Статья поступила в редакцию 26.03.15. Ред. рег. № 2203 The article has entered in publishing office 26.03.15. Ed. reg. No. 2203

УДК: 621.548.001.6(430.1)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ПРОМЫШЛЕННОГО МАСШТАБА НА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

О.М. Саламов, А.А. Саламов*

Институт радиационных проблем НАН Азербайджана
Азербайджан AZ 1143, Баку, ул. Б. Вахабзаде, 9
тел.: (99412) 539 32 24, доп. 125; факс: (99412) 539 83 19; e-mail: oktay_dae@mail.ru
*Государственное агентство по альтернативным и возобновляемым источникам энергии
Азербайджан AZ 1000, Баку, Дом правительства, ул. У. Гаджибейли, 84, 9-й этаж
тел.: (+994 12) 493 72 75; факс: (+994 12) 493 16 97; e-mail: mezunaztu2005@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2015.05.003

Заключение совета рецензентов: 30.03.15 Заключение совета экспертов: 03.04.15 Принято к публикации: 08.04.15

В работе анализируются механизмы влияния ряда конструктивных параметров, в частности, диаметр ветроколеса (ВК), количество лопастей, их аэродинамические характеристики и т. д. на энергетические и экономические показатели ветроэлектрических агрегатов (ВЭА) малой, средней и большой мощности. Рассматривается влияние среднегодовой скорости ветра на себестоимость изготовления ВК и на стоимость вырабатываемой энергии. Анализируется влияние применения мультипликатора пакетного типа (МПТ) на энергетические и экономические показатели ВЭА. Выясняются механизмы влияния ряда аэродинамических коэффициентов лопастей, в частности, коэффициентов подъемной силы, лобового сопротивления, лобового давления, боковой силы и торможения на численные значения коэффициентов использования энергии ветра и быстроходности ВК. Рассматривается характер изменения этих параметров в зависимости от различных углов атаки лопастей, образующихся между хордами лопастей и направлением ветрового потока; от тангенса угла, определяемого отношением коэффициента подъемной силы к коэффициенту лобового давления и характеризующего качества и профили лопастей; а также от размахов лопастей, определяемых из отношения длины лопасти к длине её хорды.

Ключевые слова: ветроэлектрический агрегат, мультипликатор, мультипликатор пакетного типа (МПТ), ветроколесо, лопасти, генератор переменного тока, выходная мощность, КПД, диаметр ветроколеса.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF INDUSTRIAL SCALE WIND POWER UNITS DESIGN ON THEIR ECONOMIC AND POWER CURVES

O.M. Salamov, A.A. Salamov*

Institute of Radiation Problems of ANAS
9 B.Vahabzadeh Str., Baku, AZ1143 Azerbaijan Republic
ph.: (99412) 539 32 24 (125); fax: (99412) 539 83 19; e-mail: oktay_dae@mail.ru
*The State Agency on Alternative and Renewable Energy Sources of Azerbaijan Republic
84 U. Hajibeyli Str., 9th Floor, Goverment House bld., Baku, AZ1000 Azerbaijan Republic
ph.: (+994 12) 493 72 75; fax: (+994 12) 493 16 97; e-mail: mezunaztu2005@mail.ru

Referred 30 March 2015 Received in revised form 3 April 2015 Accepted 8 April 2015

The paper analyzes the influence mechanisms of a number of design parameters, in particular wind rotor (WR) diameter, the number of blades and their air dynamic characteristics, etc. on economic and power curves of wind units (WU) of small, medium and high output. It is considered the impact of the average annual wind speed on cost price of WPU production and the cost of produced power. The paper researches the influence of the application of a packet type multiplier on power and economic curves of WPU and the influence mechanisms of a number of aerodynamic coefficients of the blades, in particular of the coefficients of lift, drag, ram pressure, lateral force and braking on numerical values of WR output coefficient and high-speed running factor. The authors also consider the nature of the changes of these parameters depending on different angles of the blades attack, located between the direction of the wind flow and the blade chord; the tangent of the angle defined by the ratio of the lift coefficient by a factor of ram

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

pressure and characterizing the quality and profile of the blade; as well as on the scope of the blades determined from the ratio of the length of the blades to the length of its chords.

Key words: wind power unit, multiplier, packet-type multiplier (PTM), wind rotor, blades, alternator, power output, efficiency, WR diameter.

Саламов Октай Мустафа оглы
Salamov Oktay Mustafa

Сведения об авторе: д-р философии по физ.-мат. наукам, почетный доктор и профессор Международной экоэнергетической академии по развитию альтернативной энергетики, ведущий научный сотрудник Института радиационных проблем Национальной Академии наук Азербайджана, доцент Азербайджанского технического университета.

Образование: электротехнический факультет Азербайджанского технического университета (1973 г.).

Область научных интересов: солнечная и ветровая энергетика; математическое моделирование альтернативных энергоустановок различного назначения; водородная энергетика и теплоэнергетика, в частности, горячее водоснабжение и теплоснабжение с применением комбинированных солнечно-ветровых энергоустановок; разработка следящих систем для автоматического наведения концентрирующих зеркал на солнце, антикоррозионных систем для катодной защиты металлических сооружений от электрохимической и электрической коррозии, а также оптимизирующих, дозирующих и защитных устройств различной модификации.

Публикации: 170, в том числе 44 авторских свидетельства СССР на изобретения, а также патенты РФ и Азербайджанской Республики.

Information about the author: PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor in Physics of Semiconductors and Dielectrics, and Honorary Professor-Doctor of Sciences of International Ecoenergy Academy in Alternative Energy Development, Leading Researcher of the Radiation Problems Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences, Associate Professor of Azerbaijan Technical University.

Education: Electrical Engineering Faculty of Azerbaijan Technical University (1973).

Research area: solar and wind power-engineering, mathematical simulation of alternative power plants of different use; hydrogen power engineering and thermal power engineering, in particular, heat and hot water supply applying combined solar-wind power plants; development of tracking systems for an automatic guidance of concentrating solar mirrors, anticorrosion systems for cathode protection of metallic constructions from electrochemical and electrical corrosion, as well as optimizing, dozing and protection equipments with different modifications.

Publication: 170, including 44 certificates of USSR authorship and patents in RF and Azerbaijan Republic.

Саламов Алискендер Акиф оглы
Salamov Alisgandar Akif

Сведения об авторе: д-р философии по техн. наукам; ведущий специалист проектно-конструкторского бюро ООО «Азальтернативэнергия» при Государственном агентстве по альтернативным и возобновляемым источникам энергии.

Образование: транспортный факультет Азербайджанского технического университета (2001 г.).

Область научных интересов: ветровая энергетика, ветродвигатели, механика, детали машин и конструирования.

Публикации: 22; одна научно-популярная книга по альтернативным источникам энергии и одно методическое указание.

Information about the author: PhD (technical sciences); Lead Specialist in "Project construction bureau" of State Agency on Alternative and Renewable Energy Sources "Azalternativenergy" LTD.

Education: Transport Faculty of Azerbaijan Technical University (2001).

Research area: wind power engineering, wind turbines, mechanics, machine parts and design.

Publications: 22; one popular scientific book on alternative energy sources and one methodic instruction.

Введение

Выходные параметры всех ветроагрегатов (ВА), в том числе ветроэлектрических агрегатов (ВЭА), в зависимости от скорости ветра изменяются в определенных пределах. Анализ зависимости выходной мощности быстроходных ВЭА с горизонтальной осью вращения от скорости ветра показывает, что для мощных ВЭА этот график состоит из двух частей:

1) зона прироста мощности ВЭА при скоростях ветра в пределах от скорости трогания $V_{тр}$ до минимальной рабочей скорости $V_р^{мин}$ и

2) зона стабилизации мощности ВЭА при скоростях ветра в пределах от минимальной $V_р^{мин}$ и максимальной $V_р^{макс}$ рабочих скоростей;

– а для маломощных ВЭА из трех частей:

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

1) зона прироста мощности ВЭА при скоростях ветра в пределах $V_{тр} < V < V_р^{мин}$,

2) зона стабилизации мощности ВЭА, при скоростях ветра в пределах $V_р^{мин} < V < V_р^{макс}$ и

3) зона резкого спада мощности при скоростях ветра $V > V_р^{макс}$.

