

УДК 621.3

Приобъектный ветроэлектрический агрегат

В.Г. Петько¹, д-р техн. наук, профессор; **М.А. Христиановская²**, соискатель;

А.В. Кузьмин², соискатель

¹ ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

² ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский ГУВМ

Статья посвящена разработке ветроэлектрического агрегата малой и средней мощности, предназначенного для установки в сельской местности в непосредственной близости от приёмников электрической энергии. Это позволит частично разгрузить довольно протяжённые и зачастую перегруженные сельские электрические сети и в результате снизить потери электрической энергии. Условия размещения и эксплуатации таких ветроагрегатов требуют, чтобы ветроагрегат имел простую конструкцию и, как следствие, высокую надёжность, низкую стоимость, удобство технического обслуживания. Это достигается за счёт размещения асинхронного генератора непосредственно в опоре ветроагрегата соосно с осью вращения головки, а соединение вала генератора с валом ветротурбины осуществляется через конический редуктор и обгонную муфту. Для ориентации и ограничения мощности ветротурбины использована механическая система на базе крыльчатки с вертикальной осью вращения и шторки с приводом от боковой лопасти, воспринимающей давление ветра. В результате удалось избавиться от склонного к закручиванию гибкого кабеля, упростить систему управления ветротурбиной при скоростях ветра как ниже, так и выше расчётной скорости.

Ключевые слова: асинхронная машина, электрическая сеть, редуктор, ветротурбина, ограничение мощности, система ориентации, обгонная муфта.

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев как за рубежом, так и в РФ используются ветроагрегаты, ветротурбина которых через редуктор приводит во вращение асинхронную машину, работающую в режиме генератора, подключённую к электрической сети трёхфазного переменного тока [1]. При этом явно наблюдается тенденция к увеличению единичной мощности ветроагрегатов такого типа, как и ветроагрегатов других конструктивных исполнений. При этом происходит их удаление в электрической сети от потребителей электрической энергии, особенно от территориально рассредоточенных потребителей, каковыми являются потребители в сельской местности. Это не способствует разгрузке, как правило, изношенных и зачастую морально устаревших сельских линий электропередачи низших ступеней напряжения (0,4 и 10 кВ) [2], а также снижению потерь энергии в них. В этой связи заманчиво выглядит идея применения ветроагрегатов, максимально приближённых к местам потребления энергии (приобъектных ветроагрегатов). Понятно, что мощность таких ветроагрегатов должна быть соизмерима с мощностью отдельных потребителей, в качестве которых в сельской местности могут выступать мелкие

фермерские хозяйства, пункты доения коров на отгонных пастбищах, сельские подворья, а в некоторых случаях и дачные участки. Естественно, что ветроагрегаты такого назначения должны быть максимально простыми по конструкции и надёжными в эксплуатации.

Цель работы – разработать предложения по конструкции такого ветроагрегата и методику расчёта основных его узлов.

Материал и методы исследования. Классической компоновкой ветроагрегатов с горизонтальной осью вращения является компоновка, при которой блок ветротурбина – редуктор – генератор располагаются в головке ветроагрегата, вращающейся вслед за направлением ветра вокруг вертикальной оси [3]. Размещение генератора непосредственно в головке увеличивает её размеры и вес, а для соединения генератора с электрической сетью требуется использовать гибкий кабель, который со временем требует периодической раскрутки. Для устранения указанных недостатков предлагаем установить генератор соосно с осью вращения головки непосредственно внутри опоры ветроагрегата, желательно в нижней её части. Помимо облегчения головки это приведёт к повышению устойчивости опоры ветроагрегата.

Так как при передаче вращения от редуктора к валу генератора возникает реактивный момент, действующий на механизм ориентации головки по ветру, крутящий момент этого механизма должен быть как минимум на два порядка выше реактивного момента. Для ветроагрегатов малой мощности для этой цели вполне подходящим будет механизм с виндрозой, простой по устройству и не требующий высококвалифицированного обслуживания. Одновременно с помощью этого механизма осуществляется и ограничение мощности ветротурбины при увеличении скорости ветра сверх расчётной величины.

