

В. И. ПАНЧЕНКО, Д. В. ЦИПЛЕНКОВ, М. О. ЛЕОНОВА, В. В. КИРИЧЕНКО (НГУ)

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», 49005, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, тел.: 066-774-63-09, эл. почта: nmu.em@ua.fm, mashaleo05@mail.ru, kirichenko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-6906-776X, orcid.org/0000-0002-0378-5400, orcid.org/0000-0003-2456-943X

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА ВЕТРОУСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Введение

Доля производства электроэнергии автономными источниками в мире превышает 10 %. Кроме этого повышенный интерес к малой энергетике объясняется рядом дополнительных проблем, возникающих при эксплуатации крупных электростанций.

Ветроустановки с вертикальной осью вращения привлекательны простотой конструкции, отсутствием необходимости ориентировки на ветер, сравнительной дешевизной оборудования. Но присущие недостатки мешают их широкому распространению. Недостатки эти таковы: большая осевая нагрузка на подшипники, поддерживающие ротор ветроколеса; тихоходность, требующая применение многополюсных генераторов или использование мультипликаторов; проблемы с выбором места размещения электрогенератора относительно ветроколеса и др. Одни из наиболее распространенных типов роторов, применяемых в ветроустановках малой мощности с вертикальной осью – ротор Эванса, ротор Дарье или Н-ротор.

Анализ надежности ветроэнергетических установок показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 10-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин генератора). Эти же элементы составляют определенную часть стоимости всей установки. Применение низкоскоростных генераторов для ВЭУ является актуальным. С точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, наиболее эффективной электрической машиной, работающей с низкой частотой вращения, является низкоскоростной торцевой генератор. Лучшими характеристиками из многообразия торцевых машин обладают торцевые синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Это связано с простотой конструкции, меньшим расходом меди, малыми габаритами, отсутствием скользящих контактов, с возможностью выполнять генератор низких скоростей вращения, что обуславливает его

низкую стоимость и высокую надежность. Применение низкоскоростных генераторов упрощает конструкцию мультипликатора, а в ряде случаев позволяет обходиться без него.

Одним из перспективных направлений в ветроэнергетике является разработка ветроэнергетических установок с ветроколесом типа ротора Дарье [1]. Ветроколеса этого типа существенно отличаются от традиционных пропеллерных ветроколес, имеют вертикальную ось вращения и могут работать при любом направлении ветра, не требуя систем ориентации по потоку. По своим энергетическим характеристикам такие ветроустановки приближаются к лучшим образцам установок пропеллерного типа. На сегодняшний день по своим энергетическим характеристикам такие ветроустановки приближаются к лучшим образцам установок пропеллерного типа.

Ветроустановки с вертикальной осью вращения привлекательны простотой конструкции, отсутствием необходимости ориентировки на ветер, сравнительной дешевизной оборудования. Но присущие недостатки мешают их широкому распространению. Недостатки эти таковы: большая осевая нагрузка на подшипники, поддерживающие ротор ветроколеса; тихоходность, требующая применение многополюсных генераторов или использование мультипликаторов; проблемы с выбором места размещения электрогенератора относительно ветроколеса и др.

Постановка задачи

Анализ надежности ветроэнергетических установок показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 10-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин генератора). Эти же элементы составляют определенную часть стоимости всей установки. Применение низкоскоростных генераторов для ВЭУ является актуальным. С точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, наиболее эффективной электрической

машиной, работающей с низкой частотой вращения, является низкоскоростной торцевой генератор. Лучшими характеристиками из многообразия торцевых машин обладают торцевые синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Это связано с простотой конструкции, меньшим расходом меди, малыми габаритами, отсутствием скользящих контактов, с возможностью выполнять генератор низких скоростей вращения, что обуславливает его низкую стоимость и высокую надежность. Применение низкоскоростных генераторов упрощает конструкцию мультипликатора, а в ряде случаев позволяет обходиться без него.

