

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЗАЦИИ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Г.Н. Рявкин
Д.С. Антипин
С.И. Кускарбекова
К.В. Осинцев

amdx3@bk.ru
andimas98@gmail.com
kuskarbekovasi@susu.ru
osintcevk@susu.ru

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск, Российская Федерация

Аннотация

Современное развитие аэродинамики и вычислительной техники дало новый толчок разработкам в области самолетостроения и ветроэнергетики. Важной особенностью крыльев практически всех видов беспилотных летательных аппаратов и лопастей ветроэнергетических установок является отсутствие механизации. Обширный опыт функционирования механизации выявил очевидные преимущества этих устройств в составе беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. С учетом актуальности внедрения механизации в конструкцию беспилотных летательных аппаратов и ветроэнергетических установок, предложено описание основных понятий аэродинамики, теоретических аспектов работы различных видов механизации крыла, беспилотных летательных аппаратов самолетного типа и ветроэнергетических установок. Выявлены общие аэродинамические принципы повышения производительности на всех режимах, на основании которых в дальнейшем возможно создание алгоритмов управления, в том числе на нейросетевом подходе. Нейросетевой алгоритм предназначен для регулирования угла наклона закрылок и предкрылка в целях повышения эффективности устройств. С помощью нейронной сети можно управлять механизированными системами беспилотного летательного аппарата и ветроэнергетических установок. Искусственный интеллект в перспективе может улучшить использование беспилотных летательных аппаратов в различных областях

Ключевые слова

Механизация, беспилотные летательные аппараты, ветроэнергетические установки, автоматическое управление, нейросети

Поступила 19.02.2024
Принята 31.05.2024
© Автор(ы), 2025

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 23-11-20016)

Введение. В настоящий момент в мире преобладают тенденции автоматизации, цифровизации и интеллектуализации технических и технологических решений, открывающие возможности для совершенствования технологических процессов в самолетостроении и ветроэнергетике, однако для их реализации в России сделано немного [1]. Кроме необходимости автоматизации, ветроэнергетические установки (ВЭУ) имеют следующие недостатки.

1. Отсутствие самостоятельного запуска ротора или запуск на повышенных скоростях ветра [2]. Самозапуск ротора возможен только для режима высокого значения коэффициента заполнения ротора (например, с широкой хордой лопасти), что приводит к невозможности разгона ротора до оптимальных значений быстроходности для остальных режимов работы. Низкое значение коэффициента заполнения ротора означает необходимость в предварительном разгоне посредством использования генератора в двигательном режиме после каждого безветренного промежутка времени. Это в значительной степени усложняет систему.

2. Относительно низкий средний коэффициент использования энергии ветра C_p возникает в связи с тем, что профиль лопасти ротора проектируется для определенной скорости ветра и быстроходности. Например, в данный момент максимальное значение C_p для вертикально-осевых ВЭУ составляет 0,33 [3]. Горизонтально-осевые ВЭУ имеют более высокое среднее значение $C_p \approx 0,40$ благодаря быстроходности и наличию изменяемого установочного угла лопасти (питч-угла), и, как следствие, возможности аэродинамического регулирования ветроколеса. Однако горизонтально-осевые ВЭУ работают максимально до скорости приземного ветра при буре 25...28 м/с и далее подлежат торможению с прекращением работы до снижения скорости ветра, таким образом, при сильных ветрах установка электроэнергию не вырабатывает. Поскольку зависимость вырабатываемой мощности от скорости ветра является кубической, недовыработка электроэнергии является значительной. Как следствие, коэффициент использования установленной мощности также будет низким.

3. Наличие вибраций и шумов вследствие срыва потока [4]. Срыв потока происходит при невозможности воздушной струи прилипнуть к поверхности лопасти при больших значениях угла атаки из-за проявления высоких градиентов давлений. Эта системная проблема является критичной для ветропарков, поскольку в процессе работы парка при появлении вибраций наступает эрозия почвы, что является недопустимым во многих густонаселенных географических локациях.

4. Пониженный уровень безопасности. Большинство ВЭУ малой мощности не имеют систем принудительного торможения. При достижении значения быстроходности 3–5 уменьшается влияние срыва потока, из-за чего происходит неконтролируемый разгон установки до аварийных скоростей (до значения быстроходности 11–12), что в совокупности с порывами ветра зачастую приводит к разрушению ВЭУ с разлетом крупных обломков на большие расстояния.

С аэродинамической точки зрения недостатки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) схожи с недостатками ВЭУ.

1. Повышенное потребление топлива при взлете. При взлете БПЛА, имеющие крыло с большим утолщением, расходуют больше топлива/заряда, чем имеющие крыло с малым утолщением, из-за разности лобовых сопротивлений крыла. Отметим, что большая хорда в процессе парения позволяет уменьшить расход, а малая хорда приведет к большему потреблению топлива/заряда [5]. Соответственно, разработчик закладывает либо среднюю хорду, либо большую, теряя автоматически КПД аппарата при взлете.

2. При аварийном или боевом маневрировании БПЛА большая или средняя хорды могут быть тормозящими факторами и причиной падения или уничтожения аппарата.

3. В большинстве режимов БПЛА работает с переменным срывом потока, что увеличивает расход топлива/заряда. Это также является системной распространенной проблемой для всех маневренных летательных аппаратов.

Цель настоящей работы — формирование теоретического решения системной технической и технологической проблемы недостаточной эффективности БПЛА и ВЭУ.

