

## **РЕТРОСПЕКТИВА И ПЕРСПЕКТИВА ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ**

### **Статья I. История и мотивация развития вертикально-осевых ветроустановок как нового направления ветроэнергетики**

**Проведен ретроспективный обзор и анализ особенностей развития вертикально-осевых ветроустановок в общем процессе эволюции ветроэнергетики.**

*Ключевые слова:* вертикально-осевая ветроустановка, энергия ветра, ротор Савониуса, ротор Масгроува, ротор Дарье, Н-ротор, ротор Горлова.

**Проведено ретроспективний огляд і аналіз особливостей розвитку вертикально-осьових вітроустановок в загальному процесі еволюції вітроенергетики.**

*Ключові слова:* вертикально-осьова вітроустановка, енергія вітру, ротор Савоніуса, ротор Масгроува, ротор Дар'є, Н-ротор, ротор Горлова.

**The retrospective review and analysis of features of development vertical axis wind turbines in the general process of evolution of wind energetic are spent.**

*Key words:* vertical axis wind turbine, Savonius rotor, Musgrove rotor, Darrieus rotor, H-rotor, Gorlov rotor.

**Введение.** В современном мире энергетика определяет возможности экономического и социального развития общества. Все сферы жизни и деятельности человека: жилье и питание, культурная деятельность, наука, промышленное производство, транспорт, строительство, экологическая деятельность и многое другое, в той или иной степени зависят от уровня энергоснабжения. Развитие энергетике может служить критерием развития общества. По сравнению с 1850 г. мировое производство энергии в 1990 г. выросло в 17 раз, а в 2010 г. – в 100 раз. По оценкам экономистов, энергетический сектор составляет около четверти мировой экономики [3]. На фоне стремительного развития современной науки и техники и возникновения новых, необычайно эффективных технологий (компьютерных, космических, информационных и др.) в одном из основных секторов мировой экономики – производстве энергии, возникает, на первый взгляд, парадоксальная тенденция возвращения к древнейшей технологии использования энергии ветра, которая применялась более 10 веков тому в Китае и на Среднем Востоке и которая еще около 100 лет назад была вытеснена более прогрессивными и эффективными направлениями энергетике, использующими ископаемое органическое топливо (нефть, уголь, газ), радиоактивное топливо и гидроресурсы. Парадоксальность этой тенденции становится еще более очевидной, если учесть существенные недостатки ветра по сравнению с другими источниками энергии. Во-первых, ветровой поток имеет очень низкие значения удельной плотности и скорости, которые определяют величину его кинетической энергии, используемой ветроустановкой (плотность ветрового воздушного потока в 800 раз меньше плотности используемой в гидроэнергетике потока воды, а скорость ветрово-

го потока в несколько десятков раз ниже скорости рабочего газа в парогазовых установках). Во-вторых, ветер характеризуется случайным характером воздействия и большим диапазоном колебаний скорости и направления, что также снижает эффективность его использования. В-третьих, экономически эффективная работа ветроустановок возможна только на относительно небольшой части земной поверхности, имеющей достаточный ветропотенциал: на береговых территориях морей, океанов, озер и рек, на возвышенностях, на участках со складками рельефа местности, в которых возникают постоянные воздушные потоки, а также на морских шельфах. Именно эти факторы определяли более высокую стоимость электроэнергии, производимой с помощью ветра, по сравнению с другими источниками, что и привело к ее вытеснению в начале XX века более эффективными технологиями, такими как гидро или теплоэнергетика. Однако уже в начале XXI века экономическое и социальное развитие общества пришло в противоречие с ограниченными возможностями биосферы воспроизводить ресурсы и обеспечивать условия жизни для человечества. Происходящая в настоящее время замена технических средств традиционной энергетики, оказывающей губительное воздействие на окружающую среду, на возобновляемые экологически чистые источники энергии, в том числе ветровые, стала одним из первых революционных шагов цивилизации к экологизации производства в мировом масштабе [4]. Темпы прироста производства электроэнергии ветроустановками по сравнению с традиционными направлениями энергетики имеют постоянный приоритет. Так, за последние годы среднегодовой прирост генерирующих мощностей, использующих энергию ветра, составил 26%, энергию солнца – 16%, энергию газа – 2%, гидроэнергию – 1,6%, энергию нефти – 1,4%, энергию угля – 1,4%, атомную энергию – 0,6%. Планами развития Европейского сообщества к 2020 году предусмотрено довести уровень возобновляемой энергии до 30% [28].

Настоящая работа состоит из трех статей. В статье I «История и мотивация развития вертикально-осевых ветроустановок как нового направления ветроэнергетики» рассмотрены исторические этапы зарождения и совершенствования вертикально-осевого направления в общем контексте развития мировой ветроэнергетики. В статье II «Развитие вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине» изложены основные научные, проектные и инженерные работы украинских специалистов по исследованию теоретических основ и созданию промышленных образцов вертикально-осевых ветроустановок. В статье III «Перспективы развития вертикально-осевой ветроэнергетики» на основе анализа современного состояния мировой ветроэнергетики и особенностей ветроустановок разных типов рассматриваются тенденции современной ветроэнергетики и перспективы развития вертикально-осевых ветроустановок.

**Постановка проблемы.** Применяемые в современной ветроэнергетике горизонтально-осевые ветроустановки (ВЭУ ГО) и вертикально-осевые ветроустановки (ВЭУ ВО) отличаются компоновочной схемой, конструкцией, характеристиками основных узлов и способами управления. Если горизонтально-осевые ветряные мельницы используются уже несколько столетий, то вертикально-осевой ротор Дарье был изобретен в 1930-х годах, а внимание специалистов привлек только в 1960-х годах. С возникновением интереса ветроэнергетиков к вертикально-осевому ротору Дарье и последовавшими за этим широкими фундаментальными исследованиями и освоением вертикально-осевых ветроустановок между их сторонниками и противниками начались споры о преимуществах и не-

достатках, о ближайших и дальних перспективах этих конструкций, которые продолжают по сей день. С одной стороны, в современной ветроэнергетике наблюдается полное превосходство горизонтально-осевых ветроустановок мегаваттной мощности, которые в составе промышленных ветровых электростанций обеспечивают основную часть производства ветровой электроэнергии в мире, что является серьезным аргументом противников вертикально-осевого направления. С другой стороны, результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований вертикально-осевых ветроустановок показывают техническую возможность достижения ими эффективности горизонтально-осевых конструкций. Исследование вопросов взаимоотношения двух параллельных направлений ветроэнергетики на современном этапе интенсивного внедрения в мировой экономике экологически чистых возобновляемых источников энергии является актуальной проблемой истории техники, поскольку она определяет тенденции развития современной ветроэнергетики, дает возможность оценить эти направления с точки зрения рациональности и полезности, и, в результате, позволяет выявить перспективы и возможные пути дальнейшего развития вертикально-осевой ветроэнергетики.