Решение задачи

Рассмотрим ветроустановку с вертикальной осью вращения в которой устранены некоторые из указанных выше недостатков. Установка (рис. 1) снабжена ветроколесом 1 в виде Н-ротора Дарье, который соединен элементами крепления 2 с трубой 3, посаженной посредством радиально-упорных подшипников 4 на стержневую опору 5. Последняя закреплена в верхней части башни 6. На крайних по высоте элементах крепления ветроколеса, в горизонтальной плоскости, расположен ротор 7 дискового синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Статор генератора 8 прикреплен к стержневой опоре 5. Постоянные магниты ротора закреплены (например, с помощью клея) на сплошном кольце из магнитомягкой стали. Магнитопровод статора сделан в виде кольца, навитым из ленты электротехнической стали. В нижней части кольца выполнены пазы, в которых размещены катушки трехфазной обмотки статора.

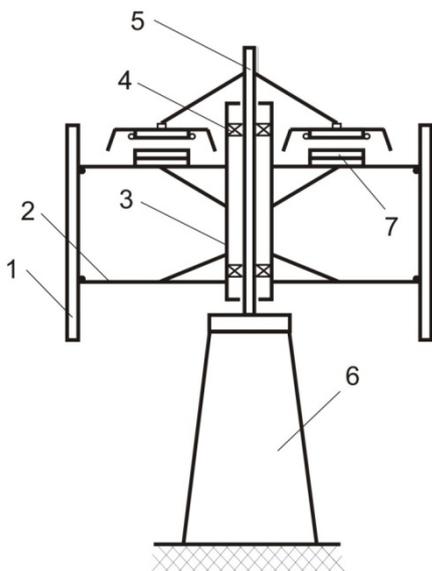


Рис. 1. Ветроэнергетическая установка

Рассмотрим некоторые особенности конструкции генератора. Его расчетная мощность определяется выражением [1]

$$P' = 0,164\alpha_i k_\phi k_{об} B_\delta A n D_{cp}^2 l, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где α_i – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_ϕ – коэффициент формы кривой магнитного потока воздушного зазора;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент; B_δ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом влияния продольной реакции якоря, Тл; A – линейная нагрузка, А/м; n – частота вращения ротора, об/мин;

D_{cp} – средний диаметр статора (ротора), м; l – радиальная длина магнитопровода, м.

Между магнитопроводом статора и постоянными магнитами ротора наблюдается силовое взаимодействие. Усилие, с которым ротор притягивается к статору

$$F = \frac{(\alpha_i B_\delta)^2}{2\mu_0} S_\delta, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $S_\delta = \pi D_{cp} l$ – площадь воздушного зазора, м².

Запишем отношение

$$\frac{P'}{F} = 1,31 \cdot 10^{-7} \frac{k_\phi k_{об} A n}{\alpha_i B_\delta} D_{cp}. \quad (3)$$

Величина усилия F должна быть такой, чтобы обеспечить существенное уменьшение нагрузки на подшипники ветроколеса и в то же время не допустить "прилипания" ротора к статору. Исходя из этого, значение F должно быть таким

$$F = k_3 g m,$$

где $k_3 = 0,94 \dots 0,96$ – коэффициент; $g = 9,81$ м/с² – ускорение земного тяготения; m – масса вращающихся элементов установки.

Учитывая приведенное соображение по выбору величины усилия, определим из (3) среднее значение диаметра статора, при котором обеспечивается требуемая мощность генератора и при этом значительно разгружаются подшипники и исключается "прилипание" ротора к статору

$$D_{cp} = \frac{7,8 \cdot 10^5 \alpha_i B_\delta P'}{k_3 k_\phi k_{об} A n m}, \text{ м}. \quad (4)$$

Из последней формулы следует, что при больших значениях B_{δ} , что возможно при малом воздушном зазоре между ротором и статором, необходимо обеспечить большой средний диаметр и следовательно (при данной мощности) получить малую активную длину машины. Это вызовет увеличение расхода меди на изготовление обмотки из-за относительно большей доли ее лобовых частей. Для избежания этого, необходимо предварительно выбрать рациональные значения активной длины, например, $l \geq 0,1m$ и диаметра D_{cp} . Затем, используя формулу (4), рассчитать требуемое значение магнитной индукции B_{δ} .