Рассмотрим некоторые понятия аэродинамики, являющиеся ключевыми для дальнейшего разбора теории работы БПЛА и ВЭУ.

Основные понятия аэродинамики. Сила сопротивления обусловлена взаимодействием тела с частицами газа/жидкости, в которых тело движется, а также трением частиц с поверхностью тела и направлена по потоку. Формула определения силы сопротивления выведена Ньютоном, но не учитывает формы самого тела. С развитием аэродинамики введен поправочный коэффициент, полученный экспериментально или аналитически. Таким образом, формула для определения силы сопротивления имеет вид

$$X_a = C_{X_a} \frac{\rho V^2}{2} S,$$

где C_{X_a} — аэродинамический коэффициент силы сопротивления; ρ — плотность газа/жидкости; V — скорость течения или скорость тела; S — характерная площадь тела. При расчете крыла конечного размаха следует учитывать индуктивное сопротивление, обусловленное наличием схода потока.

Подъемная сила направлена перпендикулярно потоку и возникает вследствие несимметричного обтекания тела (с различной скоростью обтекания вдоль противоположных поверхностей), в результате возникает градиент давления. Формулу для определения подъемной силы можно записать так:

$$Y_a = C_{Y_a} \frac{\rho V^2}{2} S,$$

где C_{Y_a} — аэродинамический коэффициент подъемной силы.

Полная аэродинамическая сила — векторная сумма сил, действующих на тело, движущееся в газе/жидкости.

Пограничный слой (ПС) — поверхностный слой воздушного пространства, окружающего тело. Толщина слоя определяется расстоянием от стенки, где скорость потока равна скорости практически невязкого течения. Различают ламинарный и турбулентный ПС (рис. 1). Ламинарное течение возможно при малых скоростях обтекания и отсутствии шероховатости стенки. На практике используемые скорости достаточно велики, а поверхности не идеальны, поэтому ламинарный ПС быстро переходит в турбулентный.

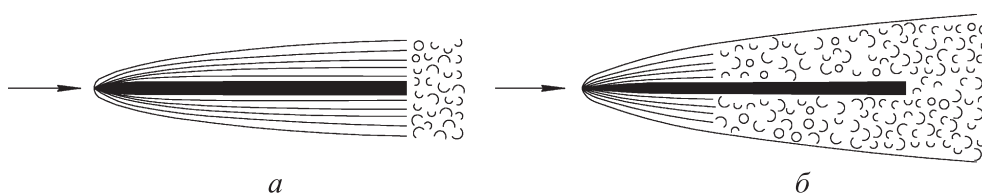


Рис. 1. Ламинарный (а) и турбулентный (б) ПС при обтекании плоской пластины и разных числах Рейнольдса

Угол атаки — угол между проекцией скорости БПЛА на плоскость OXY связанной системы координат и продольной осью OX .

Установочный угол — угол между хордой лопасти ротора ВЭУ и касательной к траектории движения или между центральной хордой крыла и базовой линией фюзеляжа БПЛА.

Срыв потока — явление резкого уменьшения подъемной силы при увеличении угла атаки вследствие невозможности движения пристеночного потока вдоль поверхности из-за возникновения неблагоприятного градиента давления.

Обзор существующих типов механизации, принцип их действия и эффект применения. Для большинства современных аэродинамических профилей критический угол атаки (при котором начинается срыв потока) находится в диапазоне $15...20^\circ$ [6]. Малый диапазон летных углов приводит к ограниченным возможностям в управлении и устойчивости при маневрах БПЛА и снижению производительности ВЭУ при отклонении от номинальной скорости ветра.

Механизация крыла/лопасти — совокупность устройств, позволяющих изменять аэродинамические характеристики. Впервые механизация крыла для улучшения летных характеристик предложена Чаплыгиным: крыло было выполнено с щелью в хвостовой части [7]. Эффект от применения механизации заключался в увеличении критического угла атаки и динамическом изменении аэродинамических характеристик. Механизацию крыла различают по месту ее применения — на хвостовой части крыла или передней кромке.

Работа хвостовой механизации заключается в отклонении проходящего потока вниз под определенным углом, вследствие чего создается дополнительная подъемная сила. Кроме того, возрастает и сила сопротивления, что увеличивает расход топлива. Современные конструктивные решения приводят к уменьшению сопротивления, например, путем создания щелей между сегментами закрылка, что позволяет потоку, проходящему через них, вносить кинетическую энергию в пограничный слой верхней части крыла и стабилизировать неблагоприятные градиенты давления, приводящие к срыву потока.

В настоящее время существуют следующие типы хвостовой механизации (рис. 2).

1. Закрылок с хордой $(0,1-0,4)c$ (c — хорда лопасти), отклоняемый до 45° (рис. 2, а); увеличивается кривизна профиля и набегающий поток отклоняется вниз; эффект от применения — увеличение в 1,2–1,5 раза подъемной силы крыла.

2. Щиток с хордой $(0,1-0,4)c$, отклоняемый до 45° (рис. 2, б); изменяется кривизна профиля с сохранением безотрывного обтекания верхней поверхности профиля; увеличивается лобовое сопротивление вследствие

разряжения в хвостовой части; эффект от применения — увеличение в 1,65–1,75 раза подъемной силы крыла.

3. Поддув ПС воздуха (рис. 2, в); вносится дополнительная кинетическая энергия в зону образования отрыва, благодаря чему происходит стабилизация распределения давления вдоль стенки и выравнивание потока; эффект от применения — увеличение в 3–4 раза подъемной силы.