**Цель написания статьи.** Целью настоящей публикации является рассмотрение истории развития вертикально-осевого направления ветроэнергетики и технической сущности эволюционного совершенствования конструкции вертикально-осевых ветроустановок от первых известных ветродвигателей Древнего Китая и Персии до современных мегаваттных ветроэлектрических агрегатов. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, основными из которых являются поиск и систематизация в хронологической последовательности историко-технических материалов по исследованиям, конструкторским разработкам и эксплуатации вертикально-осевых ветроустановок в разных странах и в разные периоды, а также ретроспективный обзор и обобщение исторических научных и технических фактов развития вертикально-осевого направления на фоне общей эволюции ветроэнергетики. Результаты проведенных работ будут являться базой для проведения дальнейших исследований, направленных на определение места и роли вертикально-осевых ветроустановок в современной и будущей ветроэнергетике.

**Общая история и мотивация ветроэнергетики.** История ветроэнергетики начинается с первых упоминаний о водоподъемных ветряных устройствах, применяемых в Древнем Китае во II веке н.э. Карусельные ветряные мельницы для помола зерна также применялись в Древней Персии и Египте. Первое упоминание о европейской ветряной мельнице с горизонтально-осевым ротором (позже она получила название «датская») относится к установке, построенной в Англии в 1191 году [25]. Вероятнее всего эта конструкция была завезена в Европу с о-ва Крит, где она использовалась для перекачки воды [10]. Критские ветроустановки представляли собой горизонтально-осевой ротор с парусными лопастями, расположенный на неподвижной башне (рис.1). В Европе (Голландия, Дания, Англия) ветряные мельницы начали применяться в XIII веке для перекачки воды, размола зерна и в качестве привода различных механизмов (рис.2). В XVI веке в Лондоне, Париже и других городах начали строить водонасосные станции с приводом от ветровых установок. В Голландии ветряные мельницы откачивали воду с огражденных дамбами участков, а в засушливых районах Европы они применялись для орошения полей. В это же время датская ветряная мельница была суще-

ственно усовершенствована, что повысило ее эффективность и надежность. Вместо «мельницы на козлах», которую надо было полностью поворачивать на ветер, в Бельгии появились «шатровые мельницы» с поворотным ротором [5]. На лопастях были установлены откидные щитки, которые при сильном ветре уменьшали парусность ротора, что исключало его повреждение при порывах ветра [2]. К 1850 году в Голландии работало около 1670 ветряных мельниц, которые на 90% обеспечивали промышленность энергией. В России в начале XX века насчитывалось около 250 тысяч ветряных мельниц, которые перерабатывали почти половину урожая зерна. Роторы этих мельниц были деревянными, а их диаметр достигал 12 м [2]. Однако в период индустриализации Западной Европы ветряные мельницы были вытеснены более эффективными двигателями, использующими тепловую энергию (паровые, дизельные и газовые двигатели) и к 1904 году доля ветровой энергии в промышленности Голландии составляла всего около 11% [16].



Рис.1. Критская ветряная водоподъемная установка (<http://archaeologicaltrss.com/images/cyprus-crete-windmills.png>)



Рис.2. Датская ветряная мельница (<http://www.todaysphoto.org/potd/dutch-windmill.jpg>)

В США начиная с 1854 года широко использовались тихоходные многолопастные горизонтально-осевые ветроустановки, которые идеально подходили для подъема и перекачки воды на разбросанных по всей стране фермах. Ротор агрегатов диаметром 2-5 м имел мощность около 1 л.с. В конце XIX века в стране ежегодно выпускалось около 100 тыс. таких ветровых водоподъемных установок. Их производство продолжалось до 1930 года, однако и до сих пор большое количество этих ветроустановок находится в эксплуатации [27].

Новое направление ветроэнергетики – производство электроэнергии, началось с ветроэлектрической установки «Brush» мощностью 12 кВт с горизонтально-осевым ротором диаметром 17 м, состоящим из 144 лопастей, которая была построена в США в 1888 году. Горизонтально-осевые ветроэлектрические установки получили свое развитие в США, а также в Дании, которая имела высокий уровень экономики, но не обладала собственными запасами каменного угля. Развитию технологии производства электроэнергии ветровыми установками в этот период способствовали быстрое распространение применения электроэнергии в промышленности и достижения аэродинамики, связанные с развитием авиации.

Отдельно остановимся на истории Дании, которая может служить наглядным примером того, как социально-экономические и политические условия влияют на темпы развития ветроэнергетики в отдельной стране. В 1900-1910 годах

в Дании широко применялись ветроэлектрические установки, однако в период с 1910 по 1914 год их начали вытеснять более удобные и эффективные дизельные двигатели. В годы Первой мировой войны все поставки нефти в Данию были прекращены и ветроэнергетика стала стремительно развиваться: было построено большое число ветроэлектрических установок мощностью 20-35 кВт. После войны в стране была проведена электрификация, и ветроэнергетика опять пришла в упадок. С началом Второй мировой войны поставки топлива в Данию прекратились и снова повсеместно начали применять ветроэлектрические установки [25].

До последней четверти XX века ветроэлектрические установки, по сравнению с традиционной энергетикой развивались медленно, их единичная мощность составляла менее 100 кВт. Ветроустановки продолжали технически совершенствоваться, однако из-за низкой эффективности коммерческого уровня они не достигли. Энергетический кризис 1973-1974 годов во всем мире резко изменил отношение к ветроэнергетике, которую в условиях высоких цен на ископаемые энергоносители начали рассматривать как альтернативу традиционной энергетике. Кризис обусловил необходимость политической и экономической государственной поддержки развития ветроэнергетики в наиболее развитых странах.