При выборе величины D_{cp} нужно учесть следующие соображения. Магниты для уменьшения их потоков рассеяния должны иметь определенную ширину на окружности внутреннего диаметра $D_{вн}$ ротора (обычно не менее 6 мм) и не должны приходить в соприкосновение друг с другом на этом диаметре. Полусное деление на внутреннем диаметре должно быть таким

$$\tau_{min} = \frac{b_M}{0,6...0,7},$$

внутренний диаметр

$$D_{вн} = 2p\tau_{min},$$

где b_M – ширина магнита; $2p$ – число полюсов (магнитов).

Средний диаметр должен быть равен

$$D_{cp} = D_{вн} + l = 2p\tau_{min} + l.$$

Так, при $2p=120$, $l=100$ мм, $b_M=6$ мм, получим

$$D_{cp} = 120 \frac{6}{0,65} + 100 = 1208 \text{ мм.}$$

Выбрав материал магнита, например, с линейной характеристикой размагничивания, определим толщину одного магнита по формуле

$$h_M = \frac{k_F \mu_M}{\frac{B_r}{B_{\delta}} - \sigma} \delta,$$

где k_F – коэффициент насыщения магнитной цепи; μ_M – относительная магнитная проницаемость материала магнитов; B_r – остаточная магнитная индукция магнита; σ – коэффициент, учитывающий его поток рассеяния; δ – воздушный зазор.

Рассмотрим вопрос о конструкции обмотки статора генератора и обоснуем выбор соотно-

шения числа пазов Z_1 статора и количества полюсов (постоянных магнитов) $2p$ ротора. С целью уменьшения расхода меди используем т.н. зубцовую обмотку, предполагающую размещение на каждом зубце магнитопровода статора отдельной катушки обмотки. При этом обеспечивается минимальная длина лобовых частей, а сама обмотка в трехфазном исполнении реализуется при выполнении соотношения [2]

$$Z_1 = 2p+k,$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Очевидно, что при $Z_1 = 2p$ трехфазную обмотку создать нельзя, так как электродвижущие силы (ЭДС) во всех катушках обмотки будут совпадать по фазе; кроме того, в этом случае имеет место максимальный тормозящий момент при пуске в ход ветроколеса (момент «залипания»). Обоснуем выбор значения k . По своему положению в магнитном поле воздушного зазора, создаваемом постоянными магнитами, взаимный угол сдвига α в электрических градусах двух катушек, размещенных на соседних зубцах, составит

$$\alpha = \frac{2\pi p}{Z_1} = \pi - \frac{k\pi}{Z_1}.$$

Так как трехфазная обмотка принятой конструкции выполняется с шагом из данного паза в соседний, то электрический угол между векторами ЭДС двух катушек, расположенных на соседних зубцах, при их последовательно-встречном включении будет таким

$$\alpha_c = \pi - \alpha = \frac{k\pi}{Z_1}.$$

Очевидно, что симметричная трехфазная обмотка может быть выполнена только при числе зубцов статора, кратном числу фаз m , то есть $Z_1 = am$, где $a = 1, 2, 3, \dots$. На каждую фазу при этом будет приходиться число зубцов (катушек) $a = \frac{Z_1}{m}$. Под числом k в формуле

$Z_1 = 2p+k$ будем подразумевать количество последовательно или параллельно соединенных ветвей фазы. Тогда число катушек в одной ветви будет

$$a_g = \frac{Z_1}{km} = \frac{a}{k} - \text{целое число.}$$

Электрический угол, занимаемый всеми катушками ветви, в электрических градусах составит

$$\alpha_B = a_B \alpha_c = \frac{Z_1}{km} \cdot \frac{k\pi}{Z_1} = \frac{\pi}{m} = 60^\circ.$$

Отсюда следует возможность создания трехфазной обмотки с 60-ти градусной фазной зоной, что обеспечит достаточно высокое значение ее обмоточного коэффициента (до 0,956). Подчеркнем, что числа k и a_B должны быть целыми. Связь между ними, как это следует из приведенных выше формул, описывается соотношением

$$a_B = \frac{2p/k + 1}{m} \quad (5)$$

Последовательно задавая значениями k , начиная с единицы, находят первое (наименьшее) значение числа a_B . Например, при частоте вращения ветроколеса $n = 50$ об/мин и требуемой частоте напряжения генератора $f = 50$ Гц, число пар полюсов последнего должно быть $p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{50} = 60$. Из (5) следует, что при $m = 3$ и только при $k = 6$ получим целое число.

