

УДК 629.7.03.035.5

**Д-р техн. наук Р. С. Турманидзе, В. А. Шилакадзе, Т. С. Апциаури***Грузинский технический университет, г. Тбилиси, Грузия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В ДИНАМИКЕ

*Представлены результаты исследования действующей модели воздушных винтов с изменяемыми геометрическими параметрами в динамике. На основе аэродинамических и экономических расчетов доказано эффективность использования роторов таких конструкций для мощных, ветровых станций. Дается анализ разных конструкций и методика подбора той или иной конструкций для разных условий эксплуатации ветроустановок в широком диапазоне изменения скорости ветра.*

**Ключевые слова:** воздушный винт, винт фиксированного шага, винт изменяемой геометрии, ветроустановка, крутка лопастей.

Известно, что со дня существования воздушных винтов остро стоит проблема создания конструкции воздушных винтов с возможностью изменения основных геометрических параметров в динамике. Это обусловлено тем, что винты фиксированного шага (ВФШ) не являются оптимальными для всех этапов эксплуатации агрегатов разного назначения. Решение этой проблемы возможно только лишь применением винта изменяемой геометрии (ВИГ), благодаря возможности одновременного изменения диаметра винта, а также угла установки и крутки лопастей в динамике.

Например, для авиации использование ВИГ дает возможность особенно эффективной оптимизации полета самолетов вертикального взлета и посадки (СВВП), обеспечением максимального диаметра и минимальной крутки в режиме висения, и наоборот, минимального диаметра и максимальной крутки при горизонтальном полете.

Для ветроэнергетических установок, особенно с большими мощностями, использование ВИГ даст возможность расширить диапазон максимальных значений КПД установки при изменении скорости ветра в большом диапазоне от 3 до 20...22 м/с, а также обеспечить работоспособность установки при тех высоких скоростях ветра (22...35 м/с), при которых существующие установки работать не в состоянии. Эта проблема особенно актуальна стала после известной катастрофы в Фукусиме (Япония), в результате которой все ведущие страны мира стараются максимально заменить долю атомной энергии другими видами в общем энергетическом балансе страны. На сегодняшний день, для этой цели более эффективный метод, чем ветро-

энергетика по экономическим и экологическим критериям, а также потенциально возможным осваиваемым объемом энергий к сожалению, не существует.

Проведенные предварительные аэродинамические и экономические расчеты доказывают, что в результате использования таких конструкций можно увеличить годовой объем выработки каждой ветростанции минимум на 100 %.

Несмотря на множество работ известных фирм и ученых разных стран, проблема ВИГ еще не решена. Существуют патенты, не нашедшие реального воплощения, главным образом из-за сложности и недостаточной надежности технических решений.

Следует учесть, что все эти фирмы занимались изменением какого-либо одного параметра, например, фирма «Сикорский» занималась изменением только диаметра винта, а корпорация «Боинг» — изменением только крутки лопастей.

Грузинский технический университет (ГТУ) предложил сочетание изменения диаметра и крутки во время полета.

По линии международного научно-технического центра (МНТЦ) группа специалистов ГТУ работала над проектом G-060-2 «Винт изменяемой геометрии (ВИГ) и средства его управления (узлы, приводящие в действие)».

Первоначально на этапе анализа, на основе расчленения объекта исследования был спроектирован и изготовлен макет винта с изменяемым диаметром, потом макет винта с изменяемой круткой лопастей. После лабораторных испытаний их основных узлов на этапе синтеза был создан винт с одновременно изменяемыми

диаметром и круткой лопастей, а также стенд для его испытания [3].

Проведенные стендовые испытания модели ВИГ показали, что при высоких числах оборотов возникают значительные центробежные силы, действующие на ходовой винт. Ходовой винт — самый нагруженный элемент конструкции несущего винта и является слабым звеном. Снижение вредного воздействия этих сил и стало весьма актуальной проблемой. Соответственно по линии МНТЦ группа специалистов ГТУ работала над проектом G-916 «Управляемый винт изменяемой геометрии с компенсацией действия центробежных сил». Коллабораторами были Жан Жакк Филипп старший научный сотрудник, почетный советник научного центра Франции «ОНЕРА», занимающегося исследованиями и разработками вертолетов и СВВП, и господин Лео Дадоне.

Целью проекта G-916 была разработка системы компенсации центробежных сил. Технический подход состоял в проведении модельного эксперимента, в котором стенд стационарно закреплен на месте. При вращении винта в режиме вентилятора были осуществлены измерения тяги в зависимости от изменения частоты вращения и диаметра винта. Это имитирует условия режима висения летательного аппарата. Из возможных принципов компенсации (механического, электрического, гидравлического) был выбран гидравлический, как наиболее гибкий в управлении [2, 4].

