

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАЛЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

М. З. Досаев, Л. А. Климина

*ФГОУ ВПО «Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова», г. Москва*

Рецензент д-р техн. наук, профессор С. И. Дворецкий

Ключевые слова и фразы: ветроэнергетическая установка; идентификация; компьютерное моделирование; математическое моделирование.

Аннотация: Представлены результаты теоретико-экспериментального исследования, связанного с математическим моделированием функционирования малых ветроэнергетических установок (ВЭУ). Изначально аэродинамический момент, действующий на лопасти ВЭУ моделируется с помощью квазистатического подхода. Электромагнитный момент, действующий на ротор генератора, предполагается линейной функцией от силы тока в цепи «генератор – потребитель». Базируясь на конечномерной математической модели ВЭУ, предложена аналитико-экспериментальная методика построения оценки аэродинамического момента, действующего на лопасти автономной ВЭУ, как функции от угловой скорости ветроприемного элемента. Результаты оценки позволяют провести численное моделирование работы ВЭУ. Методика опробована на исследовании серийной ВЭУ.

Введение

Популярность ветроэнергетических установок (ВЭУ) в мире неуклонно растет. Многие ведущие экономики мира провозгласили курс на увеличение доли электричества, вырабатываемого ветро- и гидростанциями в их энергетике. Так в Китае планируется к 2020 году довести мощность ветряных турбин до 100 ГВт, что превысит мощность всех китайских АЭС. В основном бурный рост ветроэнергетики связан со строительством так называемых ферм – комплексов больших ВЭУ мегаваттной мощности, подключенных к общей электрической сети. Тем не менее, в последние несколько лет на рынке регулярно появляются все новые производители,

Досаев Марат Закирджанович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НИИ механики, e-mail: dosayev@imec.msu.ru; Климина Любовь Александровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории навигации и управления НИИ механики, ФГОУ ВПО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва.

предлагающие малые (микро) ВЭУ, номинальной мощностью в несколько сотен ватт. Среди таких ВЭУ особое место занимают автономные устройства, способные снабжать электрической энергией непосредственно одного или нескольких потребителей. Генераторы автономных ВЭУ подключены к локальной сети, характеризующейся кусочно-постоянной нагрузкой.

В цикле работ [1 – 3] предложена замкнутая математическая модель, описывающая электромеханические процессы в системе: ветроприемный элемент – генератор – локальная сеть. Подобные конечномерные модели позволяют проводить параметрический анализ и выявлять характерные особенности исследуемых систем. В частности, с помощью данной модели для малых ВЭУ объяснен эффект гистерезиса угловой скорости вращения ротора, оценена вырабатываемая электрическая мощность, предложены критерии оценки различных ВЭУ и т.д. Для описания аэродинамического воздействия потока воздуха на лопасти ВЭУ в данной модели используется квазистатический подход. Однако нестационарность обтекания лопастей при достаточно большой угловой скорости вращения ветроприемного элемента, взаимное влияние лопастей и другие факторы ставят применение такого подхода под вопрос.

В настоящей статье представлен аналитико-экспериментальный метод, базирующийся на модели [1 – 3], позволяющий оценить зависимость аэродинамического момента, действующего на лопасти автономной ВЭУ от угловой скорости, и, в дальнейшем, использовать данную зависимость для компьютерного моделирования динамической системы, описывающей поведение автономной ВЭУ.

Качество работы ВЭУ складывается, по крайней мере, из двух составляющих: во-первых, из эффективности ветроприемного элемента, реализующего отбор механической энергии ветра; во-вторых, из эффективности генератора, преобразующего движение ротора в электрическую энергию при заданной нагрузке. Влияние первого фактора, в частности, обсуждено в [4]. В настоящей работе рассмотрены две ВЭУ с одинаковыми ветроприемными элементами и различными электрогенераторами.

Математическая модель

Аэродинамический момент, действующий на ветроприемный элемент ВЭУ с вертикальной осью вращения, зависит от угла поворота ротора. Для простоты будем рассматривать горизонтально-осевую ветроэнергетическую установку (ГОВЭУ). Пусть ветроприемный элемент (турбина) и ротор генератора ВЭУ составляют единое твердое тело T , которое может вращаться вокруг своей оси симметрии Oz (рис. 1).

