

УДК 621.548

В.М. Корендий, магістр,
И.В. Кузьо, д-р техн. наук, проф.,
Нац. ун-т “Львов. політехніка”

КОМБИНИРОВАННАЯ ВЕТРОКОМПРЕССОРНАЯ УСТАНОВКА “КОРВИТ-1”: АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ И ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

В.М. Корендий, И.В. Кузьо. **Комбінована вітрокомпресорна установка “КОРВИТ-1”: аналіз конструкції та особливостей функціонування.** Обґрунтовано доцільність застосування вітрових турбін із системами пневмоаккумуляції енергії безпосереднього привода різноманітного виробничого і технологічного обладнання. Розглянуто принципову схему комбінованої вітрокомпресорної установки “КОРВИТ-1”, яка побудована на основі шестилопатевої вітрової турбіни горизонтально-осьового типу, поршневого компресора типу ГАЗ-66 і ресивера. Встановлено, що зміна моменту навантаження на валу компресора в залежності від частоти обертання і тиску нагнітання в ресивері може перевищувати 50 % від його номінального значення. Запропоновано використовувати механізми стабілізації кутової швидкості обертання вітрової турбіни для одночасного регулювання потужності при зміні швидкості вітру та моменту навантаження на привідному валу, а також із метою протиштормового захисту. Запропоновано перспективи подальшого вдосконалення комбінованої вітрокомпресорної установки шляхом використання осьових або відцентрових компресорів та механізмів повороту лопатей навколо власних поздовжніх осей.

Ключові слова: вітрокомпресорна установка, вітрова турбіна, поршневий компресор, ресивер, механізм стабілізації кутової швидкості.

В.М. Корендий, И.В. Кузьо. **Комбинируванна ветрокомпрессорная установка “КОРВИТ-1”: анализ конструкции и особенностей функционирования.** Обоснована целесообразность применения ветровых турбин с системами пневмоаккумуляции энергии в качестве непосредственного привода разнообразного производственного и технологического оборудования. Рассмотрена принципиальная схема комбинированной ветрокомпрессорной установки “КОРВИТ-1”, построенной на основе шестилопастной ветровой турбины горизонтально-осевого типа, поршневого компрессора типа ГАЗ-66 и ресивера. Установлено, что изменение момента нагрузки на валу компрессора в зависимости от частоты вращения и давления нагнетания в ресивере может превышать 50 % от его номинального значения. Предложено использовать механизмы стабилизации угловой скорости вращения ветровой турбины для одновременного регулирования мощности при изменениях скорости ветра и момента нагрузки на приводном валу, а также с целью противоштормовой защиты. Предложены перспективы дальнейшего совершенствования комбинированной ветрокомпрессорной установки путем использования осевых или центробежных компрессоров и механизмов поворота лопастей вокруг собственных продольных осей.

Ключевые слова: ветрокомпрессорная установка, ветровая турбина, поршневой компрессор, ресивер, механизм стабилизации угловой скорости.

V.M. Korendiy, I.V. Kuzyo. **The combined wind-compressor plant “KORVIT-1”: the analysis of design and functioning features.** The expediency of using wind turbines with pneumatic energy accumulation systems as a direct drive of various manufacturing and technological equipment is substantiated. The design of a combined wind-compressor plant “KORVIT-1”, which is built on the basis of a six-bladed wind turbine of horizontal-axis type, a piston compressor of type HAZ-66 and a receiver, is considered. It is established on the basis of literary analysis of existing experimental research, that the change of the loading moment at the compressor shaft can exceed 50 % of its nominal value depending on the rotation frequency and the festering pressure in the receiver. It is suggested to use the mechanisms of stabilization of the wind turbine rotation angular velocity for simultaneous power regulation under the changes of the wind speed and the loading moment at the driveshaft, and also with the purpose of antistormy defence. The perspectives of further development of combined wind-compressor plants by the use of axial or centrifugal compressors, and the mechanisms of blades folding in the direction of the wind flow, are suggested.

Keywords: wind-compressor plant, wind turbine, piston compressor, receiver, mechanism of the angular velocity stabilization.