При этом $Z_1 = 2 \cdot 60 + 6 = 126$; $a = \frac{Z_1}{m} = \frac{126}{3} = 42$.

Число пазов на полюс и фазу рассматриваемой обмотки

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{2p+k}{2pm} = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{k}{2p} \right).$$

Подставим в последнее соотношение значение k из (5). При $m = 3$ получим

$$q = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{3a_B - 1} \right).$$

Очевидно, что обмотка является дробной со значением $q < 1$. Известно [3], что дифференциальное рассеяние таких обмоток очень быстро возрастает с уменьшением q , начиная со значения $q = 1/3$. Поэтому желательно, как это следует из последней формулы, обеспечить в обмотке минимальное значение a_B . Так, при $a_B = 1$, получим $q = 0,5$.

На рис. 2 показана в двух проекциях конструкция синхронного генератора ветроэнергетической установки.

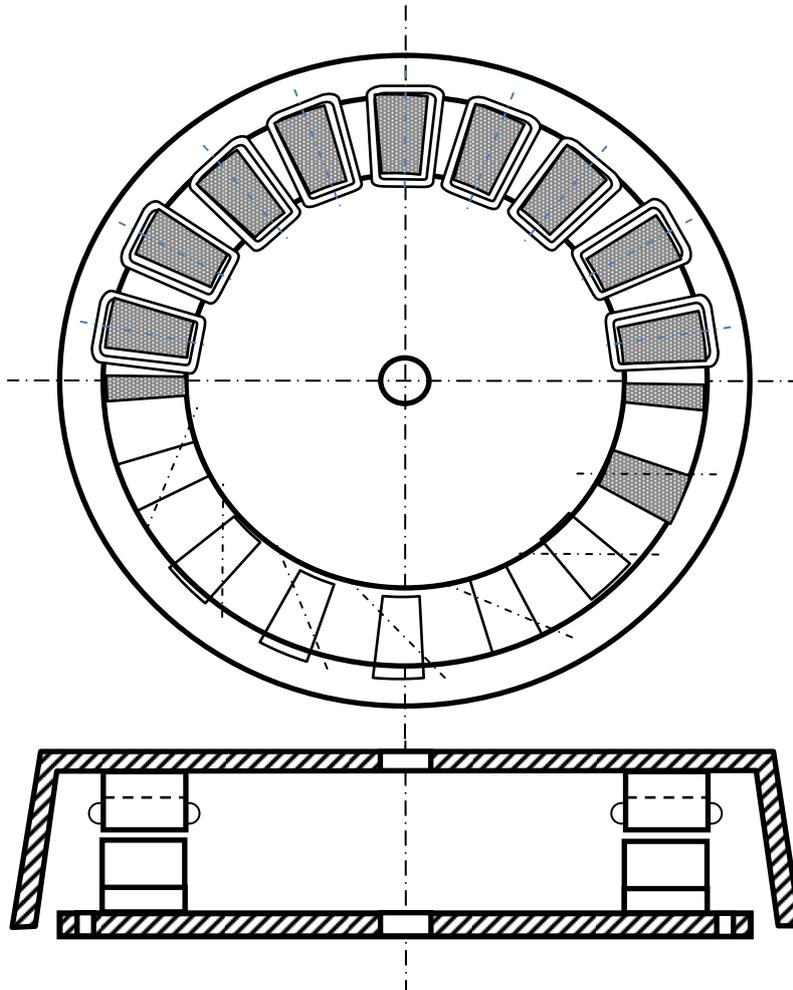


Рис. 2. Конструкция синхронного генератора ветроэнергетической установки с $2p = 16$ и $Z_1 = 18$