На конструкцию этого варианта ВИГ получен Европатент Application No/Patent No 08737551.5-2422 PCT/IB2008001041. В настоящее время патентуется в США. Все финансовые расходы патентования взял на себя Евросоюз.

Безопасность динамических испытаний ВИГ была обеспечена безотказностью узлов ВИГ с системой компенсации. Для оценки безотказности был сконструирован и изготовлен стенд статических испытаний, на котором были экспериментально имитированы нагрузки, действующие при различных частотах вращения винта. Были определены линии упругости лопасти в зависимости от имитируемых частот вращения при сдвинутой и раздвинутой лопасти, а также зависимости усилий на рычаге управления стендом от имитируемых частот вращения.

Эксперименты, на стенде динамических испытаний, были проведены методом замера скорости воздушного потока крыльчатым анемометром, который для данной задачи характеризовался достаточной повторяемостью результатов измерений.

Установлено, что в случае увеличения диаметра винта в 1,4 раза и изменения крутки лопасти в пределах  $16...18^\circ$  обеспечивается повышение силы тяги примерно, в 1,6 раза.

Эффективность системы компенсации доказана многократным безотказным сдвижением-раздвижением лопасти винта во всем диапазоне изменения частот вращения. Это обусловило синхронность функционирования ВИГ.

Результаты работ по обоим проектам доложены и одобрены на авторитетных международных научно-технических конференциях, запатентованы и опубликованы в научных статьях. В Грузии и Румынии издана монография на русском и английском языках.

Коллабораторами проектов было предложено, что для дальнейшего увеличения эффективности использования ВИГ, особенно для маленьких самолетов, целесообразно упрощение механизма изменения диаметра и увеличение диапазона изменения крутки лопастей до  $30...35^\circ$ .

Исполнителями проекта было предложено несколько конструктивных вариантов для решения этой задачи. МНТЦ на основании поддержки коллабораторов профинансировал это предложение.

Из предложенных конструктивных вариантов на основе консультации с коллабораторами, а также с другими компетентными специалистами, работающими в области авиации, был выбран более оптимальный и в условиях Грузии наиболее реализуемый вариант. Сущность этого варианта заключается в том, что втулка и лопасти освобождены от всяких лишних деталей и узлов и остался только трос, концы которого закреплены на движущихся частях лопастей. Сама лопасть, с целью свободного осуществления крутки, состоит из гибких элементов, которые закреплены между нервюрами (рис. 1).

При увеличении оборотов воздушного винта, за счет возникших центробежных сил, движущиеся части лопастей раздвигаются и диаметр винта увеличивается. Для уменьшения диаметра, поршень и шток гидроцилиндра перемещаются в нужном направлении и с помощью тросов диаметр винта уменьшается.

При увеличении или уменьшении диаметра с помощью специальных механизмов каждая нервюра, в каждый момент, занимает заранее рассчитанное угловое положение вокруг неподвижного лонжерона, чем обеспечивается максимальная крутка лопастей при минимальном диаметре и наоборот, минимальная крутка при максимальном диаметре винта. Этими же механизмами крутки сохраняется стабильность формы лопастей при вращении винта т.е. при действии на лопасти значительных центробежных и подъемных сил.

Проведен подробный анализ существующих литературных данных, осуществлены необходимые аэродинамические и прочностные расчеты, составлены технологические карты изготовления всех ответственных деталей, параллельно были