Это наглядно видно на рисунках 1 и 2, на которых представлены графические зависимости выходной мощности ВЭА с максимальной мощностью 4 кВт и 400 кВт соответственно.

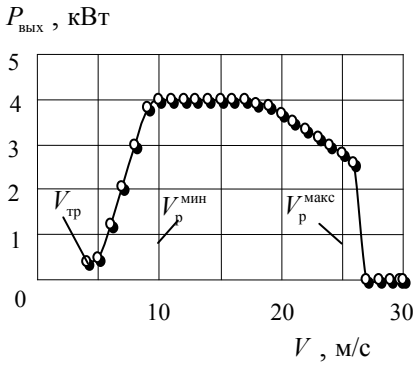

Рис.1. Зависимость выходной мощности ВЭА с максимальной мощностью 4 кВт от скорости ветра

Fig. 1. The dependence of the output power of WPU with a maximum power 4 kW on the wind speed

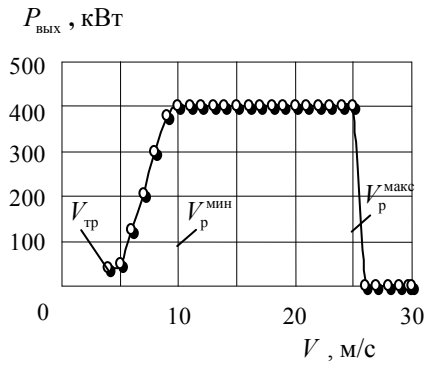

Рис. 2. Зависимость выходной мощности ВЭА с максимальной мощностью 400 кВт от скорости ветра

Fig. 2. The dependence of the output power of WPU with a maximum power 400 kW on the wind speed

Экспериментально установлено, что при использовании маломощных ВЭА в широком интервале скорости ветра из-за нестабильности выходных параметров требования потребителей энергии, особенно имеющих высокую чувствительность к амплитудным и частотным изменениям выходного напряжения генератора переменного тока, не могут быть удовлетворены. Кроме того, при использовании маломощных ВЭА в интервалах скорости ветра $V_{тр} < V < V_р^{мин}$ и $V > V_р^{макс}$ в снабжении потребителя электроэнергией возникают перебои. Для бесперебойного питания потребителей от ВЭА малой мощности необходимо снабжать энергетическую установку аккумулирующей системой. Такая система дает возможность преобразовать энергию ВА (механическую или электрическую) при скоростях ветра $V_р^{мин} < V < V_р^{макс}$ в другой вид энергии и аккумулировать её в специальных аккумуляторах, а при скоростях ветра ниже $V_р^{мин}$ и выше $V_р^{макс}$, а также в часы ветрового затишья накопленную энергию использовать или непосредственно, или же после преобразования в электрическую энергию [1].

Несмотря на то, что в настоящее время известны некоторые способы аккумуляции энергии ветра, в частности, механический, тепловой, химический, электрохимический, гидравлический, пневматический, в виде сжатого воздуха и т.д., однако некоторые из этих способов (электрохимический, тепловой, пневматический и т. д.) с энергетической и экономической точки зрения не могут быть применены в ветроэнергетических установках (ВЭУ) промышленного масштаба. Более прогрессивными способами являются химический[1] и гидравлический[2], которые с большим успехом могут быть применены в ВЭУ с большими мощностями (до 1 МВт).

Для ВЭА, работающих параллельно с централизованной электрической сетью, нет необходимости в применении аккумулирующей системы. В таких системах мощность, развиваемая ВЭА, в каждый момент времени используется максимально, поэтому они имеют максимальный КПД. Однако эксплуатация таких энергетических систем тоже сопровождается определенными сложностями, связанными со стабилизацией частоты тока, вырабатываемого генератором ВЭА, и синхронизацией этой частоты с частотой сети централизованного электроснабжения. Для решения этой проблемы в таких системах применяются специальные блоки автоматического регулирования и управления [2].

Факторы, влияющие на конструктивные и аэродинамические характеристики ВЭА

[1] при хороших ветровых условиях энергия ветра преобразуется в химическую энергию водорода и кислорода путем электролиза воды под давлением, а при низких скоростях ветра, в том числе в часы ветровых затиший, используя топливные элементы, из накопленной химической энергии водорода и кислорода получают электрическую энергию

[2] при хороших ветровых условиях с помощью ветронасосной установки для выкачивания воды из водоема в вышестоящий резервуар, а при низких скоростях ветра, в том числе в часы ветровых затиший, путём преобразования потенциальной энергии воды в электрическую энергию, с применением обычных методов

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Выходные параметры, а также энергетические и экономические показатели ВЭА во многом зависят от конструктивного выполнения отдельных частей ВЭА, особенно от конструкции ВК, преобразующего кинетическую энергию потока ветра в механическую, и от аэродинамических характеристик лопастей, а также мультипликатора, служащего для передачи вращательного движения от оси ВК к валу электрогенератора переменного тока ВЭА. Как было указано выше, выходная мощность маломощных ВЭА, амплитуда напряжения и частота тока в зависимости от скорости ветра изменяются в широких пределах. Так как выходная мощность ВЭА кубически зависит от скорости ветра, а в Азербайджанской Республике в зоне А (ветровые регионы Азербайджана со среднегодовой скоростью ветра свыше 4,0 м/с, куда входят регионы, расположенные на Апшеронском полуострове, а также прикаспийской узкой полосе) среднегодовая скорость ветра меняется в пределах 5–8, мгновенная – в пределах 2–30 м/с [3], то очевидно, что в результате повышения скорости ветра в 2–3 раза выходная мощность ВЭА должна увеличиваться в 8–27 раз, что приводит к аналогичному изменению вышеуказанных выходных параметров ВЭА. Для предотвращения возможности спада частоты и амплитуды вырабатываемого напряжения ниже допустимого значения и защиты от механической поломки ВК в современных ВЭА предусмотрено автоматическое торможение вращения ВК при недопустимо больших скоростях ветра. На рисунках 1 и 2 это соответствует участкам резкого спада характеристик, при скоростях ветра выше 25–27 м/с, за счет чего мощности обоих ВЭА сводятся к нулю.

Характер изменения выходной мощности ВЭА зависит от многих факторов, например, от конструкции, диаметра и угловой скорости ВК и количества его лопастей, особенно от аэродинамических коэффициентов лопастей, к числу которых относятся: коэффициент подъемной силы $C_{под}$, коэффициент лобового сопротивления $C_{лоб}$, коэффициент лобового давления $B_{лоб}$, коэффициент боковой силы $C_{бок}$, коэффициент торможения $C_{тор}$. Другими немаловажными параметрами, влияющими на аэродинамические характеристики ВК, являются углы атаки лопастей α между направлением ветрового потока и хордами лопастей; углы θ, характеризующие качество $K_{лоп}$ и профиля $\mu_{лоп}$ лопасти, определяемые соответственно как $K_{лоп} = \operatorname{tg}\theta = C_{под}/C_{лоб}$ и $\mu_{лоп} = 1/K_{лоп}$; а также относительные размахи лопастей, определяемые из отношения длины лопасти на длину её хорды [1].

Коэффициент подъемной силы $C_{под}$ непосредственно влияет на значение подъемной силы $P_{под}$, следовательно, и на вращающий момент, играющий решающую роль в процессе вращения ВК. При этом подъемная сила определяется из выражения:

$$P_{под} = C_{под} S\, q = C_{под}\, S\, \frac{\rho V^3}{2}. \qquad (1)$$

А лобовое сопротивление, являющееся также одним из сильно влияющих на значение вращающего момента ВК факторов, определяется из выражения:

$$P_{лоб} = C_{лоб}\, S\, q = C_{лоб}\, S\, \frac{\rho V^3}{2}, \qquad (2)$$

где S – площадь лопасти, м^2; $q = \rho\, V^3/2$ – скоростное давление, Н/м^2.