Конструктивная схема такого ветроагрегата (вид сбоку и вид сверху) приведена на рисунке 1.

Ветроагрегат состоит из ветротурбины 1 с горизонтальной осью, установленной в головке 2, насаженной с возможностью поворота на 360° на полую вертикальную ось 3 опоры 4. Верхняя часть опоры снабжена жёстко связанной с опорой цевочной шестернёй 5, соосной с осью вращения головки 2. Вал 6 ветротурбины через конический редуктор 7 связан с вертикальным валом 8, который в свою очередь через обгонную муфту 9 связан с валом 10 асинхронного электродвигателя 11. На валу 8 установлен дисковый электромагнитный тормоз 12, питаемый от электрической сети.

Традиционно ориентация ветротурбины на ветер осуществляется с помощью «хвоста», виндрозы или в более продвинутых случаях – с помощью системы автоматического управления с использованием электропривода. Ограничение мощности, в принципе, можно осуществить поворотом лопастей [4–7]. Однако такой способ ограничения для ветроагрегатов малой мощности не приемлем из-за высокой сложности и соответственно стоимости. В большей степени для данного случая подходит способ ограничения мощности поворотом плоскости ветротурбины относительно направления ветра. К такому способу относится описанный в ранее опубликованных работах [8, 9] способ ограничения мощности с помощью боковой лопасти, отворачивающей плоскость ветротурбины от направления ветра. Недостатком такого способа является то, что лопасть воздействует непосредственно на головку ветротурбины, вследствие чего должна иметь внушительные размеры.

Поэтому в конструкции ветроагрегата предусмотрено устройство, реагирующее на направление ветра и одновременно выполняющее роль ограничения мощности ветротурбины, в котором лопасть осуществляет поворот не непосредственно ветротурбины, а поворот виндрозы [10, 11]. При этом на поворот требуется на один-два порядка меньшее усилие, которое обеспечивает лопасть значительно меньших размеров.

Наиболее совершенным из устройств такого типа является устройство по авторскому свидетельству № 2689494 [12], применённое в конструкции предлагаемого ветроагрегата. Оно содержит крыльчатку 13 с вертикальной осью вращения, пропущенную через цилиндрическую направляющую 14. На нижнем конце оси вращения установлена кинематически связанная через зубчатое зацепление с цевочной шестернёй 5 ведущая шестерня 15. Направляющая 14 и закреплённая в нижней её части соосно с осью вращения крыльчатки коническая шестерня 16 жёстко связаны с головкой ветроагрегата. С внешней стороны направляющая охвачена с возможностью поворота цилиндром 17, к которому