4. Отсос ПС воздуха (рис. 2, г) с верхней плоскости крыла; выравниваются градиенты давления.

5. Закрылок со сдувом ПС воздуха (рис. 2, д); улучшается обычный закрылок и не увеличиваются силы сопротивления; эффект от применения — увеличение в 2–3 раза подъемной силы.

6. Щелевой закрылок со сдувом ПС воздуха (рис. 2, е), отклоняемый до 45°; сдув ПС обеспечивается набегающим потоком с нижней плоскости через щель; среднее значение размера хорды составляет 0,3с, эффект от применения — увеличение в 1,5–1,6 раза подъемной силы.

7. Щиток со скользящей осью (рис. 2, ж), отклоняемый до 45°; среднее значение размера хорды составляет 0,3с, эффект от применения — увеличение в 1,75–2,85 раза подъемной силы.

8. Выдвижной закрылок Фаулера (рис. 2, з); средний размер хорды составляет 0,3с, эффект от применения — увеличение в 2,15–2,25 раза подъемной силы.

9. Двухщелевой выдвижной закрылок (рис. 2, и); механизация технически сложная; обеспечивается более равномерное движение потока через щели от нижней плоскости к верхней; эффект от применения — увеличение в 2,4–2,5 раза подъемной силы.

10. Трехщелевой закрылок (рис. 2, к); механизация технически сложная; эффект от применения — увеличение в 3–4 раза подъемной силы.

Как правило, механизацию задней кромки не используют без механизации передней, поскольку задней кромкой создается пикирующий момент [8]. При управлении механизацией сначала срабатывает механизация передней кромки для стабилизации, после чего выдвигается задняя, что способствует компенсации усилия.

Механизация передней кромки крыла заключается в изменении кривизны профиля либо создании щели в передней части крыла, благодаря которой происходит движение потока от нижней плоскости крыла с высоким давлением в область верхней плоскости низкого давления, таким образом увеличивается критический угол атаки.