В 1970-х – 1990-х годах в США, Канаде и Великобритании были развернуты программы развития вертикально-осевых ветроустановок, финансируемые правительствами этих стран, целью которых являлось создание средних (мощностью от 100 до 10000 кВт) и крупных (мощностью свыше 1000 кВт) наземных и оффшорных ВЭУ ВО с роторами Дарье с криволинейными и прямыми лопастями, которые в период энергетического кризиса могли бы стать экономически выгодными альтернативными источниками энергии. В это же время в Америке и Европе проводились работы по программам развития промышленных горизонтально-осевых ветроустановок мегаваттной мощности. В рамках программы NASA, финансируемой министерством энергетики США, в период с 1975 по 1987 год была создана серия горизонтально-осевых ветроустановок MOD мощностью от 100 кВт (ветроустановка MOD-0) до 3,2 МВт (ветроустановка MOD-5) и ветроустановки WTS-3 и WTS-4 мощностью 3 МВт и 4 МВт. В Германии правительство финансировало создание в 1983 году горизонтально-осевой ветроустановки Growian мощностью 3 МВт. При выполнении этих программ был проведен большой объем фундаментальных и прикладных исследований аэродинамических, прочностных, динамических, электрических, эксплуатационных характеристик ВЭУ ГО и ВЭУ ВО, определены оптимальные конструктивные и технологические решения их основных узлов и систем, разработаны стандарты и сертификационные требования, обретен опыт проектирования, изготовления и эксплуатации, подтвердивший возможность создания достаточно эффективных и надежных ветроустановок мегаваттной мощности обоих типов. Однако в части развития коммерческих ВЭУ ГО и ВЭУ ВО эти программы были неудачными, поскольку ни одна ветроустановка, созданная в рамках этих программ, не получила применения в промышленной ветроэнергетике. Такой результат в значительной мере объясняется тем, что в 1980-х годах после окончания энергетического кризиса не произошло ожидаемого повышения стоимости нефти и ветроэнергетика еще не могла составить конкуренцию традиционным направлениям производства электроэнергии.

В 1990-х годах в мире обострился экологический кризис, вызванный расширением техногенной деятельности общества, в том числе и крупномасштаб-

ным производством электроэнергии с использованием ископаемого топлива. Анализ, проведенный специалистами разных стран, показал, что для снижения темпов разрушения экосистемы в масштабе планеты приоритет в развитии и внедрении энергетических технологий необходимо отдать нетрадиционным возобновляемым источникам энергии, в частности ветровой энергетике. Технической предпосылкой такого решения является достижение высокого уровня надежности и безопасности современных ветроустановок, а экономической предпосылкой – снижение стоимости ветровой электроэнергии до уровня энергии, получаемой тепловыми и атомными электростанциями, экологической же предпосылкой является практически абсолютная экологическая чистота и незначительное воздействие этой технологии на окружающую среду [3].

Вследствие возникших экономических и социальных факторов (энергетический кризис 1970-х годов и экологический кризис 1990-х годов) в конце XX века произошла переориентация мировой энергетики на приоритетное развитие природных, экологически чистых источников энергии: ветра и солнечного излучения, что привело, начиная с 1980-х годов, к усиленному развитию ветроэнергетики. Если с момента появления первых ветро-электрических установок в 1890-х годах до 1990-х годов единичная мощность агрегатов выросла с 12 кВт до 100 кВт, то к началу 1990 годов средняя мощность ветроустановок составляла 500 кВт, к середине 1990 годов – 1 МВт, а к концу 1990 годов – 2,5 МВт [13]. В 2012 году была разработана ветроустановка Enercon e-126 с диаметром ротора 127 м, высотой башни 135 м и мощностью 7,5 МВт. Возникло новое перспективное направление ветроэнергетики: оффшорные ветроустановки, позволяющие использовать недоступную ранее энергию ветра акваторий. Подавляющую часть, около 90%, современных ветроустановок составляют горизонтально-осевые агрегаты [8].

**Ретроспектива развития вертикально-осевой ветроэнергетики.** Считается, что ветряная мельница с вертикальной осью была изобретена в Китае около 2000 лет назад, однако первое документальное упоминание о китайской ветроустановке относится к 1219 году н.э. Это была ветроустановка с карусельным ротором, использующим принцип давления ветра, с плоскими парусными лопастями, которые при движении по ветру разворачивались перпендикулярно воздушному потоку, а при движении навстречу ветру – параллельно ему. В IX веке н.э. в Персии в районе города Нех (Neh) работало 75 ветряных мельниц, построенных на возвышенности, расположенной перпендикулярно к направлению преобладающего северного ветра, действующего в этой местности в течение 4 месяцев в году со скоростью от 28 до 47 м/с. Ветряной двигатель персидских мельниц (рис.3) представлял собой вертикально-осевой карусельный ротор с восемью плоскими лопастями из тростника высотой 5,5 м и диаметром 4,3 м, мощность около 16 кВт при скорости ветра 30 м/с. Для повышения эффективности перед лопастями, движущимися навстречу ветру, был установлен экран, который для снижения тормозящего момента ротора закрывал их от ветра. В 1963 году 50 таких ветряных мельниц находились в рабочем состоянии и, вероятнее всего, эксплуатируются и в настоящее время [25, 26]. Отметим, что схема изобретенного более 1000 лет назад вертикально-осевого карусельного ротора с плоскими и чашечными лопастями и сегодня применяется практически без изменений.



Рис.3. Персидская ветряная мельница с вертикально-осевым карусельным ротором [6]

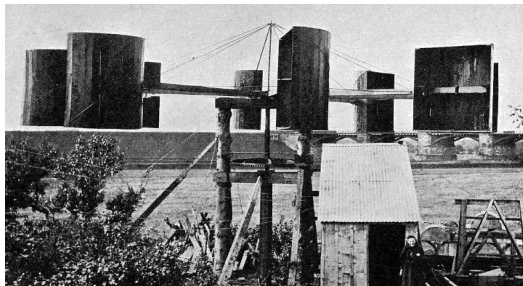


Рис.4. Вертикально-осевая ветроэлектрическая установка Д. Блиса с карусельным ротором [21]

Позже предпринимались неоднократные попытки усовершенствовать вертикально-осевой карусельный ротор. В 1745 году И. Бесслер (J. Bessler) в Германии начал строительство ветряной мельницы, ротор которой представлял собой лопасти, радиально расположенные на вращающемся вертикальном валу. По сути, это устройство являлось горизонтально-осевым ротором, повернутым на  $90^\circ$ . Однако во время строительства И. Бесслер погиб и проект не был завершен [11].