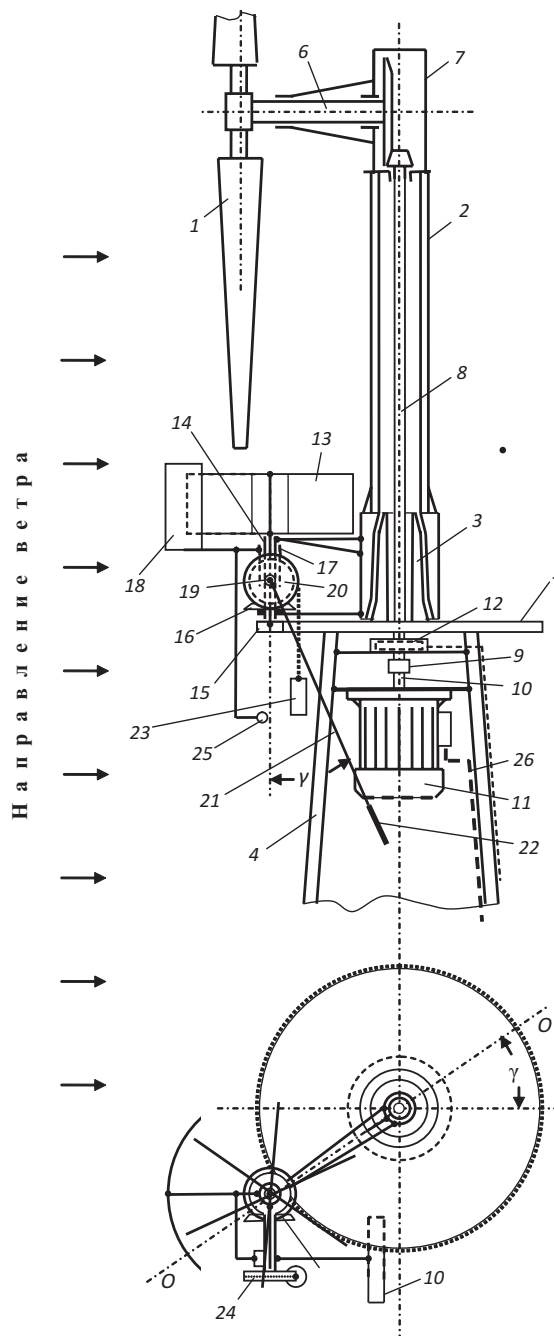


Рис. 1 – Конструктивная схема ветроагрегата

прикреплена шторка 18, ориентированная по направлению ветра. К этому же цилиндру прикреплена ось 19 перпендикулярно направлению ветра, так, что её осевая линия пересекает ось вращения крыльчатки. На оси 19 установлена с возможностью вращения образующая пару зацепления с конической шестернёй 16 равного ей диаметра коническая шестерня 20. Последняя механически связана с возможностью поворота не менее чем на 90° в вертикальной плоскости, параллельной направлению ветра, штангой 21, на конце которой установлена лопата 22, воспринимающая давление ветра. Штанга 21 лопаты под действием груза 23, выполняющего роль силового противодействующего механизма, подвешенного к ободу шкива 24, прижата к упору 25, ограничивающему поворот штанги. Асинхронный электродвигатель, выполняющий в данной конструкции ветроагрегата роль генератора, соединён кабелем 26 с трёхфазной электрической сетью 220/380 В.

Работает устройство следующим образом. При поданном напряжении сети на зажимы электродвигателя и электромагнитного тормоза электродвигатель запускается, а электромагнитный тормоз, который предотвращал работу ветротурбины на отключённый от сети электродвигатель, растормаживает вал ветротурбины. Если ветер отсутствует или его скорость мала, частота вращения выходного вала 8 редуктора меньше частоты вращения вала электродвигателя. За счёт обгонной муфты валы рассоединены. В случае увеличения скорости ветра скорости валов сравниваются, валы через обгонную муфту соединятся, и энергия ветротурбины при дальнейшем увеличении скорости ветра начнёт передаваться в электрическую сеть. При этом электродвигатель из режима холостого хода перейдёт в режим генератора.

Если скорость ветра не превышает установленную для данного ветроагрегата величину, а мощность ветротурбины, следовательно, не превышает номинальную мощность электродвигателя, штанга 21 лопаты 22 грузом 23 прижата к упору 25 и находится в вертикальном положении. При отклонении направления ветра от направления оси ветротурбины (направление О–О) воздушный поток, набега на крыльчатку с той или другой стороны шторки 18, приводит крыльчатку во вращение в том или ином направлении. За счёт механической передачи через вал и ведущую шестерню 15 на цевочную шестерню 5 головка 2 ветроагрегата поворачивается в сторону ветра. Это продолжается до тех пор, пока шторка не установится в положение, при котором задувание ветра на лопасти крыльчатки станет одинаковым с той и другой сторон шторки, и вращение крыльчатки прекратится. Таким образом, плоскость ветротурбины всегда будет

устанавливаться перпендикулярно направлению ветра.

При увеличении скорости ветра сверх установленной величины штанга лопаты под действием напора набегающего на лопату потока воздуха, преодолевая сопротивление груза, повернётся на угол γ , тем больший, чем больше скорость ветра. На этот же угол по отношению к направлению ветра за счёт сцепления между собой конических шестерён 16 и 20 повернётся и шторка 18. Крыльчатка 13 начнёт вращаться и установит в конечном итоге головку 2 в такое положение, при котором линия, соединяющая центр шторки и ось крыльчатки, будет совпадать с направлением ветра. При этом на угол γ по отношению к направлению ветра будет повернута теперь и ось ветротурбины. Это компенсирует влияние повышенной скорости ветра на развиваемую мощность и синхронную угловую скорость турбины.