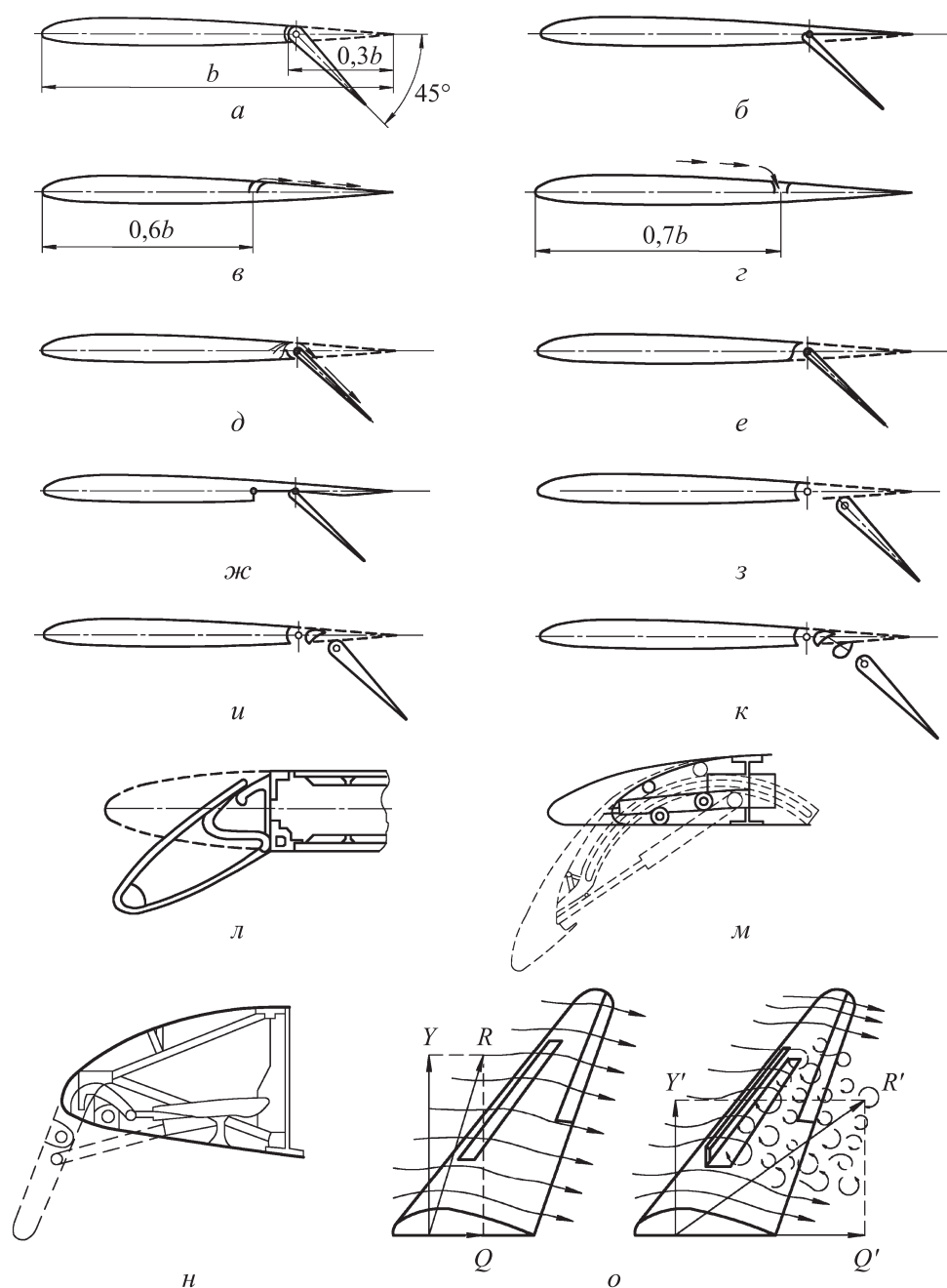


Рис. 2. Закрылок (а), отклоняемый щиток (б), профиль с поддувом (в), профиль с отсосом (г), закрылок со сдувом ПС (д), щелевой закрылок со сдувом ПС (е), щиток со скользящей осью (ж), выдвижной закрылок Фаулера (з), двухщелевой выдвижной закрылок (и), трехщелевой закрылок (к), отклоняемый носок (л), щелевой предкрылок (м), щиток Крюгера (н), интерцептор (о)

Основные используемые механизации:

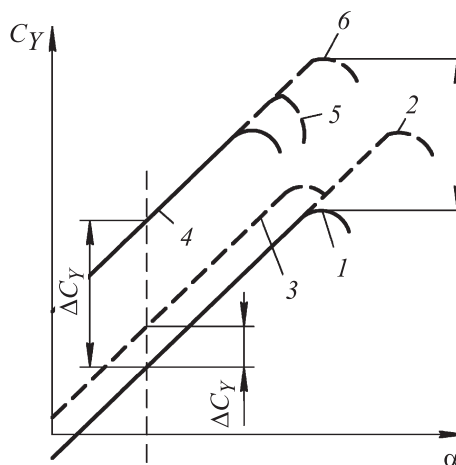
- отклоняемый носок (рис. 2, л); применяется для профилей с малой толщиной крыла ввиду компактности механизмов; создается искривление профиля по потоку; такая механизация менее эффективна, чем следующая;
- щелевой предкрылок (рис. 2, м); сохраняются прилипание ПС на больших углах атаки (до $25...30^\circ$) и подъемная сила; создается дополнительная подъемная сила;
- щиток Крюгера (рис. 2, н); повышается критический угол атаки; такая механизация конструктивно простая, но с несколько худшими характеристиками [9].

Механизация поверхности крыла заключается также в размещении интерцепторов (спойлеров), предназначенных для резкого увеличения сопротивления крыла путем создания обширной отрывной зоны [10]. Интерцептор представляет собой узкую пластину с механизмом подъема, закрепленную на верхней поверхности крыла (рис. 2, о).

Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки для различных конфигураций крыла [11, 12] приведена на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла атаки для различных конфигураций крыла:

- 1 — обычная; 2 — с предкрылком;
3 — с щитком; 4 — с двухщелевым
закрылком; 5 — с двухщелевым закрылком и предкрылком Крюгера;
6 — с двухщелевым закрылком и щелевым предкрылком



Вид аэродинамической характеристики зависит от типа и размеров механизации, параметров крыла (толщины, кривизны и др.), угла отклонения механизации, форм щели и вырезов.

Теория полета БПЛА с механизацией. Взлет БПЛА. Взлет происходит, когда подъемная сила больше массы БПЛА, а сила тяги больше силы сопротивления. Взлет может выполняться силой тяги и с помощью различных средств — трамплинов, катапультирования [13] в три этапа: 1) разбег и отрыв; 2) набор скорости; 3) подъем на высоту. Взлетная масса летательного аппарата состоит из массы топлива и нагрузки и имеет

максимальное значение. С применением современных схем механизации для БПЛА можно достичь уменьшения пробега по взлетно-посадочной полосе и экономии топлива.

Горизонтальный полет БПЛА. При выходе на высоту перехода БПЛА выполняет крейсерский полет, на этом этапе важно снижать силу сопротивления и поддерживать равенство подъемной силы и силы тяжести аппарата, что возможно при сохранении малого угла атаки, максимальном аэродинамическом качестве крыла и убранной механизации. Профили с малой толщиной крыла также являются предпочтительными, поскольку имеют наименьшее сопротивление на крейсерских углах атаки.

Для горизонтального полета необходимо поддерживать определенную скорость, чтобы крыло развивало достаточную подъемную силу, равную силе тяжести самолета. Такая скорость определяется как

$$V_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{2mg}{C_{Y\rho S}}}.$$

Таким образом, на требуемую скорость оказывают влияние коэффициент подъемной силы, удельная нагрузка и плотность воздуха, зависящая от высоты полета.

Посадка. Этап посадки включает в себя планирование и выравнивание, выдерживание для погашения скорости и приземление с пробегом, характеризуется преднамеренным снижением подъемной силы и увеличением силы сопротивления. При посадке используются интерцепторы, закрылки и щитки в посадочном положении.



Рис. 4. Вертикально-осевая ВЭУ с ротором типа «Н-Дарье»

Теория работы ВЭУ. Рассмотрим теорию работы вертикально-осевой ВЭУ с ротором типа «Н-Дарье» (рис. 4), с описанием всех режимов: самозапуск, номинальный режим (выход на рабочую (оптимальную) быстроходность), поддержание оптимальной быстроходности, аварийное торможение [14].

Самозапуск ВЭУ. В случае когда вращающий момент, создаваемый лопастями, больше момента сопротивления, состоящего из момента трения в подшипнике и электромагнитного момента генератора, происходит самозапуск ВЭУ. Рассмотрим распределение сил ротора в статичной позиции (рис. 5) [15].