В 1816 году С. Хупер (S. Hooper) в США предложил проект вертикально-осевой карусельной ветроустановки, снабженной стационарным статором с лопатками, расположенными вокруг ротора и направляющими ветровой поток на лопасти ротора под определенным углом. Статор позволил не только увеличить площадь захватываемого ветрового потока, но и также изменить направление действия потока и получить полезный вращающий момент на участке движения лопастей ротора навстречу ветру [23]. В 1891 году Д. Блис (J. Blyth) в Шотландии впервые применил ветроустановку для электроснабжения дома (рис.4). Это была вертикально-осевая карусельная ветроустановка с восемью парусным лопастями, имеющими форму полуцилиндра, расположенными на диаметре 4,3 м [21].

#### *Ротор Савониуса*

Современный этап развития ВЭУ ВО начинается в 1930-х годах с изобретения ротора Савониуса. В 1929 году патентным ведомством США был зарегистрирован «ротор, приводимый в движение потоком жидкости или воды,» финского инженера С. Савониуса (S. J. Savonius). Ротор Савониуса представляет собой полуцилиндрические лопасти, размещенные S-образно относительно вертикальной оси вращения [17]. Вращающий момент ротора Савониуса образуется за счет того, что давление ветрового потока на вогнутую поверхность лопасти, которая движется по ветру, примерно в 4 раза превышает давление ветра на выпуклую поверхность лопасти, движущейся навстречу потоку. По сути, Савониус научно обосновал, существенно обновил и развил аэродинамический принцип работы первых ветродвигателей Древнего Китая и Персии, основанный на разности давлений ветра на лопасти, движущиеся по направлению и против ветра.

Коэффициент мощности ротора Савониуса не превышает 0,15–0,20, что значительно ниже, чем у горизонтально-осевых роторов. Поэтому до конца XX века ветроустановки с ротором Савониуса считались малоперспективными и не находили коммерческого применения. В настоящее время малые вертикально-осевые ветроустановки мощностью до 10–15 кВт с ротором Савониуса, благо-

даря низким значениям рабочей скорости вращения, вибрации и уровня шумов, нашли применение в городских условиях. Широко используется модификация ротора Савониуса с геликоидными лопастями. Применение ротора Савониуса для более мощных ветроустановок нецелесообразно из-за их высокой парусности, материалоемкости и уровня ветровых нагрузок.

*Ротор Дарье с криволинейными лопастями*

В 1931 году французский инженер Дж. Дарье (G. J. M. Dargieus) запатентовал в США ветроустановку с вращающимся валом, расположенным перпендикулярно к набегающему потоку [18]. В изобретении обтекание лопастей ротора потоком происходит с минимальным сопротивлением движению вперед и с максимальным преобразованием энергии потока с помощью полезной составляющей тянущей силы лопасти. Лопастей ротора могут быть прямыми, т.е. располагаться параллельно валу и образовывать цилиндрический барабан (беличье колесо), или криволинейными, изогнутыми в форме скакалки по полуокружности, для уменьшения или исключения изгибающих нагрузок, возникающих в результате действия центробежной силы. В запатентованной ветроустановке был применен аэродинамический принцип работы горизонтально-осевого ротора - возникновение на лопастях аэродинамического профиля подъемной силы. По имени изобретателя данное устройство получило название вертикально-осевого ротора Дарье.

В течение последующих 30 лет ротор Дарье не привлекал внимание специалистов, т.к. ошибочно считалось, что его быстроходность, как и ротора Савониуса, не может быть больше единицы, в отличие от горизонтально-осевых роторов, быстроходность которых в несколько раз выше. Эта предпосылка, верная только для вертикально-осевого ротора Савониуса, использующего эффект давления ветрового потока на лопасти, привела к неправильным теоретическим выводам о том, что предельный коэффициент мощности ротора Дарье, как и ротора Савониуса, значительно ниже горизонтально-осевого ротора. И только в 1960-х годах Р. Рэнжи (R. S. Rangi) и П. Саус (P. South) в National Research Council of Canada (NRC) провели в аэродинамической трубе измерения энергетических характеристик ротора Дарье с криволинейными лопастями, которые показали, что его коэффициент мощности не уступает горизонтально-осевому ротору. Они также определили два принципиальных преимущества вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье: всенаправленность (независимость от направления ветра), позволяющая отказаться от механизмов ориентации ротора на ветер, и возможность расположения механического и электрического оборудования на земле, что существенно упрощает конструкцию и эксплуатацию ВЭУ ВО [22]. Дальнейшие исследования в NRC были направлены на изучение влияния числа лопастей, заполнения ротора, интерцепторов и воздушных тормозов на характеристики ротора Дарье. Обширная программа исследований ротора Дарье с криволинейными лопастями проводилась в Sandia National Laboratories (SNL), США. В 1974 году здесь был создан исследовательский образец ВЭУ ВО с ротором Дарье диаметром 5 м, а в 1977 году – диаметром 17 м и номинальной мощностью 60 кВт. Важным шагом в развитии крупных и эффективных ВЭУ ВО с ротором Дарье с криволинейными лопастями было строительство и опытная эксплуатация SNL в 1987 году ветроустановки диаметром 34 м и мощностью 625 кВт.

