

УДК 621.548
Шифр специальности ВАК 2.4.5.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДИФFUЗОРНЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Статья посвящена исследованию ветрогенераторов с диффузорным концентратором и методам численного моделирования. Рассматриваются современные подходы к расчету аэродинамических характеристик диффузорного концентратора, направленные на повышение эффективности и уменьшение габаритов ветрогенераторов по сравнению с классическими конструкциями. Особое внимание уделено формированию модельного семейства диффузорных ветрогенераторов, построению расчетных сеток и заданию граничных условий при решении задач вычислительной гидродинамики (CFD, англ. Computational Fluid Dynamics). Полученные результаты позволяют оценить перспективы применения диффузорных ветрогенераторов. Статья представляет интерес для инженеров-конструкторов, исследователей и студентов энергетического профиля.

АВТОРЫ:
А.А. Лебедев, к. т. н., доцент,
ORCID ID 0000-0001-9474-9001,
laa7777@mail.ru,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого»,
Санкт-Петербург, Россия
Р.А. Лебедев, МОБУ «Муринская
СОШ №3», Мурино, Ленинградская
область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#ветрогенераторы; #численное
моделирование; #аэродинамика;
#лопасти турбины

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Лебедев А.А., Лебедев Р.А.
Оптимизация конструкции
диффузорных ветрогенераторов
с целью повышения их
эффективности // Энергия единой
сети. 2026. № 2 (81). С. 32–37.

©©



Рис. 1. Прототип «летающей» ветряной турбины S1500, разработанной пекинским стартапом Saw Energy Technology



Источник: <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/en/info/1038/3497.htm>

ВВЕДЕНИЕ

Переход к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) сегодня входит в число перспективных задач. На эффективность ветрогенераторов влияет: геометрия лопастей, определяющая аэродинамические свойства и скорости вращения ротора, характеристики погодных условий, которые постоянно изменяются, и др. [1]. В современном мире ключевая роль отводится численному моделированию, которое является основой для совершенствования конструкций ветроэнергетических установок [2].

Настоящее исследование посвящено численному моделированию ветроэнергетических установок, оснащенных диффузорным концентратором в виде кольцевого крылового профиля или кольцевого крылового диффузора [3,4]. Идея конструкции не нова: исследователи неоднократно стремились повысить мощность ветроустановок, применяя диффузорные обтекатели-концентраторы. Однако такие конструкции обладали существенными недостатками: их отличала значительная масса и большие габариты, что требовало использования массивных и дорогостоящих опорных мачт. В качестве альтернативы рассматривалось изготовление подобных ветроустановок из легких композитных материалов, обладающих высокой прочностью. Однако такое технологическое решение неизбежно влечет за собой существенное удорожание конструкции. Параллельно рассматривались проекты «летающих» аэростатных ветроустановок. В частности, в Синьцзяне (запад Китая) был успешно запущен прототип «летающей» ветротурбины S1500 номинальной мощностью 1,5 МВт, которая на сегодняшний день считается самой мощной в мире [5]. Прототип такой ветротурбины показан на рисунке 1.

Эта установка предназначена для генерирования электроэнергии в отдаленных или труднодоступных населенных пунктах, где линии электропередачи проходят через горные, болотистые, лесные районы. Преимущество аэростатного ветрогенератора — возможность спуска на землю при штормовом ветре, т. к. рабочая скорость для большинства таких устройств ограничивается величиной 25 м/с [6]. Традиционные стационарные ветрогенераторы устанавливаются на поверхности земли, тогда как в проекте S1500 предлагается схема с гелиевой оболочкой для подъема на высоту без строительства мачт. Скорость ветра возрастает с высотой, поэтому чем выше ветрогенератор находится над уровнем земли, тем больше будет выработка электроэнергии: мощность пропорциональна третьей степени скорости ветра. До появления S1500 наибольшей высоты подъема достигла американская компания Altaeros Energies, поднявшая ветрогенератор мощностью 30 кВт на высоту около 300 м. Ее конструкция представляет собой аэростат кольцевой формы с ветрогенератором внутри; центральная гондола отсутствует, в отличие от проекта S1500. Обе рассмотренные конструкции относятся к диффузорным ветрогенераторам [7].

Принцип действия диффузорного генератора можно описать принципом Бернулли. С учетом открытого диффузора у потока воздуха, попавшего в расширяющийся канал, увеличивается давление. При этом давление на выходе будет больше давления вне канала, за счет