В нерабочем состоянии ветроустановки устойчивое положение ротора генератора наблюдается в случае, когда вертикальные оси магнитов совпадают с такими же осями зубцов статора. Чтобы вывести ротор из этого состояния нужно преодолеть действие статического момента «залипания». Определим значение момента, действующего в тангенциальном направлении на один магнит при сдвиге последнего относительно зубца статора

$$M_0 = \frac{dW_\delta}{d\gamma}, \quad (6)$$

где $W_\delta = W_0 dV_\delta = \frac{B_{\delta 0} H_{\delta 0}}{2} l \delta dx$; W_0 – магнитная энергия в единице объема воздушного зазора между поверхностями магнита и зубца, Дж; $B_{\delta 0}$, $H_{\delta 0}$ – магнитная индукция и напряженность магнитного поля в воздушном зазоре в режиме холостого хода, l – радиальная длина воздушного зазора, м; dx – взаимное перекрытие магнита и зубца в тангенциальном направлении, м; $dV_\delta = l \delta dx$ – элемент объема воздушного зазора между поверхностями магнита и зубца, м³. Учитывая, что $dx = R_{cp} d\gamma$, где $d\gamma$ – геометрический угол, занимаемый в пространстве элементом dx , из формулы (6) получим

$$M_0 = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} l \delta R_{cp} = \frac{B_{\delta 0}^2}{2\mu_0} \frac{\delta S_\delta}{2\pi} = \frac{B_{\delta 0}^2}{2\mu_0} \frac{V_\delta}{2\pi}, \quad (7)$$

где $R_{cp} = 0,5 D_{cp}$ – средний радиус ротора; $S_\delta = 2\pi R_{cp} l$ – площадь поверхности ротора, обращенной к воздушному зазору, м²; $V_\delta = \delta S_\delta$ – объем воздушного зазора, м³.

Статический момент «залипания»

$$M_c = M_0 N = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} \frac{S_\delta \delta N}{2\pi}, \quad (8)$$

где N – число магнитов оси, которых совпадают с осями зубцов статора при неподвижном роторе. Значение N зависит от соотношения между Z_1 и $2p$. При удачном выборе этого соотношения можно значительно уменьшить момент M_c , причем значение N находят как наибольший общий делитель чисел Z_1 и $2p$. Например, если $Z_1 = 126$, $2p = 120$, то числа 126 и 120 можно представить в виде

$$120 = 6 \cdot 20 \quad \text{и} \quad 126 = 6 \cdot 21,$$

а их наибольший общий делитель $N = 6$.

В общем случае для чисел $Z_1 = 2p + k$, которое является кратным трем и $2p$, которое всегда четное, наибольшим делителем будет число k , т.е. $N = k$.

Максимальное значение электромагнитного момента синхронного генератора можно представить следующей формулой

$$M_m = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} V_\delta p. \quad (9)$$

Из сравнения момента по последней формуле с моментом «залипания» по (8), получим

$$M_c = \left(\frac{B_{\delta 0}}{B_\delta} \right)^2 \frac{M_m N}{2\pi p}. \quad (10)$$

Запишем отношение магнитных индукций в формуле (10), учитывая, что $E_0 \equiv B_{\delta 0}$, а $E_\delta \equiv B_\delta$ в виде

$$\frac{B_{\delta 0}}{B_\delta} = \frac{1}{k_E u},$$

$$\text{где} \quad k_E = \frac{E_\delta}{U_H} \approx \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + X_\sigma^*)^2},$$

$$u = \frac{U_H}{E_0} = \sqrt{1 - (i \cos \varphi)^2} - i \sin \varphi; \quad i = \frac{I_H}{I_K}; \quad E_\delta \text{ и } E_0$$

– соответственно внутренняя ЭДС и ЭДС холостого хода генератора; U_H – номинальное выходное напряжение; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки; $X_\sigma^* = 0,08 \dots 0,2$ – относительное значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора; I_H и I_K – соответственно номинальный ток и ток короткого замыкания генератора.