В 1988 году в Cap Chat, Квебек, компанией Lavalin при поддержке канадского правительства с участием NRC была построена ветроустановка «Eole C» номинальной мощностью 4,2 МВт с ротором Дарье с двумя криволинейными лопа-



стями. Ротор имел диаметр по экватору 64 м, высоту 96 м и вращающийся вертикальный вал диаметром 5 м (рис.5). Для лопастей ротора ветроустановки был выбран профиль NASA 0018 с хордой 2,4 м. Ометаемая площадь ротора составляла 4000 м<sup>2</sup>. Ветроустановка предназначалась для генерирования энергии в диапазоне ветров от 5,5 до 20 м/с. Она была выполнена с прямым приводом (без мультипликатора) и работала с переменной частотой вращения ротора от 7,9 до 14,2 об/мин. Генератор диаметром 12 м был установлен на фундаменте. В то время номинальная мощность этой ветроустановки превышала мощность самых крупных горизонтально-осевых ветроагрегатов: MOD-2 (США) – 2,5 МВт, Growian (Германия) – 3 МВт и WTS-4 (Швеция) – 4 МВт. Ветроустановка «Eole C» проработала около 6,5 лет до отказа нижнего опорного подшипника в мае 1993 года с ограничением скорости ветра до 18,5 м/с. Максимальная выходная мощность при этом составляла 2,7 МВт. При коэффициенте готовности 96% ветроустановка вырабатывала за год в среднем 3000 МВт ч энергии. Общая наработка за все время эксплуатации составила 18550 час [7].

С начала 1980-х годов канадские компании Indial Technologies, Lavalin, Adecon и американские компании FloWind, Vawtpower начали интенсивно осваивать коммерческие ВЭУ ВО с ротором Дарье с криволинейными лопастями. Самый крупный производитель ВЭУ ВО – компания FloWind за период с 1981 по 1986 год ввела в эксплуатацию более 500 вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье диаметром 19 м, высотой 30 м и номинальной мощностью 300 кВт. Однако в 1988 году из-за низкой усталостной прочности лопастей начались отказы ветроустановок FloWind и к 2004 году они практически все были выведены из эксплуатации. Необходимо отметить, что при разработке не были в полной мере учтены ветровые условия площадок расположения этих ветроустановок, в результате чего их коэффициент мощности не превышал величины 0,12 [12].



Рис.5. ВЭУ ВО «Eole C»  
(<http://www.eolecapchat.com>)



Рис.6. ВЭУ ВО «VAWT 450»  
(<http://www.hvirvelvinden.dk>)



Рис.7. ВЭУ ВО «H-Rotor 300»  
(<http://www.jbendfeld.de>)

В 2000 году канадская компания Sustainable Energy Technologies вышла на рынок с коммерческой ветроустановкой «Chinook 2000» мощностью 250 кВт при номинальной скорости ветра 17 м/с [9]. Ротор Дарье этой ветроустановки диаметром 16,5 м и ометаемой площадью 405 м<sup>2</sup> выполнен с четырьмя криволинейными алюминиевыми лопастями хордой 0,6 м. Отличительной особенностью ветроустановки «Chinook 2000» является выполнение опорного вала в виде ферменной

конструкции, что значительно снижает вес конструкции, и замена тросовых растяжек опорного вала жесткими ферменными подкосами, что существенно повышает жесткость и надежность опорной конструкции.

Проведенные исследования и эксплуатация в натурных условиях выявили как преимущества, так и основные проблемы вертикально-осевых ветроустановок, выполненных по схеме Дарье с криволинейными лопастями. Наиболее существенными из недостатков были усталость изогнутых лопастей от действия постоянно изменяющихся аэродинамических и инерционных сил, необходимость применения длинных вращающихся вертикальных валов, сложность изготовления длинных криволинейных лопастей, низкая надежность системы растяжек вертикальной опоры, невозможность размещения ветроустановок с системой растяжек на берегу и на оффшорных участках. При этом, несмотря на значительный объем проведенных теоретических и экспериментальных исследований, ВЭУ ВО с ротором Дарье с криволинейными лопастями не достигли уровня эффективности ВЭУ ГО.

#### *Ротор Дарье изменяемой геометрии с прямыми лопастями*

Одновременно с исследованиями в США и Канаде ротора Дарье с криволинейными лопастями в Великобритании начались работы по созданию ветроустановок с ротором Дарье с прямыми лопастями. В 1975 году английский инженер П. Масгроув (P. J. Musgrove) из Reading University предложил новую модификацию ротора Дарье, в которой прямые лопасти, расположенные на горизонтальной траверсе, имели возможность при помощи шарниров наклонять верхнюю и нижнюю половины лопасти, изменяя их угол с траверсой. При работе до номинальной мощности ветроустановки лопасти находились в вертикальном положении, а при ее превышении лопасти при помощи тяг наклонялись к траверсе. Такая конструкция позволяет, во-первых, минимизировать напряжения при изгибе аналогично криволинейным лопастям, а во-вторых, при изменении наклона лопасти изменять ее эффективный угол атаки аналогично повороту лопасти ВЭУ ГО и, таким образом, регулировать мощность ветроустановки [19].

После проведения в Reading University научно-исследовательских работ и получения положительных результатов при испытаниях двухлопастной модели диаметром 3 м в натурных условиях и аэродинамической трубе Министерство энергетики Великобритании начало финансирование программы создания вертикально-осевых ветроустановок мегаваттной мощности с прямыми лопастями изменяемой геометрии, т.к. ожидалось, что в результате повышения стоимости нефти в период энергетического кризиса ветроэнергетика станет экономически выгодной и конкурентоспособной альтернативой традиционным энергетическим технологиям. Первым этапом программы была разработка и строительство в Carmarthen Bay английской компанией «VAWT» экспериментальной ветроустановки «VAWT 450» диаметром 25 м, длиной лопасти 18 м и мощностью 130 кВт при номинальной скорости ветра 11 м/с (рис.6) [22]. Фактический коэффициент мощности ветроустановки был равен 0,3 [14]. Лопасть имела профиль NASA 0015 и состояла из двух частей, которые с помощью гидравлического привода наклонялись к траверсе. Трансмиссионная система передачи вращающего момента от ротора на генератор была выполнена с двумя ступенями. Первичный мультипликатор, расположенный в верхней части башни, повышал скорость вращения ротора 21,4 об/мин (при скорости ветра до 10 м/с) и 27 об/мин (при скорости ветра свыше 10 м/с) до 110 об/мин. Далее вращающий момент че-

рез вертикальний вал передавався на вторичний мультипликатор, розположений на рівні землі. Вторичний мультипликатор підвищував швидкість обертання вала до робочої швидкості двох генераторів, які підключалися в залежності від вихідної потужності ротора. Опорна конструкція вітроустановки представляла собою циліндричну залізобетонну башню висотою 25 м. Головна мета цього проекту складалася в зборі інформації і визначенні проектних критеріїв конструкції для подальших розробок. Вітроустановка була оснащена системою збору інформації, налічують більше 200 датчиків. Будівництво установки було завершено в вересні 1986 року.

