373-07-43; e-mail: nmu.em@ua.fm

Цыпленков Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук (Ph. D.), доцент, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», доцент кафедры возобновляемых источников энергии, г. Днепропетровск; тел.: (056) 373-07-43; e-mail: nmu.em@ua.fm

Tsyplenkov Dmytro Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), State Higher Educational Institution “National Mining University”, Associate Professor at the Department of Renewable Energy Sources, Dnipropetrovsk; tel.: (056) 373-07-43; e-mail: nmu.em@ua.fm

Кириченко Марина Сергіївна – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», асистент кафедри відновлюваних джерел енергії, м. Дніпропетровськ; тел.: (056) 373-07-70; e-mail: maryna_kyrychenko@mail.ru

Кириченко Марина Сергеевна – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», ассистент кафедры возобновляемых источников энергии, г. Днепропетровск; тел.: (056) 373-07-70; e-mail: maryna_kyrychenko@mail.ru

Kyrychenko Maryna Serhiyivna – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Assistant Lecturer at the Department of Renewable Energy Sources, Dnipropetrovsk; (056) 373-07-70; e-mail: maryna_kyrychenko@mail.ru

Федоров Сергій Іванович – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», старший викладач кафедри відновлюваних джерел енергії, м. Дніпропетровськ; тел.: (066) 286-67-74; e-mail: sif965@gmail.com

Федоров Сергей Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», старший преподаватель кафедры возобновляемых источников энергии, г. Днепропетровск; тел.: (066) 286-67-74; e-mail: sif965@gmail.com

Fedorov Serhiy Ivanovych – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Senior Lecturer at the Department of Renewable Energy Sources, Dnipropetrovsk; (066) 286-67-74; e-mail: sif965@gmail.com

Гребенюк Андрій Миколайович – кандидат технічних наук (Ph. D.), доцент, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», доцент кафедри відновлюваних джерел енергії; тел.: (056) 373-07-70; e-mail: andreynmu@mail.ru

Гребенюк Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», доцент кафедры возобновляемых источников энергии, г. Днепропетровск; тел.: (056) 373-07-70; e-mail: andreynmu@mail.ru

Grebeniuk Andrii Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences, State Higher Educational Institution “National Mining University”, Associate Professor at the Department of Renewable Energy Sources, Dnipropetrovsk; tel.: (056) 373-07-70; e-mail: andreynmu@mail.ru