С потоком воздуха взаимодействуют только лопасти турбины. На ротор действуют электромагнитные силы со стороны статора. Уравнения, описывающие динамику системы, имеют вид:

$$\begin{cases} J\dot{\omega} = M_a - cI; \\ L_e\dot{I} = c\omega - ZI, \end{cases} \quad (1)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора; I – сила тока в локальной

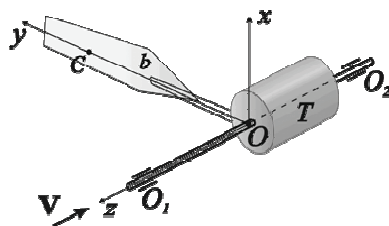


Рис. 1. Одна из лопастей и ротор ГОВЭУ

цепи; M_a – момент аэродинамических сил относительно оси Oz вращения; J – момент инерции тела T относительно оси Oz ; c – коэффициент, характеризующий преобразование механической энергии вращения в электрическую энергию, связанный с изменением магнитного потока в роторе; L_e – индуктивность генератора; Z – модуль полного электрического сопротивления цепи $Z = \sqrt{k^2\omega^2 + (R+r)^2}$; R – внешнее активное сопротивление; r – эффективное внутреннее сопротивление генератора; k – индуктивное сопротивление локальной цепи.

При описании воздействия среды на лопасть используем квазистатический подход. Пусть у турбины всего n лопастей, тогда выражение для аэродинамического момента имеет вид

$$M_a(\omega) = 0,5nbpSV_a^2(C_l(\alpha)\cos(\varphi - \alpha) - C_d(\alpha)\sin(\varphi - \alpha)),$$

где b – расстояние от оси вращения до центра давления лопасти; ρ – плотность воздуха; S – площадь лопасти; V_a – воздушная скорость центра давления лопасти; α – эффективный угол атаки; $C_l(\alpha)$ и $C_d(\alpha)$ – безразмерные коэффициенты подъемной силы и силы сопротивления, соответственно; φ – установочный угол лопасти. Будем считать $C_l(\alpha)$ и $C_d(\alpha)$ известными функциями, определенными из статических экспериментов (взятыми, например, из литературы [5, 6]). Современные ГОВЭУ обычно имеют 3 – 6 лопастей. Даже при сравнительно невысокой угловой скорости вращения ротора влияние лопастей друг на друга весьма ощутимо. Для крупных ВЭУ обычно ведется систематическая регистрация различных характеристик функционирования, в том числе и аэродинамического момента. Для малых, а тем более для микроВЭУ, такой статистики нет. Поэтому создание методики оценки аэродинамического момента, действующего на лопасти турбины микроВЭУ в зависимости от угловой скорости вращения ротора, – актуальная фундаментальная инженерная задача.

Переменные и параметры задачи связаны следующими кинематическими соотношениями:

$$\alpha = \varphi - \arctan(\omega b/V), \quad V_a^2 = V^2 + \omega^2 b^2. \quad (2)$$

Полная система, описывающая динамику ВЭУ, состоит из двух дифференциальных (1) и двух алгебраических (2) уравнений.

Стационарные режимы работы ВЭУ соответствуют неподвижным точкам динамической системы (1). Уравнение стационарных режимов работы генератора имеет вид

$$I = c\omega / \sqrt{k^2\omega^2 + (R+r)^2}. \quad (3)$$

Для малых значений индуктивного сопротивления уравнение (3) примет вид

$$\omega/I = r/c + R/c.$$

С учетом (3) уравнение стационарных режимов вращения турбины имеет вид

$$M_a(\omega) = cI = c\omega / \sqrt{k^2\omega^2 + (R+r)^2}.$$

Методика проведения экспериментов

Для оценки параметров модели проведем следующую последовательность экспериментов:

1. Зафиксируем ВЭУ в рабочей части аэродинамической трубы. Подключим ротор генератора к локальной цепи постоянного тока, позволяющей изменять внешнее сопротивление R и регистрировать силу тока I во внешней цепи и падение напряжений U на внешнем сопротивлении. Для нескольких значений скоростей потока V проведем замеры стационарных значений силы тока I и напряжения U , изменяя внешнюю нагрузку R как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

2. По результатам проведенных измерений оценим диапазон значений R наиболее целесообразный для эксплуатации данной ВЭУ (диапазон, где возможно достижение максимальной выходной мощности).