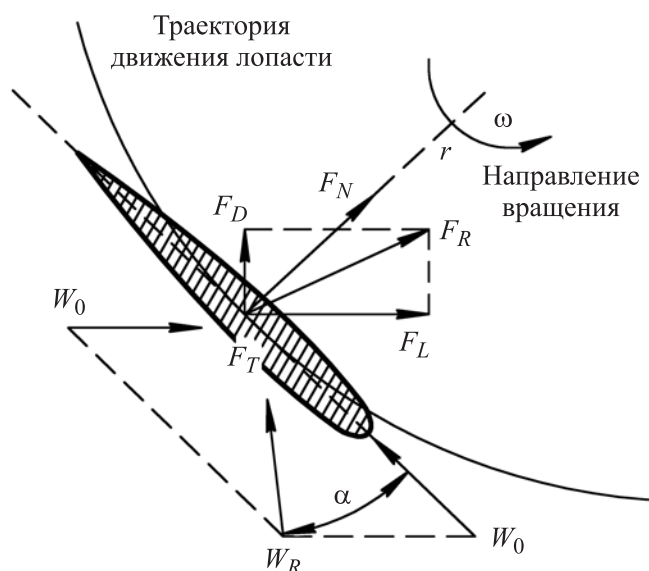


Рис. 5. Схема скоростей потока и сил, действующих на лопасть ВЭУ

В процессе движения по круговой траектории результирующая сила меняет свое значение и знак, что в ряде случаев приводит к невыполнению условия самозапуска. При использовании классической схемы ВЭУ по типу «Н-Дарье» для улучшения самозапуска увеличивают коэффициент заполнения ротора

$$\sigma = \frac{cn}{D},$$

где n — число лопастей; D — диаметр ротора.

Подобная практика негативно влияет на выработку электроэнергии связи с ухудшенными характеристиками при номинальном режиме работы.

Номинальный режим. С ростом скорости вращения уменьшается местный угол атаки α лопасти, постепенно приближаясь к колебанию в пределах угла с наивысшим аэродинамическим качеством. При таком режиме установка вращается на оптимальной быстроходности ($\lambda_{\text{опт}}$) и имеет максимальный коэффициент использования энергии.

Поддержание оптимальной быстроходности. Такой режим работы ВЭУ осуществляется путем изменения момента сопротивления посредством электромагнитного момента генератора, т. е. нагрузки, либо с помощью тормозов, отсутствующих в малых установках.

При разгоне возможен процесс саморегулирования установки, поскольку с увеличением быстроходности уменьшается вращающий момент.

При этом возможна остановка ВЭУ при снижении скорости ветра или чрезмерном повышении нагрузки.

Аварийное торможение ВЭУ. Зачастую при усилении ветра форма кривой быстроходности изменяется в связи с изменением числа Рейнольдса,

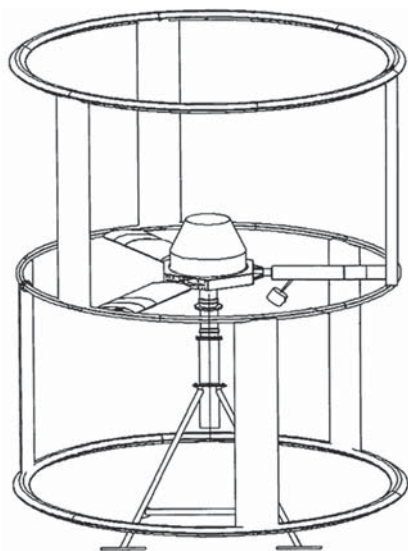


Рис. 6. Аэродинамические тормоза ВЭУ-3, расположенные на распорках между лопастями и мачтой [16]

и ВЭУ способна разогнаться до больших значений λ , что приводит к аварийным ситуациям. В таких случаях используются специальные тормоза, встроенные в сочленение оси и генератора, либо аэродинамические тормоза, расположенные на распорках между лопастями и мачтой (рис. 6).

Рассмотренные устройства торможения эффективны лишь в узком диапазоне скоростей вращения и не обеспечивают хороших характеристик управления.

Общие аэродинамические принципы. В соответствии с рассмотренной теорией можно отождествить следующие этапы работы БПЛА и ВЭУ: взлет БПЛА с запуском ВЭУ, полет на крейсерской скорости с номинальной работой ВЭУ, маневрирование БПЛА с поддержанием

постоянной скорости вращения ВЭУ; посадка БПЛА с торможением ВЭУ. Рассмотрим действие механизации на соответствующие этапы с выделением общих аэродинамических принципов.

Как отмечено ранее, взлет БПЛА сопровождается отклонением механизации для повышения подъемной силы крыла. Схожее действие необходимо и для запуска ВЭУ. Поток, проходящий через ротор, должен передавать максимально возможную долю кинетической энергии.

Установки с большим коэффициентом заполнения могут самозапускаться и имеют лучшие разгонные характеристики. С увеличением хорды крыла увеличивается коэффициент заполнения ротора:

$$\delta = \frac{nc}{D}.$$

Среди недостатков высокого коэффициента заполнения можно отметить использование ВЭУ на низкой быстроходности, что неприемлемо для

современных генераторов [17]. За счет выдвижного закрылка можно увеличить на 30 % площадь крыла, что значительно улучшит характеристики ВЭУ вследствие возможности старта на меньших скоростях и дальнейшего быстрого выхода на номинальную быстроходность при сворачивании механизации.