Развитие любого государства, его социально-экономическая стабильность и даже само существование обуславливается, главным образом, наличием энергетических ресурсов. Темпы роста национальных доходов развитых стран примерно соответствуют темпам роста потре-

ния электроэнергии. Экологические проблемы ядерной и тепловой энергетики, на которую приходится наибольшая доля производимой электроэнергии, не способствуют их столь динамическому развитию, в отличие от ветроэнергетики. При этом за один год сжигается столько топлива, сколько природа может синтезировать только за 1000 лет [1]. Ввиду того, что распространение сети ядерных и тепловых станций во многих странах мира принципиально невозможно, расширились масштабы исследований и разработок в области нетрадиционных источников энергии. В Западной Европе, США и Японии программы альтернативной энергетики, и в частности ветроэнергетики, активно финансируются государством с целью сокращения применения органического топлива.

В Украине, на большей территории которой преобладают ветры со средними скоростями до 5 м/с, масштабное развитие ветроэнергетики для производства электроэнергии экономически нецелесообразно. Тем не менее, на современном этапе технического развития ветровые турбины могут довольно эффективно использоваться на большей территории страны в качестве непосредственного механического привода разнообразного производственного и технологического оборудования. Использование ветровых турбин малой мощности позволяет сократить сроки организации временного или постоянного энергоснабжения объектов, удаленных от линий электропередач (средств связи, морских платформ, мостов, дорожных объектов), снабжать дешевой экологически чистой энергией население, которое проживает в сельской местности со слабо развитой централизованной энергосистемой, использоваться в качестве резервного источника энергии в системах охраны, воинских частях, аэропортах и др. В этих и подобных случаях ветроэнергетика способна свободно конкурировать с традиционными способами производства энергии.

Основная задача достижения высокой эффективности ветровых турбин состоит в создании рациональной схемы аккумулирования энергии, поскольку одной из наиболее распространенных проблем широкомасштабного использования энергии воздушных потоков является непостоянство их скорости, а следовательно, и энергии во времени. Часто периоды шквальных порывов ветра чередуются с периодами практически полного штиля. Ветер обладает сезонной изменчивостью, меняет свою активность в широком диапазоне в течение суток, а также и в весьма короткие промежутки времени (мгновенная пульсация, порывы и т.п.). В связи с этим весьма перспективной представляется идея аккумулирования энергии ветра в виде сжатого газа, который может быть использован мгновенно путем выпуска в доли секунды, а так же может расходоваться постепенно в течение длительного промежутка времени путем выпуска струи газа при постоянном давлении.

Анализ последних публикаций показал, что исследования ветрокомпрессорных установок ведутся преимущественно в двух направлениях. В первом случае энергия потоков воздуха с помощью ветровой турбины, электрогенератора и дополнительных систем регулирования преобразовывается в электрическую энергию, которая используется для работы электродвигателя привода механического компрессора [1]. Во втором случае компрессор непосредственно соединяется с ветровой турбиной и, следовательно, энергия ветра преобразуется в энергию сжатого воздуха. При этом для стабилизации давления и расхода воздуха необходимо использовать специальные газовые редукторы, позволяющие устанавливать различные рабочие скорости [2]. Одним из способов регулирования частоты вращения ветровой турбины и соответственно производительности компрессора, соединенного непосредственно с ней, при изменениях скорости ветра является складывание лопастей в направлении воздушного потока [3, 4]. Однако этот вопрос является недостаточно изученным.

Цель данного исследования — анализ конструкции и особенностей функционирования комбинированной установки, в которой ветровая турбина со складывающимися лопастями служит непосредственным механическим приводом поршневого компрессора. Принципиальная схема комбинированной ветрокомпрессорной установки с системой пневмоаккумулирования энергии показана на рис. 1.