Коэффициент относительного размаха лопастей учитывается при определении силы трения воздуха о поверхности лопастей с различными длинами в моменты их вращения.

Все три коэффициента: $C_{под}$, $C_{лоб}$, $C_{бок}$ – изменяются в зависимости от изменения угла атаки лопастей.

При установлении аэродинамических характеристик лопастей ВК особое значение имеют исследования хода изменения зависимости $C_{под} = f(C_{лоб})$ при разных значениях угла атаки лопастей α. Эти графические зависимости, называемые полярами Лилиенталя, являются очень важными, так как характеризуют качества лопастей.

Все вышеуказанные параметры непосредственно влияют на численные значения коэффициента быстроходности Z и коэффициента использования энергии ветра ζ ВК, которые в свою очередь зависят от диаметра и угловой скорости ВК, а также от скорости ветра. Это более ясно видно из следующей формулы:

$$Z = \frac{\omega R_{ВК}}{V_{мгн}}, \qquad (3)$$

где Z – коэффициент быстроходности ВК; ω – угловая скорость ВК, рад/с; $R_{ВК}$ – радиус ВК, м; $V_{мгн}$ – мгновенная скорость ветра, м/с.

Как видно из уравнения (3), коэффициент быстроходности ВК Z от его диаметра $D_{ВК}$ ($R_{ВК} = D_{ВК}/2$) зависит прямо пропорционально, а от мгновенной скорости ветра $V_{мгн}$ – обратно. Но, с другой стороны, угловая скорость ВК имеет обратную пропорциональную зависимость от его диаметра, и эта зависимость имеет нелинейный характер. На основе теоретических и экспериментальных исследований установлено [1], что при прочих равных условиях чем больше число лопастей, их ширина и угол заклинивания, тем ниже быстроходность Z и выше относительное значение начального вращающего момента M_0 ВК. Для всех ВЭА с ма-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

лым диаметром ВК угловая скорость ВК в зависимости от повышения скорости ветра на начальном этапе (до скорости ветра $V_{\text{р}}^{\text{мин}}$) растет, что также связано с большим относительным значением начального вращающего момента. При этом, согласно формуле (1), коэффициент быстроходности ВК в начальный момент в интервале скорости ветра $V_{\text{тр}} < V < V_{\text{р}}^{\text{мин}}$ также растет, а при скоростях ветра выше $V_{\text{р}}^{\text{макс}}$ угловая скорость ω постепенно снижается, что приводит к аналогичному снижению значения коэффициента быстроходности Z.

Одним из непосредственно влияющих на значение ω факторов является число оборотов ВК в минуту, которое может быть определено из следующей зависимости:

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = 0{,}10467\, n, \qquad (4)$$

где n – число оборотов ВК, об/мин.

Как видно из формулы (4), угловая скорость ВК прямо пропорциональна числу его оборотов, которое в свою очередь зависит от аэродинамических характеристик лопастей, т. е. от качества лопастей и геометрического выполнения профиля, возможности изменения углов атаки, изменения скорости ветра и т.д. Кроме того, число оборотов ВК существенно сокращается по мере увеличения количества лопастей и диаметра ВК. При этом выходная мощность ВА сначала растет, потом стабилизируется, а далее снижается, как это видно на рис. 1. Что касается многолопастных тихоходных ВА, у них процесс насыщения мощности происходит при относительно малых мгновенных скоростях ветра. Поэтому тихоходные ВА более чувствительны к мгновенным изменениям скорости ветра, но у них, благодаря большому вращательному моменту ВК, такой ход изменения скорости ветра не имеет существенного отрицательного влияния на скорость вращения ВК и на режим работы самого ВА. Однако, из-за малой надежности многолопастных ВА при штормовом ветре, применение их в большой энергетике, в том числе для выработки электрической энергии, нецелесообразно.

Факторы, влияющие на энергетические и экономические характеристики ВЭА

Коэффициент использования энергии ветра ζ также является одним из параметров, сильно влияющих на энергетические параметры ВА, который может быть найден из следующего эмпирического выражения:

$$\zeta = \frac{E_{\text{ВА}}}{E_{\text{полн}}^{\text{ВК}}}, \qquad (5)$$

где $E_{\text{ВА}}$ – часть энергии потока ветра, преобразуемой посредством ВА в механическую; $E_{\text{полн}}^{\text{ВК}}$ – полная энергия ветрового потока, воспринятая посредством ВК.

По классической теории Жуковского для идеального ВК максимальное значение этого коэффициента может составить $\zeta_{\text{макс}} = 0{,}593$, а по теории Сабинина – $\zeta_{\text{макс}} = 0{,}687$. Однако, поскольку работа реального ВК сопровождается некоторыми потерями энергии, для тихоходных многолопастных ВА (с количеством лопастей от 4 до 24) максимальное значение этого коэффициента составляет не более 0,35÷0,38, а для быстроходных ВА (с количеством лопастей до трех) 0,45÷0,48.

Несмотря на то, что теоретически численное значение коэффициента использования энергии ветра по мере увеличения числа лопастей ВК снижается, с увеличением диаметра – нелинейно растет. Поэтому у ВЭА с большим диаметром ВК этот коэффициент приобретает максимальное значение.

Сказанное более наглядно видно на рис. 3, где приведены графические зависимости коэффициента использования энергии ветра ζ от коэффициента быстроходности Z для ВА с разным количеством лопастей [2].

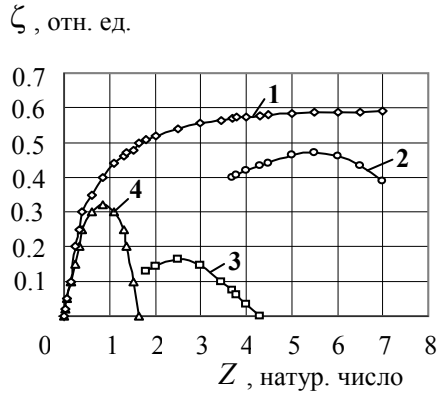

Рис. 3. Зависимость коэффициента использования энергии ветра от коэффициента быстроходности:
1 – идеальное ВК; 2, 3, 4 – для двухлопастного, четырехлопастного и многолопастного ВК соответственно
Fig. 3. Dependence of output coefficient on the high-speed running factor:
1 – perfect WR ; 2, 3, 4 – for two-bladed, four- and multi-blade WR respectively