Следующий этап — номинальная работа/крейсерский полет. На этом этапе важно обеспечить минимальное профильное сопротивление крыла/лопасти. Для БПЛА это означает полное сворачивание механизации, что подходит и для управления ВЭУ на номинальных оборотах, так как изменение угла атаки лопасти находится в диапазоне углов, не превышающих критические значения. При этом для БПЛА и ВЭУ уменьшение площади крыла/лопасти и толщины аэродинамического профиля до минимально возможных значений для обеспечения нагрузки играет позитивную роль в уменьшении сопротивления трения.

Маневрирование БПЛА сопровождается отклонением органов управления. Современные виды механизации крыла позволяют помимо улучшения взлетно-посадочных характеристик улучшать устойчивость и маневренность БПЛА. Общим для БПЛА и ВЭУ в данном случае является возможность изменения аэродинамики каждого крыла/лопасти. Благодаря такому управлению при известном направлении ветра можно выставлять благоприятные углы отклонения механизации и улучшать самозапуск ротора ВЭУ, а также стабилизировать скорости вращения.

Посадка/торможение ВЭУ сопровождается необходимостью увеличения силы сопротивления и уменьшения подъемной силы. Основным органом механизации, ответственным за следующее действие, является интерцептор (спойлер). Применение данного устройства оказывает одинаковый эффект как при посадке БПЛА, так и при торможении ВЭУ для предотвращения аварийных ситуаций при сильном ветре [18–20].

Заключение. Приведено описание теории полета БПЛА с механизацией крыла, включающее в себя поэтапное описание всех режимов (взлет, крейсерский полет и парение, маневрирование (курсовое), посадка). Выявлены типовые режимы полета БПЛА, при которых должно выполняться стандартное управление, и режимы (взлет, посадка, парение), на которых необходимо применять механизацию крыла для увеличения дальности полета (и/или уменьшения потребления топлива/заряда).

По аналогии с БПЛА приведено описание теории работы ВЭУ на всех режимах. Определены режимы, требующие применения механизации (самостоятельный старт, выход на необходимую быстроходность, притормаживание на скорости ветра больше номинальной, аварийное торможение).

В результате теоретического исследования выявлены возможность применения механизации крыла для БПЛА и приложение данной технологии в сфере возобновляемой энергетики для ВЭУ. Общие аэродинамические принципы работы БПЛА и ВЭУ позволили наметить несколько предварительных методов управления механизацией для улучшения показателей на некоторых режимах работы, что можно использовать как кейсы для обучения нейросети:

- взлет БПЛА/запуск ВЭУ однозначно должен сопровождаться отклонением механизации на определенный оптимальный угол, увеличением площади крыла/лопасти и критического угла атаки;
- управление на крейсерской скорости/номинальных оборотах не требует механизации;
- маневрирование БПЛА/стабилизация ВЭУ является сложным случаем и должно быть отработано нейросетевым подходом в зависимости от изменяющихся параметров скорости движения и набегающего потока;
- посадка БПЛА/торможение ВЭУ является случаем управления, который требует обеспечить отклонения механизации для создания максимального сопротивления и минимальной подъемной силы.

Используя нейросети можно управлять крылом БПЛА. Искусственный интеллект также помогает развивать применение БПЛА, например, в картографии, для слежения за труднодоступными объектами промышленности, в сфере безопасности и других видах деятельности, что обеспечивает сохранность большого числа человеческих и финансовых ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Турлакова С.С. Информационно-коммуникационные технологии развития «умных» производств. *Экономика промышленности*, 2019, № 1 (85), с. 101–122. EDN: GMXFBM. DOI: <https://doi.org/10.15407/econindustry2019.01.101>
- [2] Du L., Ingram G., Dominy R.G. A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J Mech. Eng. Sc. I*, 2019, vol. 233, no. 23-24, pp. 7590–7616. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219885962>
- [3] Paraschivoiu I., Ammar S., Saeed F. VAWT versus HAWT: a comparative performance study of 2–6 MW rated capacity turbines. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, 2018, vol. 42, no. 4, pp. 393–403. DOI: <https://doi.org/10.1139/tcsme-2017-0137>
- [4] Wang Y., Lu W., Dai K., et al. Dynamic study of a rooftop vertical axis wind turbine tower based on an automated vibration data processing algorithm. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 11, art. 3135. DOI: <https://doi.org/10.3390/en1113135>
- [5] Muller J. Reducing fuel consumption by aerofoil optimization. *JOJ Mater. Sc.*, 2021, vol. 6, no. 4, art. 555692. DOI: <https://doi.org/10.19080/JOJMS.2021.06.555692>