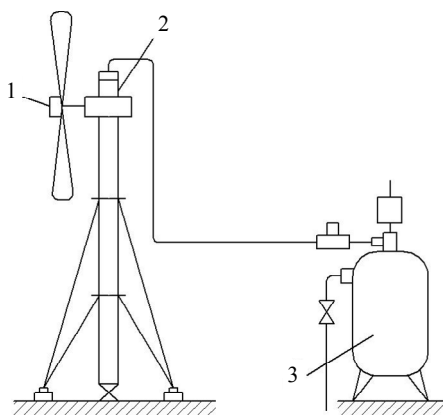


Рис. 1. Принципиальна схема ветро-компресорної установки: 1 — ветрова турбина, 2 — компресор, 3 — ресивер

Установка “КОРВИТ-1” состоит из шестилопастной ветровой турбины 1 с механизмом складывания лопастей, поршневого компрессора 2 типа ГАЗ-66 и системы пневмоаккумуляции энергии в виде ресивера 3 емкостью 20 л ($0,02 \text{ м}^3$). Ветроколесо диаметром 2,5 м способно развивать мощность от 50 до 250 Вт в диапазоне скоростей ветра от 4 до 7 м/с. Номинальная частота его вращения, которая обусловливается параметрами регулятора, составляет 90 об/мин и сохраняется неизменной во всем рабочем диапазоне скоростей ветра (4...25 м/с). Поршневой одноцилиндровый компрессор типа ГАЗ-66 способен работать при такой частоте с производительностью около 5 л/мин и создавать максимальное давление в ресивере до $5 \cdot 10^5$ Па. Подвод воздуха к компрессору осуществляется через фильтр с пористыми перегородками (ткань, картон и т.п.).

Конструкция и основные геометрические параметры ветроколеса представлены на рис. 2, экспериментальный образец ветровой турбины — на рис. 3.

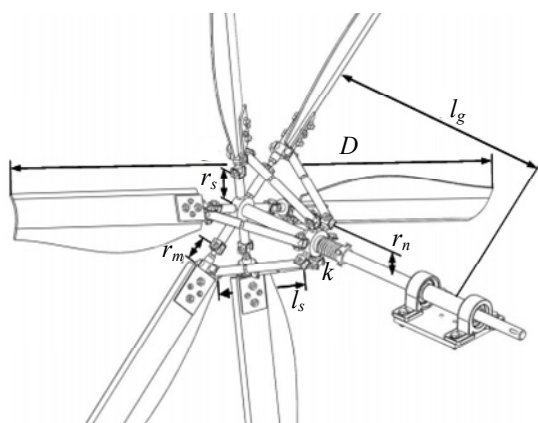


Рис. 2. Конструкция ветроколеса со складывающимися лопастями



Рис. 3. Экспериментальный образец ветровой турбины

Принцип работы механизма складывания лопастей заключается в том, что с увеличением скорости воздушного потока возрастает аэродинамическое лобовое давление на плоскость ветроколеса. Жесткость k регулировочной пружины выбирается из условия обеспечения начала процесса регулирования при достижении номинальной (расчетной) скорости ветра. Компрессор устанавливается непосредственно на пластине крепления ветроколеса к поворотному механизму и связывается с валом ременной передачи.

Поршневые компрессоры — одни с самых распространенных типов компрессоров. Их основными преимуществами являются низкая цена, простота конструкции, ремонтпригодность, способность работать в агрессивных средах и тяжелых условиях эксплуатации. Однако очень большим недостатком поршневого компрессора типа ГАЗ-66 при применении ветровой турбины в качестве его непосредственного механического привода является колебательный характер момента нагрузки при изменении угла поворота приводного вала (рис. 4) [5]. Исходя из экспериментальных данных, зависимость момента нагрузки M на валу компрессора от частоты его вращения ω при избыточном давлении нагнетания 0,2 МПа можно аппроксимировать следующей аналитической зависимостью [6]:

$$M = M_{\text{cp}} + \frac{A}{\sqrt{1+k \cdot \omega}} \sin(\omega t - \arctg(k\omega)), \quad (1)$$

где M_{cp} — среднее значение момента нагрузки за время одного оборота;

A — амплитуда колебаний нагрузочного момента;

k — коэффициент, учитывающий инерционные параметры и жесткость механической характеристики системы.