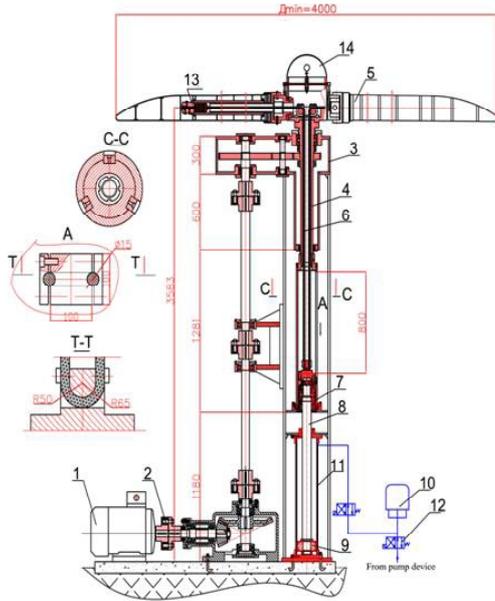
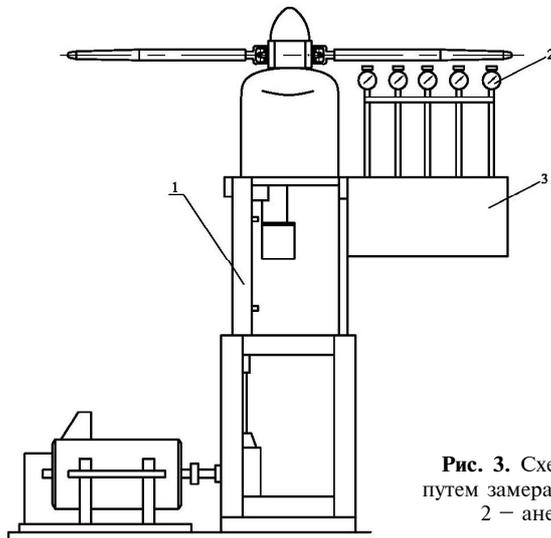


Рис. 1. Стенд динамических испытаний



Рис. 2. Лопасть с гибкими элементами и нервюра



Анемометр крыльчатый АСО-3

Рис. 3. Схема установки для измерения тяги винта на стенде путем замера скоростей с помощью анемометров: 1 – стенд ВИГ, 2 – анемометры, 3 – рама для установки анемометров

изготовлены детали и узлы, осуществлена модернизация стендов для статических и динамических исследований соответственно новой конструкции винта, проведены предварительные испытания лопастей на стенде статических испытаний и подготовлен стенд динамических испытаний для проведения подробных экспериментов (рис. 2).

По разработанной методике в предыдущем проекте измерены скорость воздушных потоков в разных сечениях лопастей по схеме, показанной на рис. 3, и с помощью известных зависимостей определены характер распределения подъемных сил вдоль лопастей при разных диаметрах ротора и величины крутки лопастей (рис. 4 и 5).

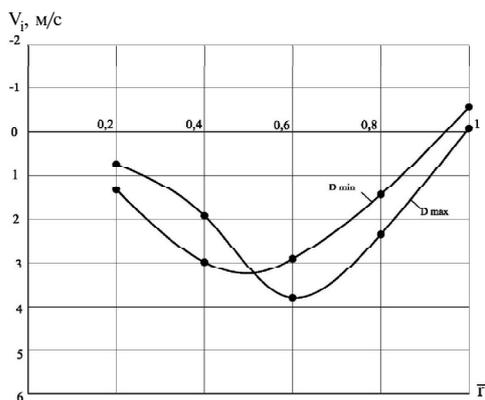


Рис. 4. Схема распределения индуктивных скоростей вдоль размаха лопасти для разных диаметров воздушного винта

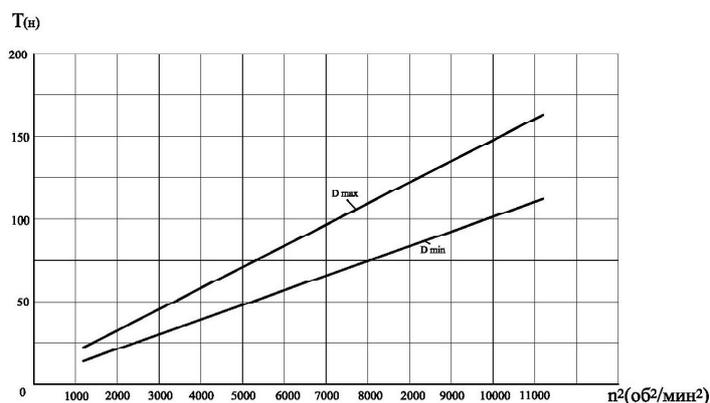


Рис. 5. Схема зависимости тяги ВИГ от частоты вращения винта для случая угла установки лопасти  $\varphi_{0,75} = 15^\circ$

Изучены также влияние угла установки лопасти на величину и характер распределения подъемной силы вдоль лопасти. Результаты некоторых экспериментов представлены на рис. 6–9.

Подготовлен рекламный ролик, показывающий последовательность процесса сборки отдельных ответственных узлов, а также принцип их работы, как в анимационном режиме, так и на реальной конструкции ротора и стенда для динамических испытаний.

Разработаны несколько вариантов конструкции роторов для ветровых станций, которые находятся на стадии патентования.