Она будет сохраняться на постоянном заранее установленном уровне при всех скоростях ветра, выше расчётной величины, если зависимость угла поворота штанги лопаты от скорости ветра будет совпадать с зависимостью, которая необходима для ограничения на постоянном уровне мощности ветротурбины при неизменной, ведомой электрической сетью частоте вращения турбины.

В данном устройстве это условие соблюдается.

Действительно, составляющая скорости ветра, перпендикулярная плоскости ветротурбины, равна:

$$V_T = V \cos \gamma,$$

откуда:

$$\gamma = a \cos(V_T / V).$$

Угол γ_c , при котором V_T будет постоянна при любой вышеустановленной скорости ветра V и равна номинальной скорости V_{TH} :

$$\gamma_c = a \cos(V_{TH} / V).$$

При этом будет постоянная и соответствующая V_T мощность ветротурбины.

А так как синхронная угловая скорость турбины:

$$\omega_c = Z_c V / R,$$

то и синхронная угловая скорость турбины при $\gamma = \gamma_c$ и, следовательно, $V_T = V_{TH}$:

$$\omega_{CH} = Z_c V_{TH} / R,$$

где R – радиус турбины в метрах, будет постоянной, т.е. ограниченной на уровне номинальной синхронной угловой скорости.

Установка необходимого угла поворота турбины от направления ветра осуществляется в данном случае следующим образом.

Составляющая скорости ветра, перпендикулярная поверхности лопаты, имеет вид:

$$V_{\perp} = V \cos \gamma, \text{ м/с.}$$

Тогда силу давления ветра на лопаду выразим как:

$$F_{\text{л}} = C_x \rho S V_{\text{л}}^2 / 2, \text{ Н},$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 S – площадь лопады, м².

Момент, развиваемый лопадой, пропорционален квадрату косинуса угла отклонения лопады от вертикального положения, равного в данном устройстве углу отклонения оси турбины от направления ветра γ :

$$M_{\text{л}} = L_{\text{ш}} F_{\text{л}} = L_{\text{ш}} C_x \rho S V^2 \text{Cos}^2 \gamma / 2,$$

где $L_{\text{ш}}$ – плечо приложения силы, равное длине штанги, м.

Момент сопротивления M_c силового противодействующего механизма не должен зависеть от угла поворота рычага лопады. Для груза это условие соблюдается абсолютно.

Величина момента сопротивления устанавливается такой, чтобы он был равен моменту лопады при номинальной скорости ветра:

$$M_c = M_{\text{лн}} = L_{\text{ш}} C_x \rho S V_{\text{тн}}^2 / 2.$$

Тогда, если скорость ветра превысит расчётную скорость турбины, момент лопады превысит момент сопротивления силового противодействующего механизма, лопада и турбина повернутся на угол γ , при котором снова установится равенство моментов:

$$M_c = M_{\text{л}} = L_{\text{ш}} C_x \rho S V_{\text{тн}}^2 / 2 = \\ = L_{\text{ш}} C_x \rho S V^2 \text{Cos}^2 \gamma / 2.$$

Тогда $\gamma = a \cos(V_{\text{тн}}/V) = \gamma_c$, т.е. угол поворота ветротурбины под действием лопады соответствует величине γ_c , при которой синхронная угловая скорость турбины и развиваемая ею мощность постоянны при скорости ветра, начиная от расчётной скорости и выше.

Вывод. Размещение асинхронного генератора непосредственно на опоре ветроагрегата облегчает головку, чем достигается большая её устойчивость, упрощается монтаж и обслуживание генератора. Для соединения его

с электрической сетью не требуется гибкий кабель, склонный при изменении направления ветра к закручиванию. А устройство ориентации и ограничения мощности ветротурбины работает независимо от наличия напряжения в электрической сети, отсутствие которого в сельской местности явление не редкое, и в то же время для его обслуживания не требуется высококвалифицированный персонал.