Как видно на рис. 3, для каждого типа ВА при определенном значении коэффициента быстроходности Z достигается максимальное значение коэффициента использования энергии ветра ζ. Так, для двухлопастного ВК максимальное значение коэффициента использования энергии ветра составляет ζ = 0,47; и это происходит при быстроходности ВК Z = 5,5. А для двух и четырехлопастного ВК максимальные значения коэффициента ζ состав-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ляют 0,16 и 0,32 и соответствуют значениям коэффициента быстроходности 2,5 и 0,9. Происходит это из-за того, что при резких изменениях мгновенных скоростей ветра синхронное изменение угла атаки лопастей ВК становится невозможным, что приводит к изменению поляр Лилиенталя, которые в свою очередь характеризуют качество лопастей для разных значений угла атаки α. Поэтому части кривых, расположенные до максимального значения коэффициента быстроходности (на рис. 3 участки левее от точек пика) соответствуют значениям мгновенной скорости ветра $V_{тр} < V < V_{р}^{мин}$, а части кривых, расположенные правее максимума коэффициента Z, – мгновенным скоростям ветра выше его максимального рабочего значения ($V > V_{р}^{макс}$). При этом в первом случае из-за малой плотности ветрового потока его кинетическая энергия тоже бывает меньше, и ВК вращается с наименьшей угловой скоростью. В результате ветровой поток, совершая малую полезную работу, переходит на обратную (тыловую) сторону ВК, и при таком режиме работы коэффициент использования энергии ветра тоже приобретает наименьшее значение. А во втором случае значение коэффициента использования энергии ветра уменьшается по другой причине. Так, при значениях скорости ветра выше максимальной рабочей скорости, скорость вращения ВК увеличивается до такой степени, что в конечном итоге, с точки зрения наблюдателя, его лопасти превращаются в сплошную плоскость, расположенную в нормальном направлении относительно поступления потока ветра. Ввиду этого повышаются численные значения коэффициентов лобового сопротивления, лобового давления и торможения, а коэффициент подъемной силы, наоборот, уменьшается, что приводит к аналогичному уменьшению номинального вращающего момента ВК. В конечном итоге отношение максимального вращающего момента к номинальному растет, что приводит к перегрузке ВК. Поэтому, несмотря на максимальную плотность и энергию ветрового потока на передней части ВК, этот поток опять же, как в предыдущем случае, не может перейти на обратную сторону ВК, совершая максимальную полезную работу. Для предотвращения указанного недостатка в большинстве ВА, особенно в ВЭА, применяются поворотные механизмы, служащие для автоматического изменения углов атаки лопастей ВК в соответствии с изменением скорости ветра. Однако – хотя при использовании таких механизмов возможности образования ветрового потока перед ВК, противодействующего поступлению основного ветрового потока на поверхности лопастей частично устраняются, – в целом из-за инерциальности большинство поворотных механизмов не могут синхронно менять углы атаки лопастей в соответствии с мгновенным изменением скорости ветра, особенно при стохастическом ходе изменения скорости ветра [1, 4–6]. Авторами данной статьи разработаны механизмы поворота лопастей ВК как для горизонтально осевых быстроходных (с количеством лопастей до трех), так и для многолопастных тихоходных ВА, которые за счет лобового давления основного ветрового потока, воздействующего непосредственно на поверхность лопастей, автоматически изменяют углы атаки в соответствии с изменением мгновенной скорости ветра [7, 8]. Однако, несмотря на высокое быстродействие, эти механизмы пока не применялись в конкретных ВА.

Проведенный литературный анализ и экспериментальные результаты показывают, что по мере увеличения диаметра двух или трехлопастных ВК, коэффициент использования энергии ветра ζ достигает своего максимального значения ($\zeta_{макс}$ = 0,48), одновременно коэффициент быстроходности Z приобретает оптимальное среднее значение (5< Z <6). Обычно диаметр ВК многолопастных тихоходных ВА бывает не более 6 м, и такие ВА используются только в частном секторе для обеспечения индивидуальных нужд. Это связано с тем, что если, с одной стороны, за счет большого количества лопастей эти ВА могут трогаться и входить в рабочий режим при относительно малых скоростях ветра, то, с другой стороны, при больших диаметрах ВК устойчивость ВА к большим скоростям ветра резко падает. Например, если мощные быстроходные ВА, предназначенные для выработки электрической энергии, при скоростях ветра вплоть до 60 м/с не разрушаются и сохраняют работоспособность (фактически, работа таких ВЭА при повышении скорости ветра до 30 м/с автоматически приостанавливается), то многолопастные ВА при скоростях ветра выше 30 м/с механически разрушаются. Все сказанное относится к многолопастным ВА с диаметрами ВК до 5÷6 м, а если диаметр ВК таких ВА будет больше 10 м, то они могут выйти из строя даже при скоростях ветра 20 м/с. Следовательно, дальнейшее увеличение диаметра ВК нецелесообразно. Все эти факторы непосредственно влияют как на себестоимость самого ВА, так и на стоимость вырабатываемой энергии. Проведенный анализ с учетом формулы (3–5) и рис. 3 показывает, что при прочих равных условиях (одинаковых аэродинамических характеристиках, коли-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

чествах лопастей и т.д.) диаметр ВК и среднегодовая скорость ветра существенно влияют на выходную мощность, а также на себестоимость ВА и стоимость вырабатываемой энергии. Ниже рассматривается влияние мощности ВЭА, диаметра ВК и среднегодовой скорости ветра на энергетические и экономические параметры ВЭА.

Как известно из литературы [2, 9–11], по мере увеличения диаметра ВК и среднегодовой скорости ветра стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, существенно снижается. В табл. 1 приведена зависимость стоимости электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, от среднегодовой скорости ветра, а в табл. 2 – зависимость стоимости вырабатываемой энергии от выходной мощности ВЭА для разных значений среднегодовой скорости ветра. Необходимо отметить, что в таблицах денежные единицы приведены в российских рублях (RUR) с учетом того, что в данное время в Азербайджане 1 RUR составляет 0,0168 AZN и 0,016 долларов США (этот курс может меняться).

Таблица 1

Зависимость стоимости энергии, вырабатываемой ВЭА, от среднегодового значения скорости ветра

Table 1

Dependence of the cost of produced power WPU on average annual wind speed

Среднегодовая скорость ветра, м/с	4	5	6	7	8	9	10
Стоимость вырабатываемой энергии, RUR /(кВт·ч)	2,625	1,69	1,125	1,113	0,875	0,684	0,631

В табл. 1 учтены реальные значения среднегодовой скорости ветра в ветровых зонах А и Б (все регионы Азербайджанской Республики со среднегодовой скоростью ветра от 2,0 до 4,0 м/с) Азербайджана [3]. Как видно, при изменении среднегодовой скорости ветра в 2,5 раза стоимость вырабатываемой электроэнергии снижается в 4,16 раза. Но все данные, указанные в табл. 1, относятся к горизонтально осевым ВЭА с количеством лопастей не более трех. А для маломощных ВЭА по мере увеличения количества лопастей оптимальное значение стоимости энергии смещается в сторону снижения среднегодовой скорости ветра, и наименьшее значение стоимости электроэнергии достигается при среднегодовых значениях скорости ветра 6–8 м/с.

Как видно из табл. 2, стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, снижается как с увеличением его выходной мощности, так и с ростом среднегодовой скорости ветра.

Таблица 2

Зависимость стоимости вырабатываемой энергии от выходной мощности ВЭА для различных значений среднегодовой скорости ветра

Table 2

Dependence of the cost produced power on the output power WPU for different values of average annual wind speed

Мощность ВЭА, кВт	Стоимость вырабатываемой энергии, RUR/(кВт·ч)			
	$V_{ср}^{г}$ = 4,0 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 5,5 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 7,5 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 9,5 м/с
40	5,937	4,059	3,127	1,950
100	5,308	3,621	2,626	1,878
500	3,438	2,435	1,623	1,122
1 000	2,499	1,751	1,090	0,748
1 500	2,252	1,528	1,003	0,684
2 000	2,173	1,472	0,947	0,653
2 500	2,165	1,464	0,939	0,645
3 000	2,157	1,456	0,931	0,629

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Следует отметить, что в данное время в Азербайджане стоимость электроэнергии для населения от сети централизованного электроснабжения составляет 6,0 гяпик за 1 кВт·ч (1,0 гяпик = 0,01 AZN). В российских рублях это составляет 3,571 RUR. Как видно из табл. 2, для ветровых регионов со среднегодовой скоростью выше 5,5 м/с стоимость за 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, даже при диаметре ВК 40 м, ниже, чем от централизованной электрической сети. Это литературные данные, подтвержденные теоретическими и практическими исследованиями ряда зарубежных коллег [2, 9–11], однако в настоящее время они не могут быть однозначно приняты для условий Азербайджана, так как Азербайджан не является производителем ВЭА большой мощности (свыше 0,5 МВт), и пока ещё покупает их в других странах мира. Поскольку, в зависимости от себестоимости, каждый ВЭА промышленной мощности имеет определенный срок окупаемости, естественно, это отрицательно влияет на общую стоимость электроэнергии, производимой ВЭА. Тем не менее в Азербайджане в регионах со среднегодовой скоростью ветра выше 6,0 м/с стоимость электроэнергии, получаемой от ВЭА, вполне может конкурировать со стоимостью энергии от электрической сети. Учитывая это, в данное время под руководством Государственного агентства по альтернативным и возобновляемым источникам энергии Азербайджана в различных ветровых регионах республики установлены ВЭА с мощностями от 0,75 до 2,5 МВт, которые работают параллельно с электрической сетью. Причем установленная стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, составляет 4,5 гяпик / кВт·ч (2,68 RUR).