- [6] Sheldahl R.E., Klimas P.S. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. New York, Sandia National Laboratories, 1981.
- [7] Фомин В.М., Меламед Б.М. Выдающийся механик XX века (К 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина). *Теплофизика и аэромеханика*, 2019, т. 26, № 2, с. 167–174. EDN: WBDVAN
- [8] Михайлов Ю.С. Повышение эффективности механизации стреловидного крыла. *Научный вестник МГТУ ГА*, 2020, т. 23, № 6, с. 101–120. EDN: HVKNNDM. DOI: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120>
- [9] Курилов В.Б. Исследования по увеличению несущих свойств ламинарного крыла со щитком Крюгера. *Вестник МАИ*, 2023, т. 30, № 2, с. 17–23. EDN: PKFXDP
- [10] Редькина К.В., Фролов В.А. Подъемная сила аэродинамического профиля с интерцептором. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва*, 2012, № 5-1 (36), с. 38–42. EDN: RTGNVD
- [11] Де Соза С.-Л.-М. Способ и устройство для защиты максимальной подъемной силы воздушного судна. Патент РФ 2731194. Заявл. 11.11.2016, опубл. 31.08.2020.
- [12] Максимов А.К. Косвенный метод определения аэродинамических углов: угла атаки и угла скольжения. *Труды МАИ*, 2015, № 84, с. 10. EDN: VDEARJ
- [13] Тарануха В.П., Петрушин С.А., Печёнкин А.Ю. и др. Об одном способе создания катапульт летательных аппаратов. *Вестник СГАУ им. академика С.П. Королёва*, 2014, № 2 (44), с. 125–128. EDN: SMMMMDH
- [14] Матвеев О.В. Комплексная программно-математическая модель ветроэнергетической установки. *Альтернативная энергетика и экология*, 2010, № 5 (85), с. 64–70. EDN: NEEDZF
- [15] Буяльский В.И. Автоматизированная система управления ветроэнергетической установкой на базе оценки скорости ветра и мощности потребляемой электроэнергии. Дис. ... канд. техн. наук. Севастополь, СевГУ, 2019. EDN: MMGMKU
- [16] Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Соломин Е.Е. Результаты испытаний и эксплуатации вертикально-осевых ветроэнергетических установок. *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*, 2015, № 15, с. 70–83. EDN: SKDAJK
- [17] Захаров А.И., Чижма С.Н. Моделирование системы управления ветровой энергетической установкой малой мощности. *Материаловедение. Сер. Энергетика*, 2020, т. 26, № 4, с. 36–50. EDN: VBRPJH. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26403>
- [18] Moiseev I.A., Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I., et al. Improvement of the control system for the wing performance of an unmanned aerial vehicle. *Russ. Aeronaut.*, 2023, vol. 66, no. 3, pp. 485–492. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799823030091>
- [19] Osintsev K.V., Karelin A., Isaev V. Control of a neural network for the operation of small aircraft for agricultural purposes. *E3S Web Conf.*, 2024, vol. 474, art. 02018. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447402018>

[20] Osintsev K.V., Mamazhonov A., Sobol'kin S. Wind farms in agro industry: stabilization of turbine blade operation during wind gusts. *E3S Web Conf.*, 2024, vol. 474, art. 03021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447403021>

Рявкин Глеб Николаевич — инженер-исследователь управления научной и инновационной деятельности ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (Российская Федерация, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76).

Антипин Дмитрий Сергеевич — инженер-исследователь управления научной и инновационной деятельности, аспирант, ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (Российская Федерация, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76).

Кускарбекова Сулпан Ириковна — старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (Российская Федерация, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76).

Осинцев Константин Владимирович — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» (Российская Федерация, 454080, г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рявкин Г.Н., Антипин Д.С., Кускарбекова С.И. и др. Теоретическое обоснование технологии механизации на базе беспилотных летательных аппаратов и ветроэнергетических установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 2 (153), с. 32–49. EDN: NWYOLG

**MECHANIZATION TECHNOLOGY THEORETICAL JUSTIFICATION
BASED ON THE UNMANNED AERIAL VEHICLES
AND THE WIND POWER PLANTS**

G.N. Ryavkin

D.S. Antipin

S.I. Kuskarbekova

K.V. Osintsev

amdx3@bk.ru

andimas98@gmail.com

kuskarbekovasi@susu.ru

osintcevk@susu.ru

**South Ural State University (National Research University),
Chelyabinsk, Russian Federation**

Abstract

Modern developments in the aerodynamics and computer technologies are producing a new impetus in aircraft construction and the wind energy development. An important feature in a wing of almost all the types of the unmanned aerial vehicles and blades of the wind turbines is the missing mechanization. Extensive

Keywords

*Mechanization, unmanned
aerial vehicles, wind power
turbines, automatic control,
neural networks*

experience in mechanizing the aircraft construction reveals the evident advantages of these devices as part of an aircraft. Following relevance of introducing mechanization in design and development of the unmanned aerial vehicles and wind turbines, the paper proposes description of the aerodynamics basic concepts and theoretical aspects in operation of various types of the wing mechanization, including those in the unmanned aerial vehicles of the aircraft type and the wind turbines. It identifies the general aerodynamic principles for increasing efficiency in all the modes, which could form a basis for further creating the control algorithms, including those based on the neural network approach. The neural network algorithm is designed to adjust the flap and slat inclination angles to increase the device efficiency. Using a neural network, it becomes possible to control the mechanized systems of an unmanned aerial vehicle or a wind turbine. Artificial intelligence could potentially improve introduction of the unmanned aerial vehicles in various areas

Received 19.02.2024

Accepted 31.05.2024

© Author(s), 2025

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 23-11-20016)