Например, приняв

$$\cos \varphi = 0,8; \quad i = 0,35; \quad X_\sigma^* = 0,12,$$

получим

$$k_E = 1,09; \quad u = 0,75 \quad \text{и} \quad \frac{B_{\delta 0}}{B_\delta} = 1,22.$$

Представим максимальный момент в виде

$$M_m = k_m M_H,$$

где M_H – номинальный момент; k_m – кратность моментов. В свою очередь

$$M_H = \frac{P_H}{\Omega} = \frac{P_H p}{2\pi f},$$

где $P_H = S_H \cos \varphi_H$; S_H – номинальная полная мощность, ВА; f – частота ЭДС генератора; Ω – угловая частота вращения ротора; $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности.

Подставим M_m в формулу (10), с учетом отношения магнитных индукций, получим

$$M_c = \frac{k_m S_H N \cos \varphi_H}{4\pi^2 f (k_{Eu})^2}.$$

Из последней формулы следует, что у высокочастотных генераторов статический момент «залипания» может быть сравнительно небольшим.

В процессе разгона ветроколеса на ротор генератора также будут действовать динамические (реактивные) моменты «залипания», обусловленные гармоническими составляющими индукции, созданные воздействием гармоник магнитодвижущих сил (МДС) постоянных магнитов $F(\gamma) = F_{m_v} \cos p v \gamma$ на зубчатый воздушный зазор, магнитная проводимость которого может быть представлена формулой

$$\Lambda(\beta) = \Lambda_0 + \sum_{k_1=1}^{\infty} \Lambda_K \cos k_1 Z_1 \beta,$$

где $v = 2s + 1$; $s = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок гармоник МДС; F_{m_v} , Λ_K – амплитудные значения гармоник; γ , β – угловые координаты осей магнита и ближайшего зубца статора.

Наибольшие значения динамических моментов наблюдаются при выполнении равенств [4]

$$2pv = Z_1 k_1 \quad (11)$$

и

$$2pv = 2Z_1 k_1 \quad (12)$$

Для ослабления указанных моментов необходимо выбрать соотношение чисел пар полюсов p и пазов Z_1 таким, чтобы приведенные равенства выполнялись при возможно больших значениях k_1 и v . Запишем равенство (11) в

виде $\frac{v}{K_1} = \frac{Z_1}{2p}$. Подставим сюда соотношение $Z_1 = 2p + k$, получим

$$\frac{v}{K_1} = \frac{2p + k}{2p}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что для обеспечения v и k_1 возможно большими, величину k следует принимать такой, чтобы числитель и знаменатель

дружи имели общим делителем возможно меньшее число, желательно единицу

Так при $k = 6$, $p = 60$, $Z_1 = 126$,

$$\frac{v}{k_1} = \frac{126}{2 \cdot 60} = \frac{21 \cdot 6}{20 \cdot 6} = \frac{21}{20},$$

имеем $v_{min} = 21$, $k_{1min} = 20$, наибольший общий делитель – число 6, т.е. $N = 6$. Значения v_{min} и k_{1min} можно найти непосредственно из соотношений

$$v_{min} = \frac{Z_1}{N} = \frac{126}{6} = 21;$$

$$k_{1min} = \frac{2p}{N} = \frac{2 \cdot 60}{6} = 20.$$

При $k = 3$, $p = 60$, $Z_1 = 123$:

$$\frac{v}{k_1} = \frac{123}{2 \cdot 60} = \frac{41 \cdot 3}{40 \cdot 3} = \frac{41}{40},$$

имеем $v_{min} = 41$, $k_{1min} = 40$. При этом наибольший общий делитель – $N = 3$. Или по-другому

$$v_{min} = \frac{123}{3} = 41, \quad k_{1min} = \frac{120}{3} = 40.$$

Аналогично, из равенства (12) получим

$$\frac{v}{k_1} = \frac{2p + k}{p}. \quad (14)$$

При $k = 6$, $p = 60$, $Z_1 = 126$ отношение (14)

$$\frac{v}{k_1} = \frac{126}{60} = \frac{21 \cdot 6}{10 \cdot 6} = \frac{21}{10}.$$