На рис. 5 представлена экспериментальная характеристика (кривая 1) аэродинамического крутящего момента ветровой турбины без системы регулирования частоты вращения и ее аппроксимация (кривая 2) зависимостью [3]

$$M_A = \frac{\pi R^3 \rho_v V^2}{2} \left[\alpha \frac{\omega R}{V} - \beta \left(\frac{\omega R}{V} \right)^2 - \gamma \right], \quad (2)$$

где R — внешний радиус ветровой турбины,

ρ_v — плотность воздуха,

V — скорость ветра,

α , β , γ — постоянные коэффициенты, значения которых можно вычислить по экспериментальным кривым аэродинамического момента ветровой турбины.

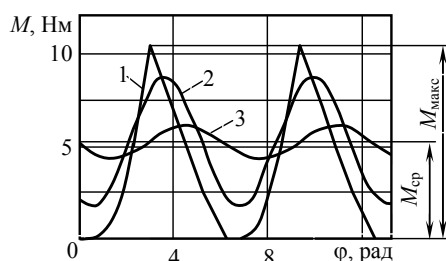


Рис. 4. Экспериментальные зависимости момента, создаваемого на валу кривошипа (кривая 1) и на валу компрессора при частоте вращения 0,2 об/с (кривая 2) и 1,5 об/с (кривая 3), в зависимости от угла поворота вала при избыточном давлении нагнетания 0,2 МПа

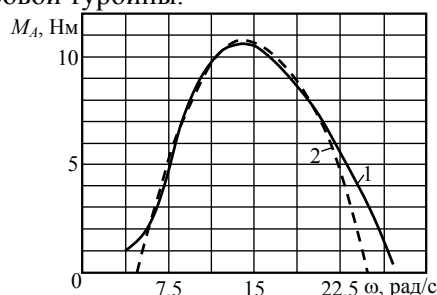


Рис. 5. Экспериментальная характеристика аэродинамического момента и ее аппроксимация при скорости ветра 6 м/с

Из формулы (2) следует, что аэродинамический момент ветровой турбины без системы регулирования мощности в значительной степени зависит от скорости воздушного потока и частоты ее вращения, которые, в свою очередь, обуславливаются климатическими характеристиками местности, где расположена ветровая турбина, параметрами нагрузки на приводном валу, количеством и профилем лопастей.

Вращательное движение ветровой турбины без механизма регулирования, которая используется в качестве привода компрессора, можно описать уравнением [4]

$$J \frac{d\omega}{dt} + \mu_{tr} \omega = M_A - M, \quad (3)$$

где J — момент инерции системы (ветровой турбины и компрессора), приведенный к оси вращения приводного вала,

μ_{tr} — коэффициент момента вязкостного трения.

Если сравнить характеристику аэродинамического момента ветровой турбины без системы регулирования частоты вращения (см. рисунок 5) и характеристику нагрузочного момента (см. рисунок 4), то после несложных расчетов по зависимости (3) можно сделать вывод, что ветро-

вая турбина самостійно запуститься тільки при швидкості вітра більше 6 м/с, але далі зможе ефективно працювати навіть при 4 м/с. Однак, для забезпечення работоспособності обладнання і стабілізації подачі повітря при значительному збільшенні швидкості вітра необхідно використовувати додаткові гальмівні пристрої.

В якості пристрою регулювання потужності і стабілізації частоти обертання вітрової турбини во многих випадках цілорозумно використовувати механізм складання лопатей в напрямку вітрового потоку [3]. Математична модель аеромеханічної системи вітрової турбини в цьому випадку має вигляд [4]

$$\frac{d^2\varphi_2}{dt^2} \left[J_2 + n_l m_l (r_s + r_l \sin \varphi_3)^2 \right] + 2n_l m_l r_l \frac{d\varphi_2}{dt} \frac{d\varphi_3}{dt} \cos \varphi_3 (r_s + r_l \sin \varphi_3) = C_p \frac{\pi R^2 \rho_B V^3}{2 \frac{d\varphi_2}{dt}} - M;$$

