

УДК 621.548

Г.А. Оборский, д-р техн. наук, проф.,
Б.А. Моргун, канд. техн. наук, доц.,
И.И. Сидоренко, д-р техн. наук, проф.,
Одес. нац. политехн. ун-т

РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ ВЕТРОДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ ПОВОРОТА В УПРУГОЙ ОПОРЕ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРОКОЛЕСА ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ МАХА

Г.О. Оборський, Б.О. Моргун, І.І. Сидоренко. **Регулювання потужності вітродвигуна шляхом обертання в пружній опорі лопатей вітроколеса відносно осі маху.** Проведено дослідження принципу дії, конструктивних особливостей існуючих систем регулювання потужністю вітродвигуна з лопатним вітроколесом. Запропоновано теоретично обґрунтоване розв'язання задачі регулювання шляхом обертання в пружній опорі лопатей вітроколеса відносно осі маху. Представлено конструкцію прототипу обертальної пружної опори маху лопаті, здатної реалізувати цільову пружну характеристику. Намічено шляхи реалізації запропонованого рішення.

Ключові слова: потужність вітродвигуна, обертання лопатей вітроколеса, пружна опора маху лопаті.

Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, И.И. Сидоренко. **Регулирование мощности ветродвигателя путем поворота в упругой опоре лопастей ветроколеса относительно оси маха.** Проведены исследования принципа действия, конструктивных особенностей существующих систем регулирования мощностью ветродвигателя с лопатным ветроколесом. Предложено теоретически обоснованное решение задачи регулирования путем поворота в упругой опоре лопастей ветроколеса относительно оси маха. Представлена конструкция прототипа упругой опоры маха лопасти, способной реализовать целевую упругую характеристику. Намечены пути реализации предложенного решения.

Ключевые слова: мощность ветродвигателя, поворот лопастей ветроколеса, упругая опора маха лопасти.

G.A. Oborskiy, B.A. Morgun, I.I. Sydorenko. **Wind turbine power control by turning in an elastic bearing of rotor blades relative to the stroke axis.** Investigations of operating principle, design features of the existing systems of bladed wind wheel turbine power control are carried out. A new, theoretically sound solution to the problem of regulation by turning in an elastic bearing of rotor blades relative to the stroke axis is proposed. The design of a prototype of an elastic support of the stroke blade able to realize the target elastic response is presented. The ways of the design implementation of the proposed solution are outlined.

Keywords: wind turbine power, turning rotor blades, elastic bearing of rotor blades.

Непостоянство энергии ветра значительно усложняет технику использования этой энергии. Исследования в данном направлении свидетельствуют о том, что изменение скорости ветра в течение минуты в 1,5...3 раза приводит к изменению его энергии в 8...27 раз [1, 2]. Известны случаи, когда скорость ветра изменялась в течение одной минуты более чем в 4 раза, определяя тем самым изменение энергии ветра более чем в 27 раз. Вместе с тем, большинство рабочих машин, при подключении их к ветродвигателю, требуют определённой мощности и числа оборотов, которые должны оставаться постоянными во все время работы этих машин [1]. Вполне очевидно, что для выполнения данного требования ветродвигатель должен регулироваться, обеспечивая тем самым, независимо от скорости ветра, заданную мощность и постоянное число оборотов.

Имеющийся опыт разработки и применения регуляторов, определяющих заданное число оборотов при заданной мощности лопатных ветродвигателей, независимо от скорости ветра, показывает, что регулирование заключается в изменении положения всего ветроколеса или от-



Рис. 1. Регулирование мощности ветродвигателя путем вывода ветроколеса из-под ветра

дельно его лопастей в потоке ветра [1, 2]. При этом достигается такая ориентация ветродвигателя с ветроколесом или лопастей ветроколеса, которая обеспечивает косое набегание ветра на них. Вследствие этого через ветроколесо, согласно задаче управления, пробегает меньшее или большее количество воздуха. Поэтому исследования, направленные на разработку новых регуляторов, определяющих заданное число оборотов при заданной мощности ветродвигателя, независимо от скорости ветра, традиционно ведутся в двух основных направлениях: управляемый вывод всего ветроколеса из-под ветра или управляемое изменение рабочей площади лопа-

стей (крыльев) ветроколеса.