Одночасно з «VAWT 450» розроблявся проект комерційної демонстраційної вітроустановки «VAWT 220» діаметром 17 м, ометаною площею 220 м<sup>2</sup> і потужністю 100 кВт з ротором змінюваної геометрії. Довжина лопасті складала 12,5 м, хорда – 0,85 м, профіль – NACA 0018. Ця вітроустановка була побудована на островах Scilly в червні 1987 року. По порівнянню з своєю попередницею «VAWT 220» мала ряд спрощень. Для нахилу лопастей замість гідравлічного був застосований механічний привод з ходовим винтом, трансмісійна система виконана з одним мультипликатором, а опорна конструкція представляла сталеву треногу з невеликим вагою і високою жорсткістю. Для оптимізації вихідної потужності вітроустановка «VAWT 220» була оснащена двома генераторами: 6-полюсний генератор потужністю 30 кВт для роботи при швидкості ротора від 33 до 50 об/хв і 4 полюсний генератор потужністю 100 кВт для роботи при швидкості ротора вище 50 об/хв.

В 1987 році було завершено будівництво, а в жовтні 1988 року введена в експлуатацію вітроустановка «VAWT 260» з ометаною площею 260 м<sup>2</sup>, потужністю 105 кВт. Від установки «VAWT 220» вона відрізнялася розмірами ротора (діаметр 19,5 м і висота 13,3 м), нерухомими лопастями і траверсою аеродинамічного профілю (сталевий каркас з склопластиковою обшивкою). В якості матеріалу лопастей профілю NACA 0018 застосовувався склопластик. Триступінчастий мультипликатор підвищував частоту обертання ротора 33 об/хв до частоти 1000 об/хв і передавав крутять момент на два генератора потужністю 35 і 75 кВт. На цій вітроустановці вперше вдалося досягти величини коефіцієнта потужності 0,4 [14].

В 1990 році в Carmarthen Bay була побудована досвідча вітроустановка «VAWT 850» потужністю 500 кВт, яка до теперішнього часу є найпотужнішою вертикально-осовою вітроустановкою з прямолопастним ротором Дарье. В даній вітроустановці розробники відмовилися від схеми ротора змінюваної геометрії і встановили на горизонтальній траверсі на діаметрі 38 м дві нерухомі лопасті довжиною 22 м. Коефіцієнт потужності вітроустановки «VAWT 850» склав 0,31 [14]. В 1991 році вітроустановка вийшла з ладу внаслідок результату руйнування лопасті, викликаного виробничим дефектом [22].

Далі, використовуючи досвід розробки і експлуатації вітроустановок «VAWT 450», «VAWT 220», «VAWT 260» і «VAWT 850», компанія «VAWT» приступила до розробки проекту вертикально-осовою вітроустановки «VAWT 2400» з прямолопастним ротором Дарье мегаватного класу. Ометана площа двухлопастного ротора була рівна 2400 м<sup>2</sup>, а номінальна потужність вітроустановки складала 1,7 МВт. Планетарний мультипликатор і генератор вітроустановки розташовувалися в опорній циліндричній башні на висоті 45 м. Були подроби-

но рассмотрены конструктивные решения всех основных узлов и систем ветроустановки. При проведении проектных работ было показано, что исключение наклона лопастей и выполнение их с постоянной геометрией незначительно увеличит нагрузки, но приведет к существенному упрощению конструкции, повышению ее надежности и снижению стоимости производимой энергии на 20%. Результаты испытаний вертикально-осевых ветроустановок серии «VAWT», опыт их разработки и строительства показали, что роторы Дарье изменяемой геометрии, предложенные Масгроувом, имеют ряд недостатков. При наклонном положении лопастей вертикальные составляющие ветрового потока приводят к возникновению на них вертикальных сил, которые нагружают лопасть и траверсу значительными изгибающими моментами. Кроме того, роторы Дарье изменяемой геометрии сложны и дороги в изготовлении и имеют низкую надежность при эксплуатации, а их мощность можно эффективно регулировать и другими, более простыми способами, например срывом потока с лопастей или электрической нагрузкой генератора. В результате проведенных исследовательских и проектных работ, а также анализа эксплуатации опытных ветроустановок было показано, что вертикально-осевые ветроустановки с ротором Дарье с прямыми лопастями фиксированной геометрии могут работать с достаточной степенью эффективности и надежности [15].

### *Н-ротор*

Свое дальнейшее развитие схема ротора Дарье получила в более перспективной модификации – роторе Дарье с прямыми вертикальными лопастями, жестко установленными на горизонтальных или наклонных траверсах. Позже эта конструкция стала называться Н-ротором Дарье. В конце 80-х годов исследованиями и разработкой вертикально-осевых ветроустановок большой мощности с Н-ротором Дарье, кроме упоминавшейся компании «VAWT» из Великобритании, начали заниматься в Германии и СССР, а позже в Украине. В Германии компанией «Heidelberg Motor» с участием Института полярных и морских исследований Alfred Wegener, Высшей школы Bremerhaven, фирмы Germanshen Lloyd и при содействии Министерства научных исследований и технологий специально для эксплуатации в экстремальных климатических условиях была разработана и изготовлена вертикально-осевая ветроустановка «Н-Rotor 20/56» с 3-лопастным ротором Дарье мощностью 20 кВт. Прямые лопасти длиной 5,6 м были расположены на диаметре 10 м, что обеспечивало площадь ометаемой поверхности ротора 56 м. В ветроустановке, так же как в «Eole C», была применена прямая схема передачи мощности от ротора на генератор без использования мультипликатора и впервые в вертикально-осевой ветроустановке генератор был расположен в верхней части опорной башни непосредственно под ротором. В ветроустановке «Н-Rotor 20/56» был применен тихоходный синхронный многополюсный генератор с возбуждением от постоянных магнитов с диапазоном рабочих скоростей вращения 30 – 60 об/мин, который соответствовал диапазону рабочих скоростей вращения ротора. В генератор был встроен электромагнитный тормоз. Отличительной особенностью этой ветроустановки является только одна вращающаяся часть конструкции – ротор с кольцом постоянных магнитов синхронного генератора. Конструкция установки проста, надежна и требует минимального объема технического обслуживания, т.к. в ней отсутствуют зубчатые передачи, гидравлика, система ориентации на ветер и поворот лопастей. Опора выполняется в нескольких вариантах: в виде телескопической или стационарной кон-