$$n_l m_l r_l^2 \frac{d^2\varphi_3}{dt^2} - n_l m_l r_l \times \left(\frac{d\varphi_2}{dt} \right)^2 \cos \varphi_3 (r_s + r_l \sin \varphi_3) - k \left(r_m \sin \varphi_3 + \frac{r_m \cos \varphi_3 (r_s - r_n + r_m \sin \varphi_3)}{l_s \sqrt{1 - \left(\frac{(r_s - r_n) + r_m \sin \varphi_3}{l_s} \right)^2}} \right) \times (4)$$

$$\times \left(r_m \cos \varphi_3 + l_s \left(\sqrt{1 - \left(\frac{(r_s - r_n) + r_m \sin \varphi_3}{l_s} \right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{(r_s - r_n) + r_m}{l_s} \right)^2} \right) \right) = C_L r_a \frac{\pi R^2 \rho_B V^2}{2},$$

де φ_2, φ_3 — кулові координати, відповідні степеням свободи аеромеханічної системи: обертанню вітроколеса і складанню лопатей,

J_2 — момент інерції всіх (крім лопатей) тіл системи, кінематично пов'язаних з обертанням вітроколеса,

n_l, m_l — кількість лопатей і маса однієї лопаті, відповідно,

$C_p = C_p \left(\varphi_3, \frac{d\varphi_2}{dt}, V \right)$ — коефіцієнт використання енергії вітра,

r_a, r_l — відстань від шарніра кріплення лопаті до її центра аеродинамічного тиску і центра мас, відповідно,

$C_L = C_L \left(\varphi_3, \frac{d\varphi_2}{dt}, V \right)$ — коефіцієнт аеродинамічного тиску на площину вітроколеса,

r_s, r_m, r_n, l_s — геометричні параметри вітроколеса (см. рисунок 2).

Значення J_2, m_l і r_l визначені в результаті твердотілого моделювання вітроколеса в навчально-ознакомительній версії програмного пакета "Компас". Значення r_a і залежності C_p і C_L отримані експериментально в результаті продувки вітроколеса в аеродинамічній трубі Національного університету "Львівська політехніка" (см. рисунок 3) [3].

На основі формул (1)...(4), рисунків 4 і 5, даних твердотілого моделювання і експерименту ми можемо проаналізувати характер роботи вітрової турбини, яка використовується в якості привода компресора, в режимі запуску при номінальній швидкості вітра 6 м/с і коливаннях моменту навантаження на валу компресора в межах 10 % (рис. 6). При цьому необхідно відзначити, що в режимі запуску механізм регулювання утримує лопаті в вертикальному положенні. Тому результати чисельного моделювання по формулам (4) і (3) для вітрової турбини з механізмом і без механізму регулювання відрізняються не більше, ніж на 5 %, що обумовлено різними моментами інерції системи.

З рис. 6 закономірно випливає, що з збільшенням середнього моменту навантаження на валу вітрової турбини (або, в даному випадку, тиску нагнетання в ресивері) по відношенню до його

номинальному значению частота вращения приводного вала постепенно снижается, а амплитуда ее колебаний — возрастает, но при этом не превышает 8 % от среднего значения частоты вращения. В режиме запуска ветровой турбины при скоростях ветра ниже номинальной использование системы регулирования немного ухудшает эффективность установки за счет увеличения момента инерции системы и соответственно скорости ветра, при которой возможен самозапуск. Тем не менее, использование механизма складывания лопастей позволяет с достаточной эффективностью осуществить одновременно три функции: стабилизации частоты вращения и регулирования мощности установки при изменениях скорости ветра и давления в ресивере, а также противоштормовой защиты.

В качестве примера рассмотрим характер протекания переходных процессов в работе ветровой турбины при скачкообразном изменении скорости ветра и спаде нагрузки на приводном валу (рис. 7). Условно примем, что амплитуда колебаний частоты вращения вследствие периодического изменения момента нагрузки на валу компрессора равна нулю.