Вывод ветроколеса из-под ветра является широко известным и простым с точки зрения реализации способом регулирования его мощности и числа оборотов. В простейших типах ветродвигателей как козловые и шатровые ветряные мельницы вывод ветроколеса выполнялся вручную; у более совершенных современных ветродвигателей — автоматически, с помощью соответствующих электро-механических регулирующих устройств (рис. 1).

К главным недостаткам данного метода можно отнести: большую инерционность системы регулирования и как следствие запаздывание ее срабатывания, поскольку требуется поворот всей массы ветродвигателя и установленного на нем навесного оборудования относительно главной вертикальной оси вращения, а также наличие при повороте переменных сил, связанных с гироскопическим эффектом; конструктивная необходимость в эксцентриситете ϵ между главной вертикальной осью ветродвигателя и горизонтальной осью ветроколеса, что определяет нестабильность центра масс конструкции и наилучшим образом сказывается на распределении нагрузки между несущими элементами опорной мачты.

Достойной альтернативой приведенному способу регулирования является регулирование лопастей ветроколеса. Данные способы сходны между собой с физической точки зрения, но различаются способом реализации.

Регулирование изменением площади крыльев известно давно и осуществлялось ручным снятием или добавлением покрытия (досок или мешковины) на рамные лопасти крыльев ветроколеса. В настоящее время этот способ реализован за счет изготовления крыльев из створок или долевых крыльев из поперечных или продольных секций-жалюзи (рис. 2, а). Когда ветроколесо начинает вращаться с большей, чем требуется скоростью, секции-жалюзи приоткрываются, и на рабочей поверхности колеса образуются отверстия, отчего действие ветра на крыло уменьшается. Секции-жалюзи могут открываться в ручную или автоматически.

Одним из действенных решений проблемы стабилизации мощности ветроколеса можно считать принцип регулирования за счет поворота лопасти (крыла) относительно оси маха при помощи специальной шарнирно-рычажной системы под действием силы ветра на открывок, закрепленный у задней кромки крыла (рис. 2, б). Этот открывок назван стабилизатором, а регулирование — стабилизаторным [2].

Известен способ регулирования мощности ветродвигателя воздушным тормозом, заключающийся в том, что на лопастях ветроколеса закреплены поворачивающиеся клапаны (лопасть воздушного тормоза), которые при нормальных оборотах ветродвигателя держатся параллельно направлению окружной скорости ветроколеса и почти не оказывают сопротивления движению (рис. 2, в). В этом нормальном положении клапаны удерживаются пружиной. При увеличении оборотов центробежные силы поворачивают его перпендикулярно направлению вращения. В этом положении клапаны, перемещаясь с большой окружной скоростью, увеличивают сопротивление настолько, что избыточный крутящий момент ветроколеса преодолевается сопротивлением и оно затормаживается. Клапаны могут размещаться по всей длине лопасти. Иногда используют конструкции воздушного тормоза в виде биплана или триплана, разбив общую поверхность лопасти воздушного тормоза на ряд открывков.