#### Заключение

1. Разработанная конструкция ротора с гибкими элементами позволяет регулировать кривую лопастей в заданном диапазоне до  $28^\circ$ . Она дает возможность произвести кривую лопастей практически по всей длине лопасти при соблю-

дении оптимальных размеров гибких элементов.

2. Существует зависимость тяги от изменения кривки лопастей ВИГ, которая дает возможность установить оптимальное значение кривки для получения нужной подъемной силы.

3. Использование роторов новой конструкции на самолетах СВВП может увеличить грузоподъемность примерно 1,6 раза или заметно увеличить дальность полета за счет уменьшения расхода топлива. Среднее приблизительное значение коэффициента увеличения дальности равняется 1,4, а конкретное значение будет определяться в каждом конкретном случае в зависимости от режимов полета.

4. Разработаны варианты конструкций роторов для ветроустановок и проведены предварительные аэродинамические и экономические расчеты, которые доказывают существенную эффективность использования таких конструкций в ветроэнергетике.

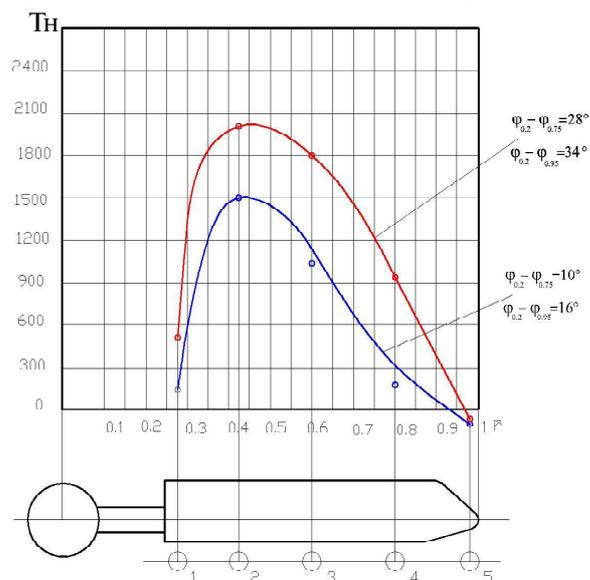


Рис. 6. График зависимости тяги ВИГ от изменения кривки лопастей для минимального диаметра  $D_{\min}$  винта, частоте вращения  $n = 300$  об/мин и угла установки  $\varphi = 5^\circ$

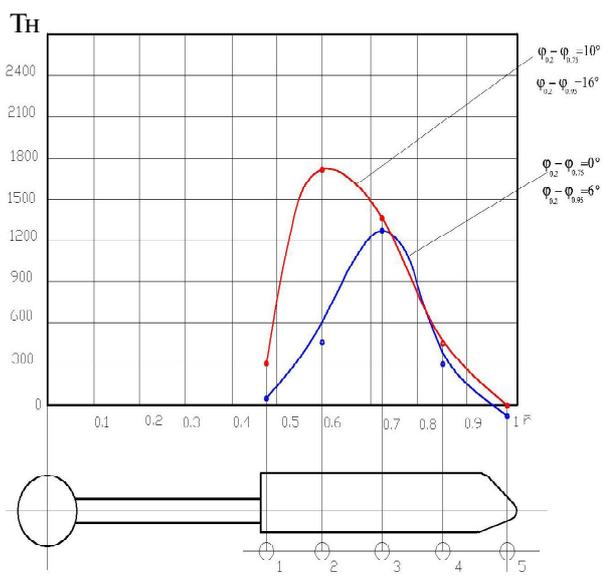


Рис. 7. График зависимости тяги ВИГ от изменения кривки лопастей для максимального диаметра  $D_{\max}$  винта, частоте вращения  $n = 200$  об/мин и угла установки  $\varphi = 5^\circ$

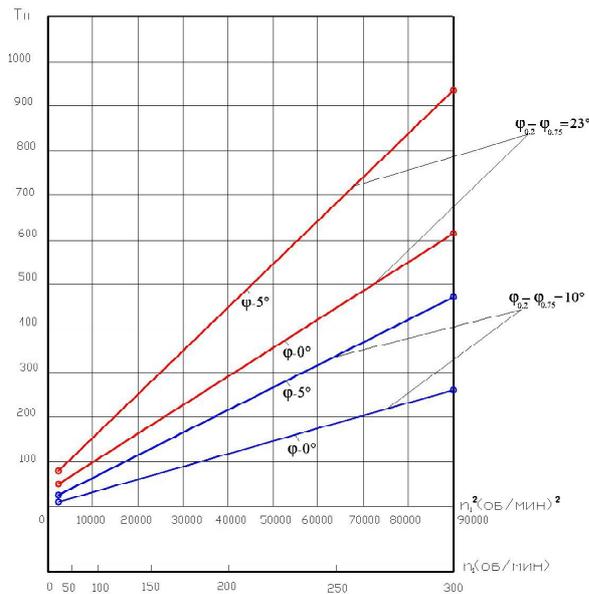


Рис. 8. График зависимости тяги ВИГ от частоты вращения винта, для минимального диаметра