3. Проведем стендовые испытания генератора установки отдельно от турбины. Соединим ротор генератора с сервомотором, задающим определенную угловую скорость вращения. Для нескольких величин внешней нагрузки из выявленного диапазона проведем серию испытаний, регистрируя угловую скорость вращения ротора генератора и силу тока.

В соответствии с данной методикой проведены две серии экспериментов в дозвуковой аэродинамической трубе НИИ механики МГУ (параметры трубы представлены, например, в [4]). Тестировались два различных электрогенератора: генератор «1» – с относительно большим внутренним сопротивлением, генератор «2» – с маленьким внутренним сопротивлением. К генераторам поочередно подсоединяли одну и ту же шестилопастную турбину радиуса 0,55 м. Полученные экспериментальные данные оцифровывались АЦП National Instruments, и обрабатывались с помощью программы LabView. На рисунке 2 показаны зависимости вырабатываемой электрической мощности от внешней нагрузки для некоторых.

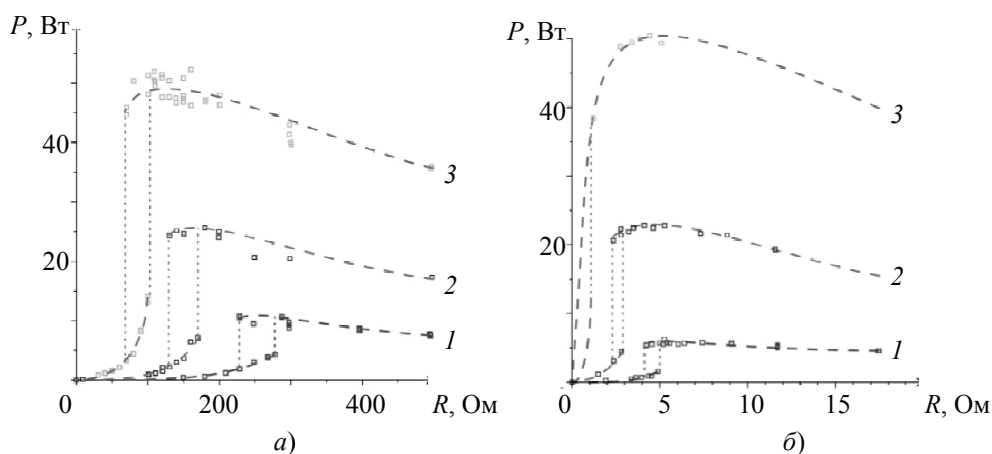


Рис. 2. Вырабатываемая мощность ВЭУ для турбины с генераторами «1» (а) и «2» (б) при различных скоростях потока, м/с:
1 – 4; 2 – 6; 3 – 8

значений скорости потока Видно, что существуют две ветви режимов: высокоэнергетическая и низкоэнергетическая. Причем, в некотором диапазоне сопротивлений (так называемой зоне гистерезиса) система может функционировать как на высокоэнергетическом режиме, так и на низкоэнергетическом, в зависимости от начальных условий. Данный экспериментальный результат соответствует теоретическим предсказаниям модели [1 – 3]. Выделим диапазоны величин внешнего сопротивления, для которых проявляется эффект гистерезиса выходной мощности. Видно, что значения внешнего сопротивления, при которых возможно достижение максимальной вырабатываемой мощности, как правило, близки к указанным интервалам гистерезиса. Вследствие этого, если ВЭУ функционирует в режиме, характеризующемся максимальной выходной мощностью, то небольшое изменение внешних условий (например, увеличение нагрузки или снижение скорости ветра) может привести к переходу системы на низкоэнергетический режим. При этом наличие гистерезиса не позволит системе при возобновлении прежних благоприятных условий вернуться в исходный режим работы. Для восстановления высоких значений мощности может потребоваться временное отключение части потребителей электроэнергии. Таким образом, для обеспечения эффективного функционирования ВЭУ целесообразно определение зоны гистерезиса и детальное исследование поведения системы в диапазоне сопротивлений, соответствующем зоне гистерезиса, а также выработка стратегии управления величиной внешнего сопротивления в окрестности диапазона гистерезиса. Все это требует наличия достаточно точной динамической модели, методики идентификации параметров модели для образца ВЭУ, а также анализа модели и использования результатов моделирования.