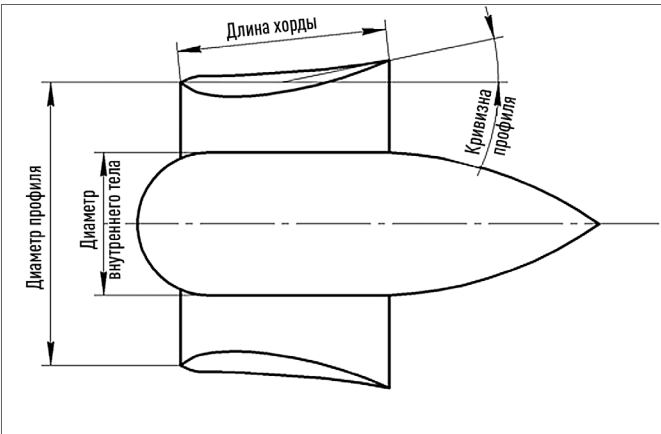


Рис. 2. Параметризованная модель ветрогенератора с кольцевым крыловым диффузором

чего и происходит увеличение скорости воздуха. По конструкции диффузорный усилитель представляет собой усеченный конус. Данные устройства не только фокусируют кинетическую энергию воздушных потоков, но и функционируют в качестве аэростатических элементов, обеспечивающих подъем силового агрегата и электрогенерирующих модулей установки.

Представленное исследование посвящено выбору геометрии кольцевого диффузора и конфигурации внутренней гондолы, направленной на увеличение скорости в зоне минимального проходного сечения [1]. Рассматривается стационарно установленная модель при стандартных условиях на поверхности земли.

РАЗРАБОТКА ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА

В качестве профиля для кольцевого крылового диффузора был выбран профиль NACA 4415 [8]. Выбор обусловлен доступностью данных о геометрических размерах, а также преимуществами профиля — в частности, способностью создавать значительную подъемную силу даже при нулевом угле атаки. Поскольку основная задача была сугубо прикладной для анализа различных форм кольцевых крыловых диффузоров, другие типы профилей не рассматривались.

СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

После выбора профиля были построены трехмерные параметризованные модели, состоящие из кольцевого крылового диффузора и внутреннего обтекателя (базовая модель показана на рис. 2). Геометрические размеры моделей приведены в таблице 1.

Создание трехмерной геометрической модели, в основе которой лежит аэродинамический профиль NACA 4415, осуществляется в системе автоматизированного проектирования (САПР) PTC Pro/Engineer Wildfire.

Таблица 1. Размеры моделей ветрогенератора

Семейство	Название модели	Диаметр профиля, мм	Диаметр внутреннего тела, мм	Кривизна профиля, градус
	Длина хорды, мм			
LD07	500,750,1000,1250,1500	2000	700	0,5
LD	500,750,1000,1250,1500	2000	1000	0,5
LD15	500,750,1000,1500	2000	1500	0,5
KR	500,750,1000,1250,1500	2000	1000	0,2
KR1	500,750,1000	2000	1000	1,0
AT95	750,1000	2000	1000	0,1
AT100	750,1000,1250,1500	2000	1000	0,15
ATL95	750,1000,1250	2000	1500	0,1

Примечание. Название модели состоит из семейства и длины хорды (например, для семейства AT100 и хорды 1250 мм — модель AT1001250). Семейства различаются диаметром внутреннего тела и кривизной профиля.

В модели можно изменять геометрические размеры, диаметры внутреннего обтекателя, длину хорды, что позволяет получать семейство моделей. Диаметр кольцевого крылового диффузора на входе сохранялся постоянным для обеспечения корректности сравнения результатов расчетов. После генерации семейства моделей они были экспортированы в программу SolidWorks Flow Simulation.

Для каждой модели в программе расчетов были заданы начальные условия: скорость воздушного потока по координате x — 10 м/с, область для сетки вокруг модели перед моделью — 5 м, за моделью — 15 м, в стороны от модели — по 3 м. Такие большие отступы по краям области расчетов от модели диаметром на входе 2 м объясняются краевыми эффектами при обтекании модели и свободным обдувом модели вокруг. Относительно большая область перед моделью на входе необходима, чтобы поток мог «перестроиться» перед моделью. Область за моделью требуется для качественного разрешения вихрей и отрывов как в кольцевом крыловом диффузоре, так и на внутреннем обтекателе. Предварительные расчеты показали, что короткая область за моделью ухудшает качество картин течения, на которых имелись отрывы. Сетка для расчетов строилась автоматически, количество ячеек в моделях было от 1,2 до 1,8 млн. Поскольку ставилась практическая задача оценки характеристик модели, вопросы качества сеток, сеточной независимости (влияния количества ячеек на точность решения) и выбора моделей турбулентности не рассматривались. Данные вопросы являются самостоятельными научно-исследовательскими проектами и требуют экспериментальной проверки в аэродинамических трубах с визуализацией. Так как скорости потока невелики (10 м/с), а модель рассматривалась без динамической части — турбинного колеса, результаты продувок можно считать приемлемыми.