#### Список литературы

1. Calculated Investigations of Fields of Inductive Velocities Behind the Rotor on Aerodynamic Characteristics of the Antitorque Rotor at Small Flight Speeds at Lateral Wind / [V. Animitsa, V. Golovin, M. Krainov etc.] // TSAGI. Moscow : the 4th Forum of the Russian Helicopter Society. February, 2004.
2. Turmanidze R. Increase of Flight and Technical Characteristics of Flying Vehicles By Means of Application of the Variable Geometry Rotor / R. Turmanidze, L. Dadone, G. Sanadze : materials of the 5<sup>th</sup> Forum of the Russian Helicopter Society. Moscow, 2002. – P. VI39–VI48.
3. Turmanidze R. Demaret, investigation,

**Турманідзе Р.С., Шилакадзе В.О., Апциаурі Т.С. Дослідження підвищення ефективності вітрових електростанцій шляхом застосування повітряних гвинтів з можливістю зміни геометричних параметрів в динаміці**

*Представлено результати дослідження діючої моделі повітряних гвинтів із змінними геометричними параметрами в динаміці. На основі аеродинамічних і економічних розрахунків доведено ефективність використання роторів таких конструкцій для потужних, вітрових станцій. Дається аналіз різних конструкцій і методика підбору тієї чи іншої конструкції для різних умов експлуатації вітроустановок в широкому діапазоні зміни швидкості вітру.*

**Ключові слова:** повітряний гвинт, гвинт фіксованого кроку, гвинт змінюваної геометрії, вітроустановка, крутка лопатей.

**Turmanidze, Shilakadze V., Aptsiauri T. Investigation of increase of efficiency of wind powered stations by means of propellers enabling variation of geometric parameters in dynamic conditions**

*The results of investigation of effective model of propellers with variable geometry parameters in dynamic conditions are presented. Aerodynamic design and economic calculations proved efficiency of such designs for powerful wind stations. Analysis is given of various designs and methods of selection of any design for various operating conditions of wind turbines in a wide range of varying wind speed.*

**Key words:** propeller, fixed pitch propeller, variable geometry propeller, wind turbine, blade twist.

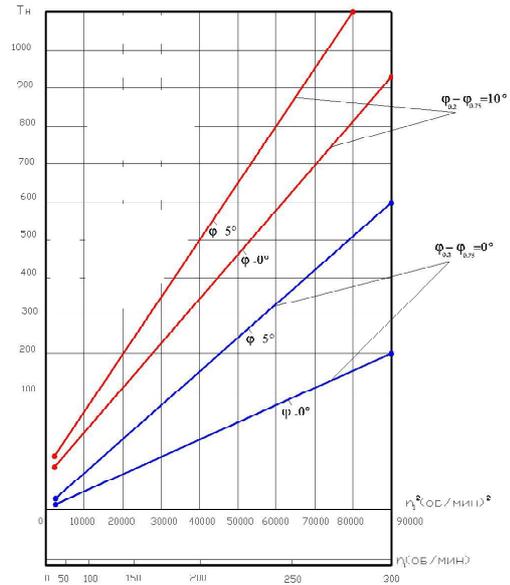


Рис. 9. График зависимости тяги ВИГ от частоты вращения винта, для максимального диаметра

development and tests results of the variable geometry rotor : 33 rd European rotorcraft forum. – Kazan, 10–14 September 2007, 11 p.

4. Dadone L. Proprotor Design Issues for High Speed Tiltrotors. Boeing Defense & Space Group, Helicopter Division / Dadone L., Liu J., Acree C. : NASA Ames research center. Presented at the 50 th annual forum of the American helicopter society, Washington, DC, May 1994. – 21 p.
5. Hybrid Feed forward-Feedback Control for Active Helicopter Vibration Suppression / [J. C. Walchko, J. Kim, K. W. Wang, E. C. Smith] // The Pennsylvania state university, University Park, PA 16802 : AHS Forum Penn State Papers May 1–3, 2007.

Поступила в редакцию 10.09.2012