Идентификация параметров локальной цепи генератора

Для описания цепи генератора в модели используется 4 параметра: индуктивность генератора L_e , эффективное внутреннее сопротивление генератора r , индуктивное сопротивление локальной цепи k , коэффициент электромеханического взаимодействия c . Внешняя нагрузка R считается известной кусочно-постоянной функцией времени. Известно, что индуктивность генератора L_e является малой величиной. В данной работе будем считать ее равной нулю. Для оценки трех остальных параметров проведем серию стендовых испытаний генератора, соединенного с сервомотором.

Поставим локальную задачу: подобрать величины параметров r , k , и c таким образом, чтобы теоретические кривые удовлетворяли экспериментальным точкам в первую очередь для значений внешнего сопротивления из указанного выше диапазона (зоны гистерезиса и максимума вырабатываемой энергии). Результаты подбора параметров для двух генераторов показаны на рис. 3. В частности, значения внутреннего сопротивления r для генераторов «1» и «2» составили 45 и 1 Ом соответственно. Заметим, что индуктивное сопротивление у второго генератора оказалось настолько мало, что вполне допустимо пренебречь параметром k .

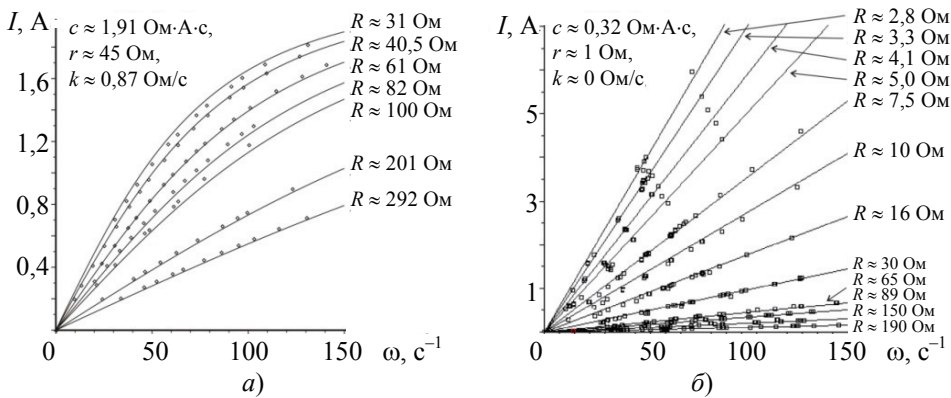


Рис. 3. Зависимость силы тока от угловой скорости ротора на стационарных режимах для турбины с генераторами «1» (а) и «2» (б)

Идентификация функции аэродинамического момента

В рамках принятой модели описания воздействия среды, зависимость аэродинамического момента от угловой скорости может быть представлена в виде

$$M_a(\omega) = V^2 f(\Omega), \quad (4)$$

где $\Omega = \omega b / V$ – безразмерная угловая скорость турбины или быстроходность.

В рамках принятой динамической модели (1) на стационарном режиме ВЭУ должно выполняться соотношение $f(\Omega) = cI / V^2$.

Построим зависимость между величинами Ω и $f(\Omega) = cI / V^2$ на стационарных режимах (рис. 4). Для наглядности показаны результаты измерений с одной скоростью ветра. Добавление экспериментальных точек для других скоростей потока не принесет принципиальной разницы.

Отметим, что режимы авторотации наблюдаются не при всех значениях Ω .