В табл. 3 приведена стоимость вырабатываемой электроэнергии (от среднегодовой скорости ветра) для разных мощностей ВЭА (без учета расходов на изготовление самого ВЭА), которая на данном этапе может быть принята как более реальная для Азербайджана. Как видно, при среднегодовых скоростях ветра до 6,0 м/с стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, превышает стоимость сетевой энергии. Это имеет место для ВЭА мощностью 400–500 кВт. А для более мощных ВЭА (от 0,5 до 2 МВт и выше), даже при малых значениях среднегодовой скорости ветра (до 6,0 м/с), стоимость вырабатываемой электроэнергии выше стоимости сетевой энергии. На первый взгляд, такая ситуация невозможна, поскольку противоречит данным, приведенным в табл. 2. Однако все данные из табл. 3 вполне соответствуют реальности. Связано это с тем, что для более мощных ВЭА максимальное значение коэффициента использования энергии ветра достигается при быстроходности в пределах от 5,0 до 6,0. А подобная быстроходность у мощных ВЭА с большим диаметром ВК достигается только при мгновенных скоростях ветра выше 13 м/с, и если ознакомиться с вероятностью распределения мгновенных скоростей ветра для разных значений среднегодовой скорости, то можно убедиться, что не только в условиях Азербайджана, но также во всех ветровых зонах Земного шара чем меньше среднегодовая скорость ветра, тем меньше вероятность повторения больших мгновенных скоростей ветра в годичном цикле [3]. В работе [3] вероятность распределения разных мгновенных значений скорости ветра приведена для всей территории Азербайджана в промилле. При этом была учтена и возможность изменения частотных характеристик ветра на высотах до 2 км. Исходя из этих соображений, как видно из табл. 3, у более мощных ВЭА стоимость вырабатываемой электроэнергии при среднегодовых скоростях ветра выше 6,0 м/с резко снижается.

Таблица 3

Зависимость стоимости вырабатываемой энергии от среднегодовой скорости ветра для разных мощностей ВЭА

Table 3

Dependence of the cost of produced power on the average annual wind speed for different power output WPU

$V_{ср}^{г}$, м/с	Выходная мощность ВЭА, кВт	
	400÷500	1 000÷2 000
	Стоимость энергии, RUR/(кВт·ч)	
4	14,32	34,22
5	7,16	11,94
6	4,62	5,17
7	3,18	2,94
8	2,71	2,15
9	2,55	1,59
10	2,39	1,43

Как было указано выше, на стоимость вырабатываемой электроэнергии существенно влияют расходы на изготовление ВК и дополнительные расходы (изготовление опорной конструкции (мачты), электрогенератора и конструкции для прикрепления его к мачте; система автоматического управления выходными параметрами электрогенератора переменного тока, мультипликатор, тормозная система, а также транспортировка и установка ВЭА и т. д.), которые тоже, в зависимости от диаметра ВК и среднегодо-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

вой скорости ветра, изменяются в широких пределах. В табл. 4 приведена зависимость стоимости ВК, дополнительных расходов, а также стоимости вырабатываемой энергии от мощности ВЭА для разных значений среднегодовой скорости ветра, которые наблюдаются на Апшеронском полуострове, а также в некоторых прикаспийских регионах Азербайджанской Республики. Как видно из табл. 4, для среднегодовой скорости ветра 8,0 м/с расходы на изготовление ВК несколько выше, чем для среднегодовой скорости 5,5 м/с, что показывает необходимость разработки более устойчивой к большим мгновенным скоростям ветра конструкции ВК. Кроме того, дополнительные расходы на изготовление ВЭА в зависимости от увеличения среднегодовой скорости ветра тоже растут. Но эти факторы мало влияют на общие экономические и энергетические показатели ВЭА, так как, во-первых, даже при одинаковых диаметрах ВК, стоимость электроэнергии, вырабатываемой при среднегодовой скорости ветра 8,0 м/с, значительно ниже стоимости энергии, вырабатываемой при среднегодовой скорости ветра 5,5 м/с. Во-вторых, если для среднегодовой скорости ветра 5,5 м/с стоимость электроэнергии при увеличении диаметра ВК от 5 м до 90 м снижается в 2,25 раза, то для среднегодовой скорости ветра 8,0 м/с – в 2,75 раза, т. е. во втором случае стоимость вырабатываемой электроэнергии снижается относительно большими темпами. Например, если для продажи электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, установленным в ветровой зоне со среднегодовой скоростью ветра 8,0 м/с, за 1,87 RUR /(кВт·ч) вполне достаточно использовать ВЭА с диаметром ВК 20 м, то для продажи электроэнергии по указанной стоимости в зонах со среднегодовыми скоростями ветра 6,5 м/с, 5,5 м/с и 4,0 м/с необходимо использовать ВЭА с диаметрами ВК 30 м, 36 м и 74 м соответственно. Все эти факторы, естественно, влияют на экономические показатели ВЭА и в целом на величину общего капиталовложения для изготовления ветроэнергетической установки.

Таблица 4

Зависимость стоимости ВК, дополнительных расходов, а также стоимости вырабатываемой энергии от мощности ВЭА для разных значений среднегодовой скорости ветра

Table 4

Dependence of the of WR cost, additional charges and produced power on the output power WPU for different values of average annual wind speed

Диаметр ВК, м	Стоимость ВК, тыс. RUR		Дополнительные расходы, тыс. RUR		Стоимость энергии, RUR/(кВт·ч)	
	$V_{ср}^{г}$ = 5,5 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 8,0 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 5,5 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 8,0 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 5,5 м/с	$V_{ср}^{г}$ = 8,0 м/с
5	501,4	628,7	1 002,8	1 058,5	8,44	4,38
10	716,3	907,3	1 185,8	1 249,5	6,84	3,02
20	1 623,5	2 093,1	1 440,5	1 496,2	5,49	2,15
30	2 809,3	5 308,3	1 997,6	2 252,2	4,70	1,91
40	14 866,3	17 492,6	2 873,0	3 183,4	4,22	1,67
50	25 180,3	27 297,3	3 652,9	3 939,4	3,90	1,59
60	32 486,2	34 229,1	4 313,5	4 623,8	3,66	1,51
70	38 112,8	39 728,3	4 687,5	5 188,9	3,58	1,51
80	42 481,9	44 041,8	5 403,8	5 626,6	3,66	1,51
90	46 039,3	47 479,8	5 746,0	5 937,0	3,74	1,59

Другими факторами, значительно влияющими на экономические и энергетические параметры ВЭА промышленного масштаба, являются технические параметры отдельных конструктивных частей. К таким конструктивным частям ВЭА относятся: мачта, ступица ВК, его лопасти и механизмы, предназначенные для автоматического изменения углов атаки в соответствии с изменением мгновенной скорости ветра; мультипликатор для повышения числа оборотов оси вращения ВК до необходимого значения для нормальной работы электрогенератора; корпус электрогенератора и конструкции для прикрепления его к мачте, кабели для безопасной передачи электроэнергии потребителю и др.

Анализ влияния мультипликатора на энергетические и экономические показатели ВЭА

Основными параметрами, влияющими на энергетические и экономические показатели всех видов машин и механизмов, в том числе на ВЭА, являются КПД и надежность конструкции. Высокая надежность и долговечность ВЭА приводят к сокращению числа остановок на капитальный ремонт, что, в свою очередь, приводит к снижению расходов на ремонт и сроков окупаемости ВЭА. Как было указано выше, важным фактором является и качество конструктивного выполнения мультипликатора, играющего роль трансмиссии между валом электрогенератора и осью вращения ВК. Учитывая это, авторами статьи на кафедре «Детали машин» Азербайджанского техниче-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ского университета под руководством проф. А.И. Абдуллаева был разработан 3, 5, 7-и ступенчатый малогабаритный мультипликатор типа МПТ новой конструкции. Ниже анализируется ожидаемая эффективность от применения этого МПТ на ВЭА типа D70. На рис. 4 приведена кинематическая схема мультипликатора, используемого в данное время в ВЭА D70, а на рис. 5 – схема разработанного авторами МПТ [12,13].