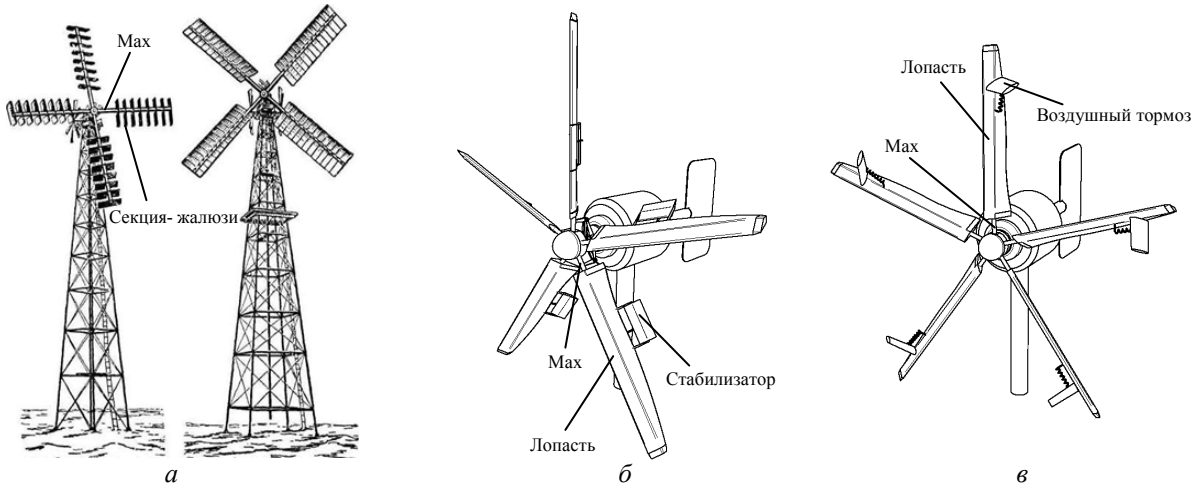


Рис. 2. Регулирование мощности ветродвигателя: изменение рабочей площади лопастей (а); управляемый поворот лопастей ветроколеса или их части относительно оси маха (б); использование воздушного тормоза (в)

Основными недостатками представленных способов регулирования являются наличие весьма сложных с конструктивной точки зрения шарнирно–рычажных систем, размещаемых в полости лопасти, что негативным образом сказывается на ее геометрии и массовых показателях. Кроме того, наличие большого числа подвижных элементов внутри лопасти, которые перемещаясь в радиальном направлении от оси вращения ветроколеса, нарушают балансировку лопасти и ветроколеса в целом. Поэтому рассмотренные способы управления требуют применения дополнительных устройств, компенсирующих изменение инерционных сил лопасти собственными массами, что еще больше ухудшает массовые показатели.

Проведенный анализ недостатков существующих методов управления мощностью и частотой вращения ветродвигателя свидетельствует о том, что разработка новых, более совершенных систем управления является актуальной научно-инженерной задачей. В связи с этим предлагается новое решение, имеющее общие с рассмотренными ранее способами управления теоретические предпосылки.

Крыльчатые ветроколеса работают за счет косо го удара потока воздуха о лопасть при ее движении в плоскости, перпендикулярной к направлению скорости ветра. Крыло ветроколеса изготавливают так, что лопасть, закрепленная на махе, образует с плоскостью вращения *угол заклинения лопасти* φ (рис. 3, а).

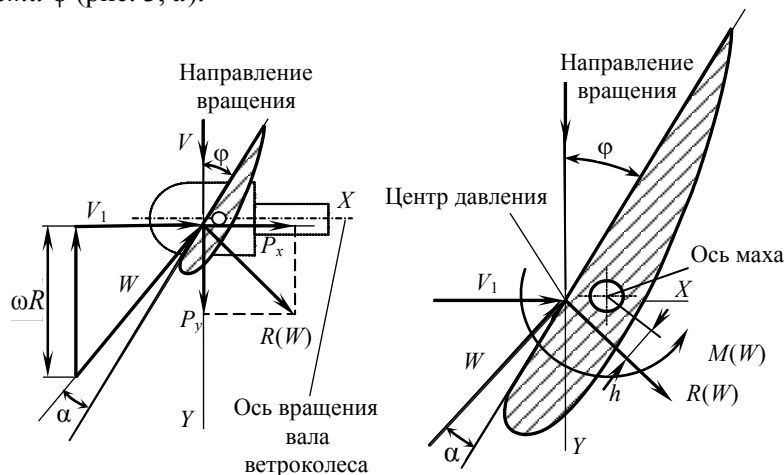


Рис. 3. Работа лопасти крыльчатого ветроколеса: силовые факторы (а); момент относительно оси маха (б)