Промежутку значений Ω , в котором устойчивые стационарные режимы отсутствуют, соответствуют неустойчивые стационарные режимы. На рисунке 4 белыми квадратами обозначены экспериментальные точки, полученные при тестировании турбины на стационарных режимах с первым генератором, черными квадратами – той же турбины со вторым генератором; ромбами обозначены точки, соответствующие переходному процессу. Из полученных данных видно,

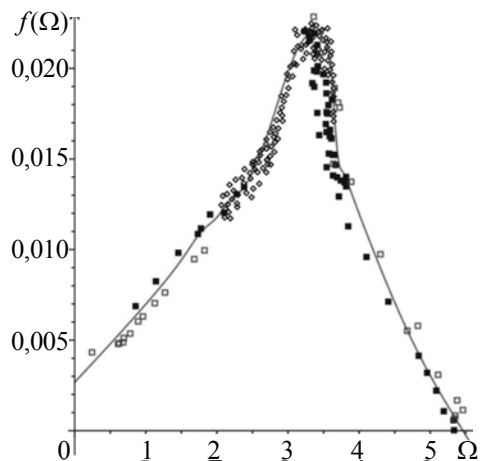


Рис. 4. Зависимость силы тока от угловой скорости ротора на стационарных и переходных режимах при $V = 6$ м/с

что идентифицированный аэродинамический момент практически не зависит от выбора генератора. Этим (для рассмотренного диапазона внешних сопротивлений и скоростей потока) подтверждается предположение модели о том, что момент, действующий на турбину, складывается из аэродинамического момента и момента, линейно зависящего от силы тока во внешней цепи.

Зададим функцию аэродинамического момента $f(\Omega)$ аппроксимирующей кривой, приближающей экспериментальные точки (серая кривая на рис. 4).

Моделирование переходного процесса

Проведем расчеты траекторий динамической системы (1) для двух различных наборов значений параметров, полученных при тестировании выбранных генераторов. В обоих случаях для функции аэродинамического момента используем выражение (4). Задавая соответствующие начальные условия, сравним расчетные графики изменения угловой скорости турбины с экспериментальными кривыми, полученными при записи переходных процессов в аэродинамической трубе. На рисунке 5 показаны экспериментальные (серые) и расчетные (черные) кривые переходных режимов ВЭУ, реализующихся при скачках внешнего сопротивления (при подключении/отключении потребителя).

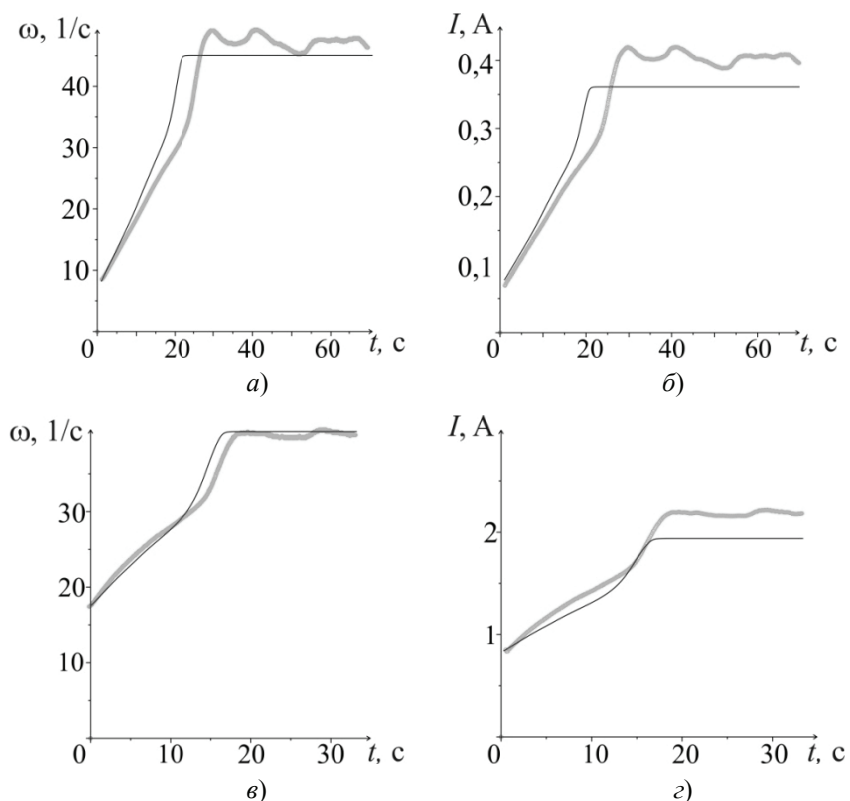


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных (серые кривые) с результатами расчета модели (черные кривые) для генераторов «1» (а, б) и «2» (в, г) для угловой скорости ротора (а, в) и сила тока (б, г)

Отметим, что отклонения расчетных кривых от экспериментальных для угловой скорости ротора не превышают 10 %, для силы тока не превышают 20 %. Большие расхождения экспериментальных и расчетных величин силы тока могут быть объяснены трудностью регистрации и оцифровки малых значений силы тока, а также погрешностями при идентификации параметров модели генератора.