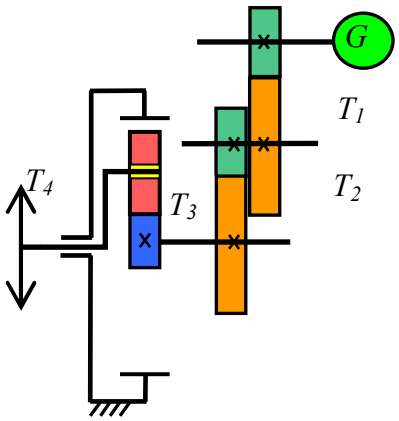

Рис. 4. Кинематическая схема мультипликатора ВЭА типа D70
Fig. 4. Kinematic scheme of WPU multiplier of D70 type

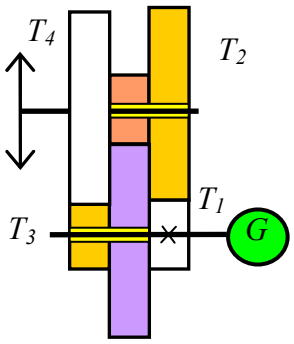

Рис. 5. Кинематическая схема МПТ
Fig. 5. Kinematic scheme of PTM (packet-type multiplier)

В отличие от обычных мультипликаторов, применяемых в ВЭА типа D70, у МПТ, представленного на рис. 5, блоки свободно вращающихся двухободных зубчатых колес установлены на двухслойных подшипниках скольжения. Так как их направления вращения совпадают с направлениями вращения валов, сила движения, создаваемая за счет воздействия смазочного масла, оказывает положительное влияние на вращающие моменты выходного вала, в результате общий КПД МПТ повышается примерно на 10 %, металлоемкость снижается на 20–30 %, дополнительные затраты сводятся к минимуму, и в конечном итоге общие материальные расходы также значительно сокращаются. Все это нашло подтверждение при экспериментах, проводимых на лабораторном макете МПТ, разработанного на вышеуказанной кафедре.

Из теоретических расчетов, проведенных с учетом конструктивного выполнения экспериментального МПТ, выявлено, что в сравнении с обычным мультипликатором, применяемым в ВЭА типа D70, КПД МПТ на 5,7 % выше. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Таблица 5

Технические и энергетические показатели, полученные при использовании мультипликатора ВЭА типа D70 и МПТ

Table 5

Technical and power performance obtained by using a WPU multiplier of D70 type and PTM

№	Параметры	Тип мультипликатора	
		D70	МПТ
1.	Число оборотов ВК, об/мин	20	20
2.	Число оборотов вала электрогенератора, об/мин	1 800	1 800
3.	Диаметр ВК, м	70,5	68
4.	Мощность на валу ВК, кВт	1 785	1 675
5.	КПД мультипликатора, отн. ед.	0,866	0,923
6.	Число передачи мультипликатора	90	90
7.	Мощность у входного вала мультипликатора, кВт	1 767	1 658
8.	Мощность у выходного вала мультипликатора, кВт	1 530	1 530
9.	Номинальная выходная мощность электрогенератора, кВт	1 500	1 500
10.	Вращающий момент у входного вала мультипликатора, Нм	843,7·103	791,7·103
11.	Вращающий момент у выходного вала мультипликатора, Нм	8,12·103	8,12·103
12.	Модуль зацепки зубчатого колеса для 1, 2 и 3-й ступеней	14, 10, 8	20

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Из таблицы следует, что если КПД обычных мультипликаторов составляет 86,6 %, то КПД МПТ составляет 92,3 %. А это дает возможность сохранять выходную мощность ВЭА на одном и том же уровне при одинаковой скорости ветра и использовать ВК с относительно малым диаметром. Из нижеследующего выражения также ясно видно, что, при прочих равных условиях (при постоянных значениях скорости ветра и плотности ветрового потока), чем больше становится КПД ВЭА, тем меньше должен быть диаметр ВК для получения одинаковой выходной мощности:

$$D_{\text{ВК}} = \sqrt{\frac{8P}{\pi\eta\rho\ V^3}}\ , \qquad (6)$$

где P – мощность, развиваемая на ВК, Вт; η – КПД ВЭА, отн. ед.; ρ – плотность воздушной массы, отн. ед. (для нормальных условий, т. е. при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и температуре воздуха 25 ^{0}С – ρ = 1,225 кг/м^3); V – скорость ветра, м/с.

Расчетным путем были определены конструктивные, технические, экономические и энергетические показатели устройства для случаев применения обычного мультипликатора и мультипликатора типа МПТ в ВЭА типа D70. Для повышения точности расчетов были применены методики, приведенные в некоторых литературных источниках [13–17]. Результаты расчетов также приведены в табл. 5.

В результате проведенных расчетов определено, что разработанный авторами МПТ от МПТ, разработанного в 80-х годах прошлого века в Федеративной Республике Германии для применения в ВЭА мощностью ~3 МВт [18], отличается по некоторым признакам, благодаря которым можно с применением 3-х ступенчатой передачи увеличить число оборотов оси вращения ВК в 90 раз, т. е. повысить число оборотов с 20 об/мин до 1 800 об/мин (до необходимого значения для электрических генераторов переменного тока), и с наименьшими потерями передавать это вращательное движение на вал электрогенератора. При этом для поддержания мощности ВЭА типа D70 на номинальном уровне (P_{D70} = 1 500 кВт) достаточно использовать ВК диаметром не $D_{D70}^{\text{ВК}}$ = 70,5 м, как это имеет место в ВЭА D70 с обычным мультипликатором, а $D_{\text{МПТ}}^{\text{ВК}}$ = 68 м. Уменьшение диаметра ВК (размеров лопастей), с одной стороны, приводит к снижению массы, а с другой стороны, снижает статические и динамические нагрузки на опорные подшипники, благодаря чему срок службы ВК и отдельно лопастей значительно увеличивается.

Относительно высокая степень надежности МПТ приводит к повышению надежности и увеличению срока службы самого ВЭА, а также к существенному снижению расходов на ремонт. Уменьшение диаметра ВК, естественно, приводит к экономии материала, из которого изготавливаются его лопасти. Кроме того, уменьшение размеров лопастей ВК приводит также к упрощению процессов их изготовления и транспортировки.

Ниже приводятся расчеты выходной мощности ВЭА типа D70 с учетом КПД мультипликатора, используемого в настоящее время:

$$P_{D70}^{\text{ВЭА}} = P_{\text{ВК}} \cdot \eta_{\text{прдш}} \cdot \eta_{\text{мульт}} \cdot \eta_{\text{ген}} = \qquad (7)$$

$$= 1785 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}866 \cdot 0{,}98 = 1\ 500 \text{ кВт},$$

где $P_{\text{ВК}}$ – номинальная мощность ВК ВЭА типа D70 (при оптимальной скорости ветра для данного ВЭА 12,5 м/с составляет 1785 кВт) кВт; $\eta_{\text{подш}}$ – КПД основного опорного подшипника, отн. ед.; $\eta_{\text{мульт}}$ – КПД мультипликатора, применяемого в ВЭА типа D70, отн. ед.; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД электрогенератора, отн. ед.

Если в ВЭА типа D70 использовать мультипликатор типа МПТ, то развиваемая на выходе электрогенератора мощность может быть определена из выражения:

$$P_{D70}^{\text{ВЭА}} = P_{\text{ВК}} \cdot \eta_{\text{подш}} \cdot \eta_{\text{МПТ}} \cdot \eta_{\text{ген}} = \qquad (8)$$

$$= 1785 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}923 \cdot 0{,}98 = 1\ 598 \text{ кВт},$$

где $\eta_{\text{МПТ}}$ – КПД мультипликатора типа МПТ, отн. ед.