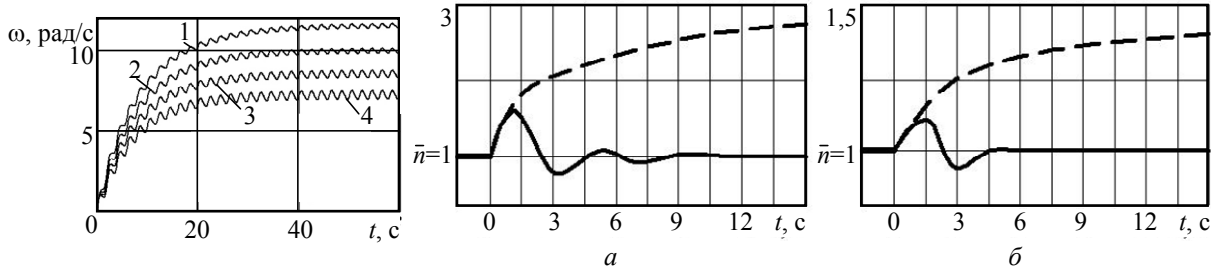


Рис. 6. Временная характеристика угловой скорости ветровой турбины: $M_{cp}=0,1M_{ном}$ (1); $0,5M_{ном}$ (2); $M_{ном}$ (3); $1,5M_{ном}$ (4)

Рис. 7. Характер изменения относительного значения частоты вращения ветровой турбины в переходных процессах при: скачкообразном увеличении скорости ветра с 6 до 12 м/с (а), спаде нагрузки на приводном валу с номинального значения до нуля (б) (пунктир — без системы регулирования)

Применение механизма складывания лопастей позволяет сохранять стабильность частоты вращения в пределах 30...80 % при увеличении скорости ветра до двух раз или спаде нагрузки на приводном валу. Частота вращения ветровой турбины без регулирования может отклоняться в несколько раз от своего номинального значения, что может вызывать резонансные явления в системе, перегрев и повышенный износ поршневых колец и других деталей.

Таким образом, было рассмотрено ряд актуальных вопросов:

— обоснована целесообразность использования систем пневмоаккумулирования энергии ветра для обеспечения бесперебойной работы оборудования с пневматическим приводом при значительных изменениях скорости ветра (0...25 м/с);

— описана принципиальная схема комбинированной ветрокомпрессорной установки «КОРВИТ-1», состоящей из горизонтально-осевой ветровой турбины с шестью складывающимися лопастями, компрессора ГАЗ-66 и ресивера емкостью $0,02 \text{ м}^3$;

— принимая во внимание один из основных недостатков поршневых компрессоров, а именно колебательный характер момента нагрузки при изменении угла поворота приводного вала, а также непостоянство скорости ветра, предложено использовать механизм складывания лопастей, способный одновременно обеспечить: стабилизацию частоты вращения, регулирование мощности и противоштормовой защиты;

— на основе литературного анализа известных экспериментальных исследований установлено, что изменение момента нагрузки на валу компрессора в зависимости от частоты вращения и давления нагнетания в ресивере может колебаться в пределах 10...50 % от его номинального значения. Периодическое изменение момента нагрузки до 10 %, согласно теоретическим расчетам, обуславливает колебания частоты вращения ветровой турбины (и, соответственно, подачи воздуха) в пределах 8 %;

— запуск ветровой турбины возможен только при скорости ветра более 6 м/с, независимо от того оснащена ли она механизмом регулирования или нет, но эффективное и надежное функционирование во всем рабочем диапазоне скоростей ветра (4...25 м/с) возможно только при наличии механизма регулирования. При увеличении скорости ветра до 12 м/с или спаде

нагрузки на приводном валу ветровая турбина без системы регулирования быстро наращивает частоту вращения в 1,5...3 раза больше номинального значения, соответственно. В тех же условиях механизм складывания лопастей позволяет ограничить скачок частоты до 30...80 % и в дальнейшем стабилизировать ее до номинального значения.