струкції. Ветроустановка прошла испытания на полигоне Kaiser Wilhelm Koog и в начале 1991 года была смонтирована на немецкой антарктической станции Georg von Neumayer. Телескопическая опора этой ветроустановки позволяет по мере увеличения высоты снежного покрова с помощью ручного привода восстанавливать высоту расположения ротора над поверхностью. Ветроустановка до настоящего времени работает практически без отказов и ежегодно вырабатывает около 35000 кВтч электроэнергии, что составляет около 5% потребности станции в электроэнергии. Ветроустановка «H-Rotor 20/56» также применялась для электроснабжения труднодоступных объектов, таких как телекоммуникационные станции в Руанде (Африка) и Ретвандхаусе (Альпы), расположенных на высоте 1800 м и 4000 м соответственно.

В 1993 году были введены в эксплуатацию 5 ветроустановок «H-Rotor 300» мощностью 300 кВт с диаметром ротора 34 м и длиной лопасти 23 м (рис.7). Основные технические решения этой ветроустановки аналогичны модели «H-Rotor 20/56».

В 2011 году шведская компания Vertical Wind построила опытную ветростанцию из 4 вертикально-осевых ветроустановок VW200 с Н-ротором единичной мощностью 200 кВт. Длина лопастей составляет 24 м, диаметр ротора – 26 м, высота башни – 40 м. Трансмиссия ветроустановки выполнена с прямым приводом. Многополюсный синхронный генератор размещен на фундаменте, а вращающий момент от ротора на генератор передается с помощью вертикального вала.

#### *Н-ротор с геликоидными лопастями (ротор Горлова)*

Одним из недостатков Н-ротора является циклическая пульсация величины его вращающего момента за один оборот вращения, обусловленная изменением величины подъемной силы на лопастях в зависимости от их азимутального положения. При этом аэродинамическая подъемная сила, а значит, и вращающий момент лопасти за один оборот изменяются в диапазоне от отрицательного (на наступающем и отступающем участках траектории) до максимального значения (на наветренном и подветренном участках траектории). Такая пульсация вращающего момента приводит к неравномерности скорости вращения и высокому стартовому моменту ротора, что снижает его эффективность. Указанные недостатки аэродинамики Н-ротора попытался устранить профессор Северо-Восточного Университета США А. М. Горлов.



Рис.8. Ротор Савониуса с геликоидными лопастями (<http://www.windausenergy.com>)



Рис.9. Ротор Дарье с геликоидными лопастями (<http://www.marcpower.com>)

В созданной им гидротурбине прямыми лопастями Н-ротора путем их винтовой закрутки относительно оси вращения ротора была придана геликоидная форма [20]. Геликоидные лопасти за счет закрутки, перекрывая друг друга, постоянно находятся на участках траектории с положительным вращающим моментом, что обеспечивает в течение полного оборота ротора угловую скорость и вращающий момент, близкие к постоянным. При этом закрутка лопастей практически не влияет на величину коэффициента мощности ротора, однако она приводит к более пологой форме его пика, что существенно увеличивает диапазон значений коэффициента быстроходности, при которых коэффициент мощности сохраняет близость к его максимальному значению. В оригинальном исполнении винтовой ротор Горлова представляет собой гидротурбину, однако принцип спиральной закрутки лопастей сегодня часто применяется для повышения эффективности ветроустановок малой мощности с вертикально-осевыми роторами Савониуса (рис.8) и Дарье (рис.9).

### Выводы

1. В настоящее время приоритет в развитии энергетических технологий принадлежит нетрадиционной экологически чистой энергетике, использующей возобновляемые источники энергии, в том числе ветроэнергетике.

2. Вертикально-осевые ветроэлектрические установки, как новое направление ветроэнергетики, начали развиваться в 1970-х годах, в то время как горизонтально-осевые ветроэлектрические установки имеют многовековую историю, что и предопределило их высокий технический уровень.

3. За непродолжительный период развития вертикально-осевого направления (около 50 лет) был проведен большой объем теоретических фундаментальных исследований принципиально новых вопросов аэродинамики, прочности и динамики ротора Дарье, инженерных работ по решению конструктивных проблем, связанных с повышенной массивностью, инерционностью и циклическим нагружением вращающихся узлов, в результате получен опыт разработки, отработки и эксплуатации вертикально-осевых ветроустановок.

4. В процессе проведения научных и инженерных работ вертикально-осевые ветроустановки с ротором Дарье прошли несколько этапов совершенствования, в результате их эффективность и надежность приблизилась к уровню горизонтально-осевых конструкций.

5. Сегодня вертикально-осевые роторы Савониуса и Дарье различных модификаций применяются только в малых ветроустановках. На мировом рынке ветроэнергетики общее количество моделей вертикально-осевых ветроустановок мощностью до 50 кВт составляет около 35%, а в классах мощности свыше 100 кВт коммерческие вертикально-осевые ветроустановки практически отсутствуют.

### Библиографические ссылки

1. Дзензерский В. А. Ветроустановки малой мощности / В. А. Дзензерский, С. В. Тарасов, И. Ю. Костюков. – К.: Наук. думка, 2011. – 592 с.

2. История ветроэнергетики / Всерос. ассоциация ветроиндустрии. – 12 с. Режим доступа: [http://rawi.ru/media/Text\\_files/history.pdf](http://rawi.ru/media/Text_files/history.pdf).

3. Капица С. П. Парадоксы роста / С. П. Капица. – М.: Альпина, 2009. – 115 с.

4. Костюков И. Ю. Философская рефлексия преодоления проблем современной экологии с помощью технических средств возобновляемой энергетики

/ И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. № 1/2, Т. 18, Серія : Історія і філософія науки і техніки. Вип. 21. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту. – 2012. – С. 65–71.