Из сопоставления формул (7) и (8) видно, что разница мощностей составляет 98 кВт.

Если учесть, что при использовании обычного мультипликатора среднегодовое количество электрической энергии, вырабатываемой ВЭА типа D70 с мощностью 1 500 кВт, составляет 5,102 ГВт·ч/год, то среднесуточная выработка электроэнергии этого ВЭА составит $E_{D70}^{\text{ВЭА}}$ = 5,102 · 1 000 / 365 = 13 978 кВт·ч/день, а среднее количество рабочих часов в сутки 13 978/1 500 = 9,3 ч.

Известно, что в зависимости от характера изменения скорости ветра ВЭА в течение суток работает в разных режимах, в результате чего его выходная мощность меняется в определенном интервале, особенно при подключении ВЭА к нагрузке с потребляемой мощностью выше 0,7 $\cdot P_{D70}^{\text{ВЭА}}$. Но в данном случае, для того чтобы упростить расчеты и процесс сопоставления экономических показателей ВЭА типа D70, для применения мультипликаторов двух видов учтены стационарные режимы работы ВЭА. Для сопоставления находим количество энергии, которую может вырабатывать ВЭА типа D70 в течение суток, при прочих равных условиях, для случая применения мультипликатора типа МПТ: $P_{\text{МПТ}}^{\text{день}}$ = 1598 кВт· 9 ч = = 14861 кВт·ч/сут.

Как видно из полученных результатов, при применении мультипликатора типа МПТ количество

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

дополнительно вырабатываемой энергии в течение суток составляет 14 861 – 13 978 = 883 кВт·ч/сут. Принимая это во внимание, можно найти количество дополнительного дохода в течение одного года за счет применения мультипликатора типа МПТ в одном комплекте ВЭА типа D70: M = 883 кВт·ч · 365 × × 0,06 AZN/ кВт·ч = 19 338 AZN = 1 150 998 RUR.

Следует иметь в виду, что при проведении последнего расчета была учтена реальная стоимость электроэнергии, получаемой в настоящее время от централизованной электросети и принятая Тарифной комиссией для населения Азербайджана. Она составляет $Q_{сеть}$ = 0,06 AZN/ кВт·ч. А с учетом установленной стоимости электроэнергии, вырабатываемой в настоящее время ВЭА в условиях Азербайджана (0,045 AZN/ кВт·ч), этот показатель составляет M = 19 338 (0,045/0,06) = 14504 AZN = 86 3278 RUR.

Таким образом, при использовании в ВЭА типа D70 мультипликатора типа МПТ только за счет повышения КПД в течение одного года дополнительная выработка электроэнергии составляет 322 295 кВт·ч/год. А количество сэкономленных денежных средств составляет 19 338 AZN. Для одного ВЭА это может считаться хорошими показателями. Но, необходимо учесть, что при этом следует использовать электрогенератор мощностью 1 600 кВт, что не может оказать существенного влияния на уровень затрат на его изготовление.

Как видно из анализа полученных результатов, с конструктивной, технической и энергетической точки зрения применение в ВЭА D70 мультипликатора типа МПТ дает возможность сэкономить значительное количество материальных и денежных средств. Факторы, которые также непосредственно или же косвенно позволяют экономить расходы на изготовление ВЭА с одинаковой выходной мощностью: уменьшение размеров лопастей и диаметра ВК, а также самого мультипликатора (снижение расходов металлических и пластических материалов, а также денежные расходы на производство, упаковку и транспортировку). Из приблизительного расчета видно, что при использовании мультипликатора типа МПТ за счет сокращения указанных расходов общая стоимость ВЭА снижается на 10–15 %.

Выводы

1. Из проведенных исследований следует, при использовании ВЭА относительно малой и средней мощности (до 200 кВт) независимо от погодных условий и режимов изменения скорости ветра для бесперебойного и надежного снабжения потребителей электроэнергией, что такие ВЭА должны обеспечиваться аккумулирующими системами. А у ВЭА с большой выходной мощностью (до несколько МВт) использование таких систем не оправдывается, и их работа параллельно с электрической сетью считается более целесообразной.

2. Выявлены механизмы изменения коэффициента быстроходности и коэффициента использования энергии ветра для различных видов горизонтально осевых ВА и приведены графические зависимости этих коэффициентов. Установлено, что для быстроходных ВА с количеством лопастей не более трех коэффициент быстроходности меняется в интервале $Z_Б$ = 4÷7 с максимальным значением $Z_Б^{макс}$ = 5,5 , а для тихоходных многолопастных ВА этот коэффициент лежит в пределах $Z_Т$ = 0÷1,7 с максимальным значением $Z_Т^{макс}$ = 0,9.

3. Установлено, что как коэффициент использования энергии ветра ζ, так и коэффициент быстроходности Z наиболее сильно зависят от диаметра ВК, количества лопастей и их конструктивного выполнения (длина, хорда, качество и профиль, а также пределы и способы изменения углов атаки лопастей).

4. Определено, что для тихоходных ВА максимальное значение коэффициента использования энергии ветра $\zeta_{макс}$ меняется в пределах 0,35÷0,38, а для быстроходных – в интервале 0,45÷0,48; для ВЭА типа D70, принятого авторами в качестве объекта исследования, максимальное значение этого коэффициента составляет $\zeta_{макс}$ = 0,47.

5. Выявлено, что стоимость электроэнергии, вырабатываемой ВЭА, по мере роста среднегодовой скорости ветра и выходной мощности ВЭА экспоненциально снижается. В зависимости от диаметра ВК стоимость вырабатываемой электроэнергии меняется аналогичным образом, однако, вначале (при диаметрах ВК ниже 80 м) её значение экспоненциально уменьшается, и для относительно низких значений среднегодовой скорости ветра это снижение имеет более серьёзный характер, а при дальнейшем увеличении диаметра ВК (выше 80 м) стоимость энергии нелинейным образом постепенно растет.

6. Определено, что по мере увеличения диаметра ВК и мощности ВЭА капиталовложение для его производства и другие расходы также растут, однако для больших диаметров темпы этого роста несущественны. Это показывает, что изготовление ВЭА с большим диаметром ВК и большой выходной мощностью, и использование этих ВЭА параллельно с централизованной электросетью как с экономической и энергетической, так и с экологической точки зрения целесообразно.

7. Установлено, что одним из существенных факторов, влияющих на надежность работы и КПД ВЭА промышленной мощности, а также на стоимость вырабатываемой электроэнергии, является конструкция мультипликатора, играющего роль механической трансмиссии между осью вращения ВК и валом электрогенератора. Выявлено, что мультипликатор, используемый в настоящее время в ВЭА типа D70, имеет сложную конструкцию и большие габаритные размеры. На кафедре «Детали машин» Азербайджан-

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

ского технического университета разработан малогабаритный 3, 5, 7-и ступенчатый мультипликатор пакетного типа, установленный на двух валах, у которого блоки свободно вращающихся двухободных зубчатых колес установлены на двухслойные подшипники скольжения.

8. Определено, что за счет совпадения направления вращения двухободных зубчатых колес с направлениями вращения валов, сила движения, создаваемая под воздействием смазочного масла, оказывает положительное влияние на вращающие моменты выходного вала, в результате чего общий КПД МПТ повышается примерно на 10 %, металлоемкость снижается на 20–30 %, дополнительные затраты сводятся к минимуму, и, в конечном итоге, общие материальные расходы также значительно сокращаются. А это приводит как к снижению потерь энергии до минимума, так и снижению материальных расходов на 10–15 %.

9. Расчетным путем были определены конструктивные, технические, экономические и энергетические показатели ВЭА типа D70 для двух случаев: применения обычного мультипликатора и мультипликатора типа МПТ. Выявлено, что в сравнении с другими мультипликаторами, выполняющими одинаковую функцию, МПТ обладает относительно большим передаточным числом и меньшим количеством конструктивных элементов, за счет чего имеет маленькие габаритные размеры, легкий вес и высокую надежность.