При этом, на элементы лопасти набегают воздушный поток W под углом атаки α к хорде лопасти. Углы заклинивания φ и атаки α тесным образом связаны между собой и определяют силовые факторы, действующие на лопасть, в частности, и ветроколесо в целом. Результатом набегающего воздушного потока W является сила $R(W)$, приложенная в центре давления или центре парусности (рис. 3, б). Ее составляющие P_x и P_y определяют соответственно лобовое сопротивление ветроколеса и полезные усилия, создающие момент на валу ветроколеса. Поскольку величина $R(W)$ переменна, то стабилизировать величину P_y можно путем вариации углом заклинивания φ , используя в качестве контролируемого параметра величину момента, возникающего от действия силы $R(W)$ относительно оси маха на плече h ,

$$M(W) = R(W)h, \quad (1)$$

где h — расстояние от оси маха до центра давления лопасти в проекции на плоскость, перпендикулярную плоскости вращения, которое присутствует в большинстве конструкций лопастей или может быть создано специально.

Характеристику корректирующего вращающего момента в упругой опоре маха лопасти (целевой упругой функции опоры вращения) можно оценить, рассматривая, например, процесс стабилизаторного регулирования мощности ветродвигателя, рассмотренный ранее (рис. 4, а). Процесс регулирования протекает следующим образом. В нерабочем состоянии лопасть 1 и стабилизатор 2 стоят на одной линии — линии направления ветра (рис. 4, б, положение I). При запуске ветродвигателя в работу освобождается пружина 3, взаимодействие которой с шарнирно-рычажным механизмом, состоящим из нижнего коромысла 4, расположенных внутри маха 5 тяги 6 и втулки-груза 7, верхнего коромысла 8, тяги 9, приводит к повороту стабилизатора 2 на некоторый угол β относительно хорды крыла и ставит его под некоторый угол к направлению ветра (рис. 4, б, положение II). В результате на поверхности стабилизатора возникает подъемная сила F_n , которая поворачивает лопасть относительно оси маха с корректирующим моментом

$$M_k = C_r f \frac{\rho V^2}{2} r, \quad (3)$$

где C_r — коэффициент подъемной силы стабилизатора;

f — площадь поверхности стабилизатора;

r — расстояние от оси маха до центра парусности стабилизатора.