Здесь $v'_{min} = 21$, $k'_{1min} = 10$ наибольший общий делитель число $N = 6$. По-другому

$$v'_{min} = \frac{Z_1}{N} = \frac{126}{6} = 21; \quad k'_{1min} = \frac{p}{N} = \frac{60}{6} = 10.$$

При $k = 3$, $p = 60$, $Z_1 = 123$ отношение

$$\frac{v}{k_1} = \frac{123}{60} = \frac{41 \cdot 3}{20 \cdot 3} = \frac{41}{20}.$$

Здесь $v'_{min} = 41$, $k'_{1min} = 20$, наибольший общий делитель число $N = 3$. По-другому

$$v'_{min} = \frac{Z_1}{N} = \frac{123}{3} = 41; \quad k'_{1min} = \frac{p}{N} = \frac{60}{3} = 20.$$

В приведенных примерах v_{min} и k_{1min} сравнительно большие числа, поэтому возникающие в таком генераторе динамические мо-

менты «залипания» будут пренебрежимо малы. Число возможных фиксаций ротора r генератора в процессе его разгона за один оборот при наличии моментов «залипания» составит [4]

$$r = 2pv_{min},$$

где v_{min} – наименьшее из минимальных значений v , при которых выполняется равенства (11) или (12).

Выводы

1. Рассмотрена конструкция ветроустановки с вертикальной осью вращения, в которой дисковой электрогенератор с постоянными магнитами на роторе размещен на верхних эле-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гольберг О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольберг, Я. С. Гурин, Н. С. Свириденко // Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1984 – 431 с.
2. А.с. СССР № 788288. Индукторная машина. В.В. Аpsит и др., Б.И. №46, 1980.
3. Дулькин А. И. Дифференциальное рассеяние двухслойных и однослойных трехфазных обмоток / А. И. Дулькин, Р. М. Шидерова // Труды МЭИ, Высокоскоростные генераторы, вып. 78, 1971, с. 90 – 100.
4. Афанасьев А. А. Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя с постоянными магнитами. – Электричество. – 2011. – № 3. – С. 46-51.

Поступила в печать 11.05.2016.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

ментах крепления ветроколеса, что позволит уменьшить осевую нагрузку на подшипники и обойтись без мультипликатора.

2. Обоснован выбор соотношения числа зубцов статора и количества магнитов ротора, а также выбор рациональных параметров обмотки статора генератора.

3. Получена формула для расчета статического момента «залипания» ротора генератора и проведен анализ условий, выполнение которых обеспечит значительное снижение статического и динамического моментов «залипания».

4. Показано, что на величину моментов "залипания" решающее влияние оказывает выбор соотношения числа зубцов статора и количества постоянных магнитов ротора.

REFERENCES

1. Goldeg O.D., Gurin Y.S., Sviridenko N.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashyn* [Electrical machines design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ.,1984.431 p.
2. Certificate of authorship USSR №788288, V.V.Apsit and others. *Induktornaya mashyna* [Inductor machines].1980.
3. Dulkin A.I.,Shiderova R.M. *Differentsialnoe rassseyaniye dvuhsloynnyh i odnosloynnyh trehfaznyh obmotok* [The differential scattering of single-layer and double-layer three-phase transformer windings]. Issue 78,1971. 90-100 p.
4. Afanasiev A.A *Reaktivniy moment obestochenogo ventelnogo dvigatela s postoyannymi magnitami*. [Reactive time de-energized valve motor with permanent magnets.]. Elctrichestvo Pubi.,2011.№3. 46-51 p.