В последующих этапах работы планируется экспериментально исследовать особенности функционирования комбинированной ветрокомпрессорной установки "КОРВИТ-1" и обосновать методику выбора конструктивных параметров механизма регулирования. Дальнейшее усовершенствование конструкции установки возможно за счет изменения типа насоса (вместо поршневого использовать осевой или центробежный компрессор) и механизма регулирования (вместо складывания лопастей использовать их поворот вокруг собственных продольных осей).

Література

1. Шахбазов, Ш.Д. Многоцелевая ветрокомпрессорная установка / Ш.Д. Шахбазов, И.М. Юсупов // Проблемы энергетики. — Баку, 2006. — № 3 — 4. — С. 116 — 120.
2. Шахбазов, Ш.Д. Получение электроэнергии при помощи ветрокомпрессорной установки / Ш.Д. Шахбазов, И.М. Юсупов // Проблемы энергетики. — Баку, 2008. — № 1. — С. 119 — 122.
3. Корендій, В.М. Експериментальне дослідження аеродинамічних характеристик вітрової турбіни / В.М. Корендій // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 10 — 11 квітня 2013 р.). — Львів, 2013. — С. 71 — 74.
4. Корендій, В.М. Математична модель аеромеханічної системи вітроустановки / В.М. Корендій, І.В. Кузьо // Вібрації в техніці та технологіях. — Вінниця, 2013. — № 2 (70). — С. 27 — 32.
5. Перекрест, А.Л. Нагрузочная характеристика поршневого компрессора / А.Л. Перекрест, А.Н. Яценко // Вісн. Кременчуц. держ. політехн. ун-ту. — Кременчук, 2006. — Вип. 4(39). — С. 57 — 59.
6. Елисеєв, В.В. Справочник по автоматизированному электроприводу / В.В. Елисеєв, А.Р. Шинянский. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 616 с.

References

1. Shakhbazov, Sh.D. Mnogotselovaya vetrokompressionnaya ustanovka [Multi-purpose wind-compressor plant] / Sh.D. Shakhbazov, I.M. Yusupov // Problemy Energetiki [Power Engineering Problems]. — Baku, 2006. — # 3 — 4. — pp. 116 — 120.
2. Shakhbazov, Sh.D. Poluchenie elektroenergii pri pomoshchi vetrokompressionnoy ustanovki [Generating electricity using wind-compressor plant] / Sh.D. Shakhbazov, I.M. Yusupov // Problemy Energetiki [Power Engineering Problems]. — Baku, 2008. — # 1. — pp. 119 — 122.
3. Korendii, V.M. Eksperymentalne doslidzhennia aerodynamichnykh kharakterystyk vitrovoi turbiny [Experimental research of wind turbine aerodynamic characteristics] / V.M. Korendii // Netradytsiini i ponovliuvani dzherela enerhii yak alternatyvni pervynnym dzherelam enerhii v rehioni: materialy VII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (Lviv, 10 — 11 kvitnia 2013 r.) [Alternative and Renewable Energy Sources as Alternative Primary Energy Sources in the Region: Materials of VII International scientific and practical conference (Lviv, 10 — 11 April 2013)]. — Lviv, 2013. — pp. 71 — 74.
4. Korendii, V.M. Matematychna model aeromekhanichnoi systemy vitroustanovky [Mathematical model of the wind turbine aeromechanical system] / V.M. Korendii, I.V. Kuzo // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh [Vibration in Engineering and Technologies]. — Vinnytsia, 2013. — # 2. — pp. 27 — 32.
5. Perekrest, A.L. Nagruzochnaya kharakteristika porshneвого kompressora [Load Characteristic of the Piston Compressor] / A.L. Perekrest, A.N. Yatsenko // Visn. Kremenchuts. derzh. politekhn. un-etu [Herald of Kremenchuk State Polytechnic University]. — Kremenchuk, 2006. — # 4 (39). — pp. 57 — 59.
6. Yeliseev, V.V. Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu [Handbook on Automated Electric Drive] / V.V. Yeliseev, A.R. Shinyanskiy. — Moscow, 1983. — 616 p.

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

Поступила в редакцию 2 февраля 2013 г.