REFERENCES

- [1] Turlakova S.S. Information and communication technologies for the development of “smart” industries. *Ekonomika promyshlennosti* [Economy of Industry], 2019, no. 1 (85), pp. 101–122 (in Russ.). EDN: GMXFBM.
DOI: <https://doi.org/10.15407/econindustry2019.01.101>
- [2] Du L., Ingram G., Dominy R.G. A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proc. Inst. Mech. Eng. C J Mech. Eng. Sc. I*, 2019, vol. 233, no. 23-24, pp. 7590–7616. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219885962>
- [3] Paraschivoiu I., Ammar S., Saeed F. VAWT versus HAWT: a comparative performance study of 2–6 MW rated capacity turbines. *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, 2018, vol. 42, no. 4, pp. 393–403. DOI: <https://doi.org/10.1139/tcsme-2017-0137>
- [4] Wang Y., Lu W., Dai K., et al. Dynamic study of a rooftop vertical axis wind turbine tower based on an automated vibration data processing algorithm. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 11, art. 3135. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11113135>
- [5] Muller J. Reducing fuel consumption by aerofoil optimization. *JOJ Mater. Sc.*, 2021, vol. 6, no. 4, art. 555692. DOI: <https://doi.org/10.19080/JOJMS.2021.06.555692>
- [6] Sheldahl R.E., Klimas P.S. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. New York, Sandia National Laboratories, 1981.

- [7] Fomin V.M., Melamed B.M. Outstanding mechanical engineer of the 20th century. *Thermophys. Aeromech.*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 157–163. EDN: LLPLYP.
DOI: <https://doi.org/10.1134/S086986431902001X>
- [8] Mikhaylov Yu.S. Increase in high-lift devices efficiency of swept wing. *Nauchnyy vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2020, vol. 23, no. 6, pp. 101–120 (in Russ.). EDN: HVKNDM.
DOI: <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120>
- [9] Kurilov V.B. Studies on increasing the aerodynamic lift performance of a laminar wing with a Kruger flap. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2023, vol. 30, no. 2, pp. 17–23 (in Russ.). EDN: PKFXDP
- [10] Redkina K.V., Frolov V.A. Lift of the airfoil with spoiler. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva*, 2012, no. 5-1 (36), pp. 38–42 (in Russ.). EDN: RTGNVD
- [11] De Soza S.-L.-M. Sposob i ustroystvo dlya zashchity maksimalnoy pod'emnoy sily vozdushnogo sudna [Method and device for protection of maximum lift of an aircraft]. Patent RF 2731194. Appl. 11.11.2016, publ. 31.08.2020 (in Russ.).
- [12] Maksimov A.K. An indirect method of determining aerodynamic angles: an angle of attack and an angle of sideslip. *Trudy MAI*, 2015, no. 84, p. 10 (in Russ.).
EDN: VDEARJ
- [13] Taranukha V.P., Petrushin S.A., Pechenkin A.Yu., et al. One method to build flying vehicle launch catapults. *Vestnik SGAU im. akademika S.P. Koroleva*, 2014, no. 2 (44), pp. 125–128 (in Russ.). EDN: SMMMDH
- [14] Matveenko O.V. Complex programming math model of wind power unit. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [ISJAEE], 2010, no. 5 (85), pp. 64–70 (in Russ.).
EDN: NEEDZF
- [15] Buyalskiy V.I. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya vetroenergeticheskoy ustanovkoy na baze otsenki skorosti vetra i moshchnosti potrebyaemoy elektroenergii. Dis. kand. tekhn. nauk [Automated control system for wind power installation based on estimation of wind speed and power of consumed electric energy. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Sevastopol, SevGU, 2019 (in Russ.). EDN: MMGMKU
- [16] Solomin E.V., Sirotkin E.A., Solomin E.E. The results of testing and operation of vertical axis wind turbines. *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrical Engineering, Information Technology, Control Systems], 2015, no. 15, pp. 70–83 (in Russ.). EDN: SKDAJK
- [17] Zakharov A.I., Chizhma S.N. Modeling a control system for a low-power wind energy plant. *Materialovedenie. Ser. Energetika* [Materials Science. Power Engineering], 2020, vol. 26, no. 4, pp. 36–50 (in Russ.). EDN: VBRPJH.
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26403>
- [18] Moiseev I.A., Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I., et al. Improvement of the control system for the wing performance of an unmanned aerial vehicle. *Russ. Aeronaut.*, 2023, vol. 66, no. 3, pp. 485–492. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799823030091>

[19] Osintsev K.V., Karelin A., Isaev V. Control of a neural network for the operation of small aircraft for agricultural purposes. *E3S Web Conf.*, 2024, vol. 474, art. 02018.

DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447402018>

[20] Osintsev K.V., Mamazhonov A., Sobol'kin S. Wind farms in agro industry: stabilization of turbine blade operation during wind gusts. *E3S Web Conf.*, 2024, vol. 474, art. 03021. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202447403021>

Ryavkin G.N. — Research Engineer, Department of Scientific and Innovation Activities, South Ural State University (National Research University) (Lenina prospekt 76, Chelyabinsk, 454080 Russian Federation).

Antipin D.S. — Research Engineer, Department of Scientific and Innovation Activities; Post-Graduate Student, South Ural State University (National Research University) (Lenina prospekt 76, Chelyabinsk, 454080 Russian Federation).

Kuskarbekova S.I. — Senior Lecturer, Department of Industrial Thermal Power Engineering, South Ural State University (National Research University) (Lenina prospekt 76, Chelyabinsk, 454080 Russian Federation).

Osintsev K.V. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department of Industrial Thermal Power Engineering, South Ural State University (National Research University) (Lenina prospekt 76, Chelyabinsk, 454080 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ryavkin G.N., Antipin D.S., Kuskarbekova S.I., et al. Mechanization technology theoretical justification based on the unmanned aerial vehicles and the wind power plants. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 2 (153), pp. 32–49 (in Russ.). EDN: NWYOLG