Литература

1. Обухов С.Г. Системы генерирования электрической энергии с использованием возобновляемых энергоресурсов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.
2. Чиндякин В.И., Петрова Г.В., Большаков Е.В. Перспективы создания Евразийского парка альтернативной энергетики // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (68). С. 127–130.
3. Ветроэлектрические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, К.П. Вашкевич [и др.] / под общ. ред. В.Н. Андрианова. М. – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960.
4. Пат. РФ № 2643885. Гидравлическая система ограничения мощности и частоты вращения ветроагрегата / В.Г. Петько, В.В. Пугачёв; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; Опубл. 06.02.2018.
5. Пат. РФ № 2605490. Гидравлическая система регулирования угла установки лопастей ветротурбины / В.Г. Петько; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 29.11.2016.
6. Пат. РФ № 2592699. Регулятор момента и частоты вращения вала ветротурбины / Петько В.Г.; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 04.07.2016.
7. Пат. РФ № 2587022 Система ограничения частоты вращения и мощности ветроагрегата / Петько В.Г.; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 20.05.2016.
8. Янсон Р.А. Ветроустановки / под ред. М.Ж. Осипова. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.
9. Е.М. Фатеев. Ветроустановки и ветродвигатели. М., 1957.
10. Пат. № 2430265 Ветроагрегат с горизонтальной осью вращения ветротурбины и ограничением мощности / Петько В.Г., Пугачёв В.В.; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 09.12.2011.
11. Пат. № 2535194 Ветроагрегат с системой ориентации и ограничения мощности ветротурбины / Петько В.Г.; заявит. и патентооблад. ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 08.10.2014.
12. Пат. № 2689494 Ветроагрегат с системой ориентации и ограничения синхронной угловой скорости ветротурбины / Петько В.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»; опубл. 28.05.2019.

Петько Виктор Гаврилович, доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»
 Россия, 460014, г. Оренбург, ул. Челюскинцев, 18
 E-mail: vgp@petko@mail.ru

Христиановская Маргарита Алексеевна, соискатель
Кузьмин Александр Владимирович, соискатель
 ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины»
 Россия, 196084, г. Санкт-Петербург, ул. Черниговская, 5
 E-mail: ritakhristianovskaya98@gmail.com; x-ray909@mail.ru

Onsite wind power unit

Petko Victor Gavrilovich, Doctor of Technical Sciences, Professor
 Orenburg State Agrarian University
 18, Chelyuskintsev St., Orenburg, 460014, Russia

Khristianovskaya Margarita Alekseevna, research worker
Kuzmin Alexander Vladimirovich, research worker
St. Petersburg University of Veterinary Medicine
5, Chernihiv St., St. Petersburg, 196084, Russia
E-mail: ritakhristianovskaya98@gmail.com; x-ray909@mail.ru

The article is devoted to the development of a low and medium power wind power unit intended for installation in rural areas in the immediate vicinity of electric power receivers. This will partially relieve the rather long and often overloaded rural electrical networks and, as a result, reduce the loss of electrical energy. The conditions for the placement and operation of such wind turbines require that the wind turbine has a simple design and, as a result, high reliability, low cost, and ease of maintenance. This is achieved by placing the asynchronous generator directly in the support of the wind turbine coaxially with the axis of rotation of the head, and the connection of the generator shaft to the shaft of the wind turbine is carried out through a bevel gearbox and an overrunning clutch. To orient and limit the power of the wind turbine, a mechanical system based on an impeller with a vertical axis of rotation and a curtain driven by a side shovel that receives wind pressure is used. As a result, it was possible to get rid of the flexible cable prone to twisting, to simplify the control system of the wind turbine at wind speeds, both lower and higher than the design speed.

Key words: *asynchronous machine, electrical network, gearbox, wind turbine, power limitation, orientation system, freewheel.*