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Анализ надежности ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 10-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин генератора). С точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, наиболее эффективной электрической машиной, работающей с низкой частотой вращения, является низкоскоростной торцевой генератор. Лучшими характеристиками из многообразия торцевых машин обладают торцевые синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. В работе рассматривается конструкция торцевого генератора ветроустановки, в которой устранены некоторые из известных недостатков. В результате исследований установлено, что предлагаемая конструкция, в которой дисковой электрогенератор с постоянными магнитами на роторе размещен на верхних элементах крепления ветроколеса, позволит уменьшить осевую нагрузку на подшипники и обойтись без мультипликатора. В работе обоснован выбор соотношения числа зубцов статора и количества магнитов ротора, а также выбор рациональных параметров обмотки статора генератора.

Ключевые слова: ветроустановка с вертикальной осью, синхронный генератор с постоянными магнитами, статор, ротор, надежность, торцевой синхронный генератор, число полюсов, ветроколесо.

УДК 621.313.3:621.548.5

В. І. ПАНЧЕНКО, Д. В. ЦИПЛЕНКОВ, М. О. ЛЕОНОВА, В. В. КИРИЧЕНКО (НГУ)

Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет", 49005, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19, тел.: 066-774-63-09, ел. пошта: nmu.em@ua.fm, mashaleo05@mail.ru, kirichenko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-6906-776X, orcid.org/0000-0002-0378-5400, orcid.org/0000-0003-2456-943X

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР ВІТРОУСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Аналіз надійності вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання показує, що більша частина пошкоджень викликається виходом з ладу генератора і мультиплікатора (механізму, підвищувального обороти робочого колеса від 10-120 об/хв до необхідних 750-1000 об/хв генератора). З погляду забезпечення хороших масогабаритних показників, найбільш ефективною електричною машиною, що працює з низькою частотою обертання, є низькошвидкісний торцевий генератор. Кращими характеристиками з різноманіття торцевих машин володіють торцеві синхронні генератори з збудженням від постійних магнітів. У роботі розглядається конструкція торцевого генератора вітроустановки, в якій усунуті деякі з відомих недоліків. В результаті досліджень встановлено, що запропонована конструкція, в якій дискової електрогенератор з постійними магнітами на роторі розміщений на верхніх елементах кріплення вітроколеса, дозволить зменшити осьову навантаження на підшипники і обійтися без мультиплікатора. У роботі обґрунтовано вибір співвідношення числа зубців статора і кількості магнітів ротора, а також вибір раціональних параметрів обмотки статора генератора.

Ключові слова: вітроустановка з вертикальною віссю, синхронний генератор з постійними магнітами, статор, ротор, надійність, торцевої синхронний генератор, число полюсів, вітроколесо.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.313.3:621.548.5

V. I. PANCHENKO, D. V. TSYPLENKOV, M. A. LEONOVA, V. V. KIRICHENKO (NMU)

State Higher Educational Institution «National mining university», 49005, Dnipropetrovsk, Karl Marks ave., 19, tel.: 066-774-63-09, e-mail: nmu.em@ua.fm, mashaleo05@mail.ru, kirichenko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-6906-776X, orcid.org/0000-0002-0378-5400, orcid.org/0000-0003-2456-943X

CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC WIND TURBINE WITH A VERTICAL AXIS OF ROTATION

Reliability analysis of wind turbines with a vertical axis of rotation shows that most of the damage is caused by failure of the generator and multiplier (mechanism increases the speed of the impeller from 10-120 rpm to required 750-1000 rpm generator). From the point of view of providing good weight and dimensions the most efficient electrical machine, operating with low rotation speed is low speed end generator. The best characteristics of the variety end machines have end synchronous generator with excitation from permanent magnets. This paper considers the design of the wind turbine end generator in which fixed some of the known shortcomings. As a result of the research showed that the proposed design, in which the disk generator with permanent magnets on the rotor located on the upper fastening elements of the propeller, will reduce the axial load on the bearings and do without multiplier. The article justifies the selection of the ratio of the number of teeth of the stator and the number of magnets of the rotor, and the choice of rational parameters of the generator stator winding.

Keywords: wind turbine with a vertical axis, the synchronous generator with permanent magnets, the stator, the rotor, reliability, end synchronous generator, the number of poles, wind wheel.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*