Заключение

В статье предложен аналитико-экспериментальный метод оценки влияния параметров электрогенератора на эффективность работы автономной малой (микро) ветроэнергетической установки. Описана процедура оценки аэродинамического момента, действующего со стороны потока на лопасти ВЭУ в достаточно широком диапазоне скоростей ветра. Приведены результаты численного моделирования переходных режимов ВЭУ. Предложенный подход позволяет проведение качественного и численного анализа работы ВЭУ.

Список литературы

1. Конструктивная теория МВЭУ : в 2 ч. / М. З. Досаев [и др.]. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2007. – 2 ч.
2. Об одной особенности функционирования мини-ветроэлектростанций / М. З. Досаев [и др.] // Вестн. МЭИ. – 2007. – № 1. – С. 147 – 151.
3. Качественный анализ стационарных режимов малых ветровых электростанций / М. З. Досаев [и др.] // Приклад. математика и механика. – 2009. – Т. 73, № 3. – С. 368 – 374.
4. Досаев, М. З. Конечномерные замкнутые модели малых ветроэнергетических установок. Теория и эксперимент / М. З. Досаев, Л. А. Климина // Вестн. СГТУ. – 2012. – № 1(64), вып. 2. – С. 102 – 109.
5. Кашафутдинов, С. Т. Атлас аэродинамических характеристик крыловых профилей / С. Т. Кашафутдинов, В. Н. Лушин. – Новосибирск : Сиб. НИИ авиации, 1994. – 74 с.
6. Табачников, В. Г. Стационарные характеристики крыльев на малых скоростях во всем диапазоне углов атаки / В. Г. Табачников // Тр. ЦАГИ. – 1974. – Вып. 1621. – С. 79 – 93.

References

1. Dosaev M.Z., Kobrin A.I., Lokshin B.Ya., Samsonov V.A., Selyutskii Yu.D. *Konstruktivnaya teoriya MVEU* (Constructive theory MVEU), Moscow: Moscow University Press, 2007.
2. Dosaev M.Z., Kobrin A.I., Selyutskii Yu.D., Lu Wen-Lung, Lin Ching-Huei. *Vestnik MEI*, 2007, no.1, pp. 147-151.
3. Dosaev M.Z., Lin Ching-Huei, Lu Wen-Lung, Samsonov V.A. Selyutskii Yu. D. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, vol. 73, issue 3, pp. 259-263.
4. Dosaev M.Z., Klimina L.A. *Vestnik SGTU*, 2012, no.1(64), issue 2, pp.102-109.
5. Kashafutdinov S.T., Lushin V.N. *Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik krylovykh profilei* (Atlas aerodynamic characteristics of wing profiles), Novosibirsk: Sibirskii nauchno-issledovatel'skii institut aviatsii, 1994, 74 p.
6. Tabachnikov V.G. *Trudy TsAGI*, 1974, issue 1621, pp. 79-93.

Method of Investigation of Generator Parameters Influence on the Efficiency of Small Wind Turbines

M. Z. Dosaev, L. A. Klimina

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Key words and phrases: identification; mathematical modeling; numerical simulation; wind turbine.

Abstract: The results of theoretic and experimental study concerning the mathematical modeling of small wind turbine (SWT) were presented. Aerodynamic torque acting upon blades of turbine was modeled by quasi-static approach. The electrical torque acting upon the rotor was assumed as a linear function of current in circuit “generator-consumer”. Basing on the finite-dimensional mathematical model of SWT we proposed an analytical and experimental technique to measure the aerodynamic torque as a function of the propeller angular speed. The results of measurements allowed performing a numerical simulation of SWT work. The technique was verified on a mass-produced SWT.

© М. З. Досаев, Л. А. Климина, 2014

Статья поступила в редакцию 02.11.2014 г.