5. **Маркс К.** Машины: применение природных сил и науки / К. Маркс // Вопр. истории естествознания и техники – М. – 1968. – Вып. 25.

6. **Akhgari. A.** Experimental investigation of the performance of a diffuser-augmented vertical axis wind turbine / A. Akhgari, University of Tehran. – 2007. – 89 p.

7. **Carlin P. W.** The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology / P. W. Carlin, A. S. Laxson, E. B. Muljadi // NREL/TP-500-28607. – Colorado, USA. – 2001. – 68 p.

8. **Chinchilla R.** Wind Power Technologies: A Need for Research and Development in Improving VAWT's Airfoil Characteristics / R. Chinchilla, S. Guccione, J. Tillman // Journal of Industrial Technology. – 2011. – Vol.4, No.1. – P. 1–6.

9. Chinook 2000 / Sustainable Energy Technologies. – 2000. – 6 p. Режим доступа: <http://physics.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/solar/wind/turbine/Chinook2000.Darrieus.design.pdf>.

10. **Dodge D.** An Illustrated History of Wind Power Development / D. Dodge, – 2001. Режим доступа: <http://telosnet.com/wind/index.html>.

11. **Fernando M. S. U. K.** On the Performance and Wake Aerodynamics of the Savonius Wind Turbine / M. S. U. K. Fernando // A Thesis for the award of the degree of Doctor of Philosophy, University of British Columbia, 1987. – 242 p.

12. **Gipe P.** FloWind: The World's Most Successful VAWT / P. Gipe, – 2013. Режим доступа: <http://www.wind-work.org>.

13. **Herbert G. M. J.** A review of wind turbine technologies / G. M. J. Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan, S. Rajapandian // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2007. No.11. – P. 1117–1145.

14. **Jamieson P.** Innovation in Wind Turbine Design / P. Jamieson. – Chichester: Wiley, 2011. – 316 p.

15. **Mays I. D.** The evolution of the straight-bladed vertical axis wind turbine / I. D. Mays, P. J. Musgrove, C. A. Morgan, G. Hancock // Wind Energy Convers.: Proc. 10<sup>th</sup> Brit. Wind Energy Assoc. Conf., London, 22 – 24 March 1988. – P. 187 – 194.

16. **Molenaar D. P.** Cost-effective design and operation of variable speed wind turbines / D. P. Molenaar. – Delft, Netherlands: Delft University Press, 2003. – 355 p.

17. Patent 1697574 USA. Rotor adapted to be driven by wind or flowing water / Savonius S.J. – 1.01.1929. – 8 p.

18. Patent 1835018 USA. Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current / Darrieus G.J.M. – 8.12.1931. – 4 p.

19. Patent 4087202 USA. Vertical Axis Wind Turbines / Musgrove P. J. – 2.05.1978. – 9 p.

20. Patent 5451137 USA. Unidirectional helical reaction turbine operable under reversible fluid flow for power systems / Gorlov A.M. – 19.09.1995. – 17 p.

21. **Price T. J.** James Blyth – Britain's First Modern Wind Power Engineer / T. J. Price // Wind Engineering. – 2005. – No.29 (3). – P. 191–200.

22. **Price T. J.** UK Large-Scale Wind Power Programme From 1970 to 1990: The Carmarthen Bay Experiments and the Musgrove Vertical-Axis Turbine / T. J. Price // Wind Engineering. – 2006. – Vol.30, No.3. – P. 225 – 242.

23. **Ragheb M.** Historical Wind Generators Machines / M. Ragheb, 2013. – 22 p. Режим доступа: <http://mragheb.com/NPRE%20475%Wind%20Power%20Systems/>

Historical%20Wind%20Generators%20Machines.pdf.

24. **South P. A** Wind Tunnel Investigation of a 14ft Diameter Vertical Axis Windmill / P. South, R. S. Rangi, NRC, Canada, report LTR-LA-105. – 1972.

25. **Spera D. A.** Wind turbine technology: fundamental concepts of wind turbine engineering/ D. A. Spera. – New York: ASME, 1994. – 638 p.

26. **Tong W.** Wind Power Generation and Wind Turbine Design / W. Tong. – Boston: WIT Press, 2010. – 769 p.

27. Water pumping windmill history in America / Ironman Windmill Co, 2012. Режим доступу: <http://www.ironmanwindmill.com/windmill-history.htm>.

28. Wind Energy – the Facts / European Commission, Directorate General for Energy, EWEA, 2008. – P. 76, 89, 125.

*Надійшла до редколегії 25.12.2013*

УДК 577.4; 130.1

**\*Е. Р. Абрамовский, \*\*И. Ю. Костюков, \*\*С. В. Тарасов, \*\*\*А. И. Яковлев**

*\*Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара*

*\*\*Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг»*

*\*\*\*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*

## **РЕТРОСПЕКТИВА И ПЕРСПЕКТИВА ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ**

### **Статья II. Развитие вертикально-осевого направления ветроэнергетики в Украине**

**Рассмотрены основные работы украинских предприятий по теоретическим и экспериментальным исследованиям и созданию натуральных образцов вертикально-осевых ветроустановок с ротором Дарье.**

*Ключевые слова:* вертикально-осевая ветроустановка, ротор Дарье, аэродинамика ветродвигателей, автономная ветроустановка, сетевая ветроустановка.

**Розглянуто основні роботи українських підприємств з теоретичних і експериментальних досліджень та створення натурних зразків вертикально-осьових вітроустановок з ротором Дар'є.**

*Ключові слова:* вертикально-осьова вітроустановка, ротор Дар'є, аеродинаміка вітродвигунів, автономна вітроустановка, приєднана до мережі вітроустановка.

**The basic works of the Ukrainian enterprises in the field of theoretical and experiment-tal research and on creation of natural samples Darrieus vertical axis wind turbine are considered.**

*Keywords:* vertical axis wind turbine, Darrieus rotor, aerodynamics of wind turbines, stand alone wind turbine, network wind turbine.

**Введение.** В конце 1980-х годов в Украине возникла новая отрасль науки и техники – ветроэнергетика. С самого начала развитие ветроэнергетики пошло по двум направлениям. Первое направление, заключающееся в разработке и производстве отечественных ветроустановок, было для Украины, обладающей высо-

© Е. Р. Абрамовский, И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов, А. И. Яковлев, 2014