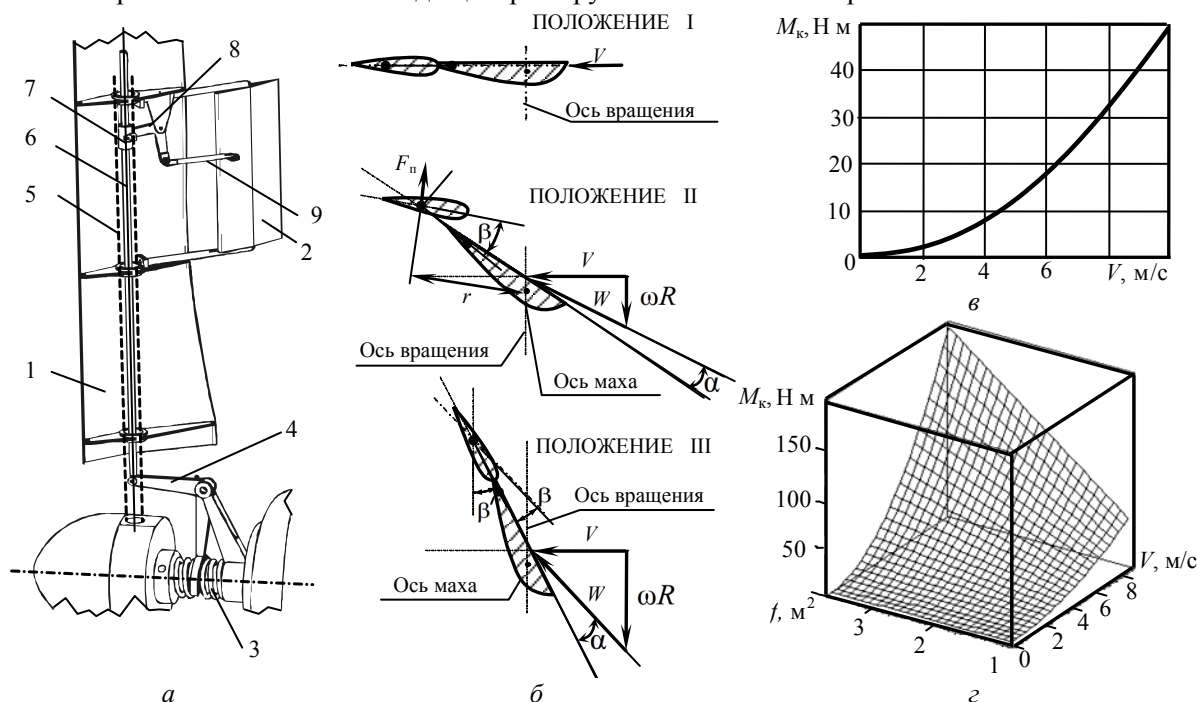


Рис. 4. Регулирование мощности ветродвигателя управляемым поворотом лопастей ветроколеса относительно оси маха: система управления (а); принцип работы (б); корректирующий момент (в); корректирующий момент при изменении площади стабилизатора f (z)

Поворот лопасти под действием M_k относительно оси маха будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие между ним и моментами от аэродинамических сил, действующих на лопасть крыла. При этом хорда лопасти будет составлять с направлением относительного потока некоторый угол атаки α , вследствие чего на лопастях возникнут подъемные силы, которые приведут ветроколесо во вращение. При увеличении оборотов ветродвигателя выше расчетных под действием центробежных сил втулка-груз 7 переместится вдоль оси маха. Ее перемещение при взаимодействии с верхним коромыслом 8 и тягой 9 определит поворот стабилизатора 2 на другой угол β' (рис. 4, б, положение III). При этом нарушится имевшееся ранее равновесие между моментами стабилизатора и лопасти. Учитывая, что момент стабилизатора станет больше момента лопасти относительно оси маха, лопасть повернется в обратную сторону, уменьшив угол атаки α , что уменьшит подъемную силу крыла, и ветроколесо сбавит обороты.

Рассматривая, например, характеристику корректирующего момента, полученную согласно выражению (3) для ветродвигателя средней мощности ($\rho=12,5 \text{ Н/м}^2$, $C_r=1$, $f=1 \text{ м}^2$, $r=1 \text{ м}$), нетрудно заметить, что вид ее является кубически нелинейным и определяет “мягкую” характеристику (рис. 4, в). Варьирование конструктивным параметром f не определяет кардинальных изменений вида характеристики, кроме изменения угла ее наклона (рис. 4, з).

Исходя из полученных результатов, представляет интерес новое решение задачи управления, основанное на применении упругой опоры лопасти ветроколеса. Предлагаемая опора может быть построенной на основе разработанной ранее упругой муфты с расширенной структурой [3, 4]. Конструктивная реализация упругой опоры возможна в виде самостоятельного промежуточного узла 1 между махом 2 и основным валом ветродвигателя 3 (рис. 5, а).