10. В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведённых на лабораторном макете МПТ, установлено, что применение пакетного мультипликатора в ВЭА D70 дает возможность повысить его КПД при стабильной мощности электрогенератора и частоте вырабатываемого тока или же уменьшении диаметра ВК при одинаковой выходной мощности ВЭА, что с энергетической и экономической точки зрения является преимуществом этого мультипликатора.

11. Определено, что использование в ВЭА типа D70 мультипликатора типа МПТ превращает энергию ветрового потока в другой вид энергии как в промежуточном (механическую энергию на ВК), так и в конечном этапах (в электрическую энергию) с оптимальными выходными параметрами (со стабильной частотой и амплитудой).

Список литературы

1. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. Де Рензо Д. Ветроэнергетика. М.: Энергоатомиздат, 1982.

3. Salamov O.M., Mamedov F.F., Samedova U.F. Prospects of Wind Energy Application in Azerbaijan. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2010. No. 1 (81). P. 132–144.

4. Патент РФ. RU 2282052 МКИ6 F03D 7/02. Механизм поворота лопастей ветроколеса /Тучин В.А., Бондарчук В.Ф., Рыбаулин В.М. // 2004.

5. Патент РФ. RU 2193688 МКИ6 F03D 3/00, 3/02. Ветроагрегат для ветряка / Елескин В.Г., Лапочкин Ю.В. и др. // 2001.

6. Патент РФ. RU 2399791 МКИ6 F03D 3/02, 3/06. Ветродвигатель / Чебоксаров В.В., Чебоксаров В.В. // 2010.

7. Положительное решение предварительной экспертизы Азербайджанского Комитета по стандартизации, метрологии и патентным делам по заявке № а 2012 0009 МКИ 6 3/02, 7/02, 7/06. Механизм для поворота лопастей ветроколеса / Саламов О.М., Абдуллаев А.И., Саламов А.А. // 2012.

8. Положительное решение предварительной экспертизы Азербайджанского Комитета по стандартизации, метрологии и патентным делам по заявке № а 2012 0020 МКИ 6 3/02, 7/02, 7/06. Механизм для поворота лопастей ветроколеса / Саламов О.М. // 2012.

9. Couture T., Gagnon Y. An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment // Energy Policy. 2010. Vol. 38. No 2. P. 955–965.

10. Mendonca M. Feed-in Tariffs //Accelerating the Deployment of Renewable Energy. London: Earth Scan. 2007.

11. Hirsh R.F. PURPA: The Spur to Competition and Utility Restructuring // The Electricity Journal. 1999. Vol. 12. Issue 7. P. 60–72.

12. Абдуллаев А.И., Саламов О.М., Саламов А.А. Пути оптимизации процессов преобразования энергии ветра в механическую и электрическую энергии // Материалы республиканской конференции: Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии. Баку, 2011. С. 41–43.

13. Абдуллаев А.И., Мирзоев Г.И., Саламов А.А. Новое конструктивное решение мультипликаторов ветроагрегатов // Материалы конференции, посвященной к 80-летию проф. И.А. Бахтиярова. Баку, 2008. С. 5–11.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

14. Наджафов А.М. Поисковое конструирование механического привода штанговых насосов. Баку: Элм, 2008.

15. Иванов М.Н. Детали машин. М.: Высшая школа, 1976.

16. Чернявский С.А., Ицкович Г.М. и др. Курсовое проектирование деталей машин. М.: Машиностроение, 1979.

17. Абдуллаев А.И., Мамедов Р.К. и др. Детали машин и основы конструирования. Баку: Элм, 2001.

18. Feustel J., Helm S. Ausarbeitung baureifer Unterladen fur GROVIAN (Verfasser F. Korber) // Ber. Kernforschungsanlage Julich. 1978. № Conf. 27. P. 299–312.

References

1. Shefter Ya.I.. Ispol'zovanie ènergii vetra. Moscow: Ènergoatomizdat Publ., 1983 (in Russ.).

2. De Renzo D. Vetrènergetika. Moscow: Ènergoatomizdat Publ., 1982 (in Russ.).

3. Salamov O.M., Mamedov F.F., Samedova U.F. Prospects of Wind Energy Application in Azerbaijan. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2010, no. 1 (81), pp.132–144 (in Eng.).

4. Tuchin V.A., Bondarcnuk V.F., Rybaulin V.M. Mehanizm povorota lopastej vetrokolesa. Patent Russian Federation. RU 2282052 MKI6 F03D 7/02. 2004 (in Russ.).

5. Eleskin V.G., Lapochkin Yu.V. et al. Vetroagregat dlâ vetrâka. Patent Russian Federation. RU 2193688 MKI6 F03D 3/00, 3/02. 2001 (in Russ.).

6. Cheboksarov V.V., Cheboksarov V.V. Vetrodvigatel'. Patent Russian Federation. RU 2399791 MKI6 F03D 3/02, 3/06. 2010 (in Russ.).

7. Salamov O.M., Abdullaev A.I., Salamov A.A. Mehanizm dlâ povorota lopastej vetrokolesa. Položitel'noe rešenie predvaritel'noj èkspertizy Azerbajdžanskogo Komiteta po standartizacii, metrologii i patentnym delam po zaâvke. No a 2012 0009 MKI 6 3/02, 7/02, 7/06. 2012 (in Russ.).

8. Salamov O.M. Mehanizm dlâ povorota lopastej vetrokolesa. Položitel'noe rešenie predvaritel'noj èkspertizy Azerbajdžanskogo Komiteta po standartizacii, metrologii i patentnym delam po zaâvke # a 2012 0020 MKI 6 3/02, 7/02, 7/06. 2012 (in Russ.).

9. Couture T., Gagnon Y. An analysis of feed-in tariff remuneration models: Implications for renewable energy investment. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, no. 2, pp. 955–965 (in Eng.).

10. Mendonsa M. Feed-in Tariffs. Accelerating the Deployment of Renewable Energy. London: Earth Scan. 2007 (in Eng.).

11. Hirsh R.F. PURPA: The Spur to Competition and Utility Restructuring. *The Electricity Journal*, 1999, vol.12, issue 7, pp. 60–72 (in Eng.).

12. Abdullaev A.I., Salamov O.M., Salamov A.A. Puti optimizacii processov preobrazovaniâ ènergiû vetra v mehaničeskuû i èlektričeskuû ènergii. Proceedings of the National Conference: Perspektivy ispol'zovaniâ al'ternativnyh i vozobnovlâemyh istočnikov ènergii. Baku, 2011, pp. 41–43 (in Russ.).

13. Abdullaev A.I., Mirzoev G.I., Salamov A.A. Novoe konstruktivnoe rešenie mul'tiplikatorov vetroagregatov. Proceedings of the 80-th prof. I.A. Bahtiyarov Conference, Baku, 2008, pp. 5–11 (in Russ.).

14. Nadzhafov A.M. Poiskovoe konstruirovanie mehaničeskogo privoda štangovyh nasosov. Baku: Èlm Publ., 2008 (in Russ.).

15. Ivanov M.N. Detali mašin. Moscow: Vysšaâ škola Publ., 1976 (in Russ.).

16. Chernyavski S.A., Ickovich G.M. et al. Kursovoe proektirovanie detalej mašin. Moscow: Mašinostroenie Publ., 1979 (in Russ.).

17. Abdullaev A.I., Mamedov R.K. et al. Detali mašin i osnovy konstruirovaniâ. Baku: Èlm Publ., 2001 (in Russ.).

18. Feustel J., Helm S. Ausarbeitung baureifer Unterladen fur GROVIAN (Verfasser F. Korber). *Ber. Kernforschungsanlage Julich*, 1978, no. Conf. 27, pp. 299–312 (in Germ.).

Транслитерация по ISO 9:1995

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"