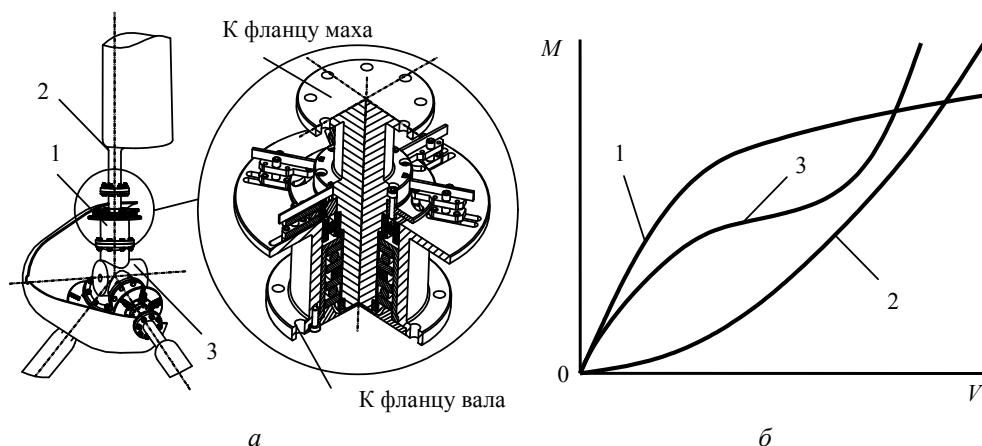


Рис. 5. Упругая опора маха лопасти ветроколеса: конструктивное решение (а); упругие характеристики опоры (б)

Наличие в структуре муфты нелинейной механической связи позволяет существенно расширить диапазон упругих характеристик, которые можно реализовать с ее помощью [5].

Среди них возможен синтез упругих характеристик разной степени нелинейности “мягкого”, “жесткого” и “комбинированного” видов (соответственно кривые 1, 2 и 3 на рис. 5, б). Все это позволяет утверждать, что упругая опора маха, созданная на основе указанной муфты, позволит реализовывать требуемую целевую упругую характеристику.

Предложенное решение позволит получить ряд преимуществ по сравнению с существующими способами, а именно: упрощается геометрическая форма сечения и конструкция управляемой лопасти, которая может быть сплошной (без технологических полостей); стабилизируются инерционные характеристики лопасти, а также уменьшается ее масса, вследствие отсутствия рычажной системы и корректирующих масс перемещающихся вдоль оси маха; упрощается монтаж, наладка и обслуживание системы управления, поскольку она выполнена в виде отдельного модуля — упругой опоры.

Литература

1. Шефтер, Я.И. Использование энергии ветра / Я.И. Шефтер. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 200 с.
2. Фатеев, Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки / Е.М. Фатеев. — М.: ОГИЗ; Сельхозгиз, 1948. — 544 с.
3. Сидоренко, И. Пассивные виброизолирующие устройства с элементами активных систем: моногр. / И. Сидоренко. — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co., 2011. — 296 с.
4. Патент на винахід 99981 Україна. Пружна муфта / І.І.Сидоренко, В.О. Курган (Україна). // Бюл. — 2012. — № 20.
5. Сидоренко, І.І. Пружна муфта з нелінійним механічним зворотним зв'язком. / І.І. Сидоренко, В.О. Курган // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одеса, 2011. — Вип. 2(36). — С. 37 — 45.

References

1. Shefter, Ya.I. Ispo'zovanie energii vetra [The use of wind energy] / Ya.I. Shefter. — Moscow, 1983. — 200 p.
2. Fateev, E.M. Vetrodvigateli i vetroustanovki [Wind mills and wind turbines] / E.M. Fateev. — Moscow, 1948. — 544 p.
3. Sidorenko, I.I. Passivnye vibroizoliruyushchie ustroystva s elementami aktivnykh sistem: Monografiya [Passive vibration isolation devices with elements of active systems: Monogr.] / I.I. Sidorenko — Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co., 2011. — 296 p.
4. Patent na vynakhid 99981 Ukraina. [Patent for invention 99981 Ukraine], Pruzhna mufta [Flexible coupling] / I.I. Sydorenko, V.O. Kurhan (Ukraine). // Bul. — 2012. — # 20.
5. Sydorenko, I.I. Pruzhna mufta z nelineinym mekhanichnym zvorotnym zviazkom. [Flexible coupling with a nonlinear mechanical feedback.] / I.I. Sydorenko, V.O. Kurhan // Proc. Odes. Polytech. Univ. — Odesa, 2011 — Iss. 2(36). — pp. 37 — 45.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Гутыря С.С.

Поступила в редакцию 3 июля 2013 г.