ВЫЧИСЛЕНИЯ И ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате CFD-расчетов были получены массивы данных полей скорости, полного и статического давле-

ния, полной и статической температуры. На всех представленных изображениях полей скоростей масштаб цветовой палитры одинаков: минимальной скорости (от 0 до 1,5 м/с) соответствует фиолетовый цвет, максимальной (от 13,5 до 15 м/с) — темно-красный; шаг шкалы — 1,5 м/с. Для семейств моделей AT100 и AT95, по которым было выполнено шесть расчетов с варьированием длины хорды кольцевого крылового диффузора, получены следующие картины течения. Для AT100750 (рис. 3.1) характерны достаточно хорошее ускорение потока в горле, более устойчивая зона высокой скорости и небольшой отрыв потока в диффузоре на выходе. Для модели AT1001500 (рис. 3.2) отрыв потока начинается очень рано, вследствие чего скорость падает. Картины течения для моделей AT95750, AT951000 и AT951250 аналогичны полученным для моделей семейства AT100. Основным вывод из серии расчетов: увеличение длины кольцевого крыла существенно повышает отношение площади на выходе диффузора к площади в узком сечении, что приводит к отрыву потока и не способствует увеличению скорости в горле. Для моделей ATL95750, ATL951000 и ATL951250 с увеличенным до 1500 мм диаметром внутреннего тела удалось выполнить расчет только для модели ATL95750. Остальные расчеты не сходились из-за интенсивного отрыва потока и образования вихрей.

В следующей серии расчетов для семейств моделей KR и KR1, в геометрии которых варьировались длина хорды кольцевого крылового диффузора и кривизна профиля, были получены картины течения для восьми моделей. Результаты представлены для крайних значений длины хорды — минимального (500 мм) и максимального (1500 мм): KR500 (рис. 4.1) и KR1500 (рис. 4.2). Для них характерны достаточно хорошее ускорение потока в горле, отрыв потока на выходной кромке диффузора и ускорение потока на наружной поверхности кольцевого крылового диффузора. Для остальных моделей семейства KR (KR750 и KR1000) и для моделей семейства KR1 (KR1500, KR1750, KR11000, KR1250, KR1500) картины течения имеют аналогичный вид. Основной вывод: слабое раскрытие диффузора не способствует увеличению скорости и мощности.

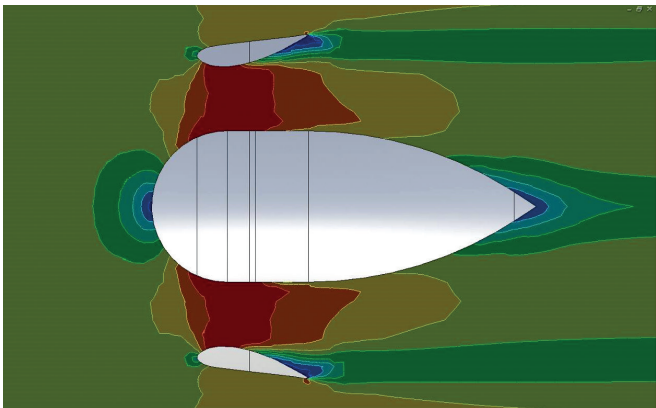


Рис. 3. 1. Поле скоростей в модели концентратора AT100750 в горизонтальной плоскости

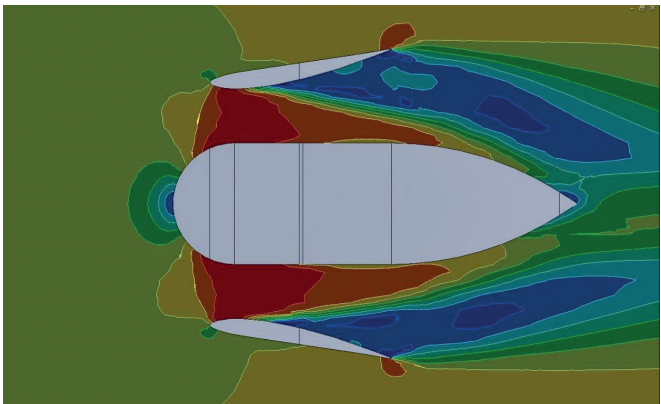


Рис. 3. 2. Поле скоростей в модели концентратора AT1001500 в горизонтальной плоскости

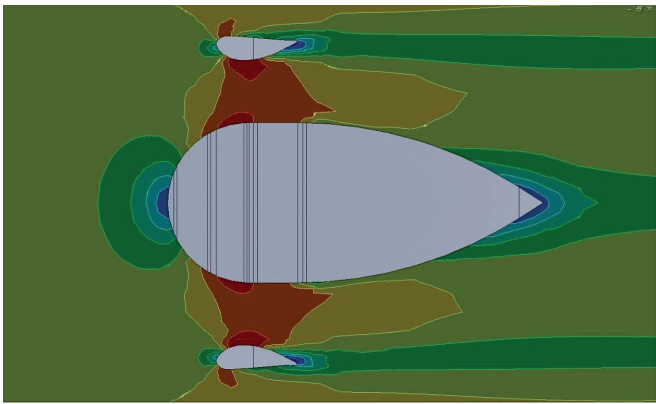


Рис. 4. 1. Поле скоростей в модели концентратора KR500 в горизонтальной плоскости

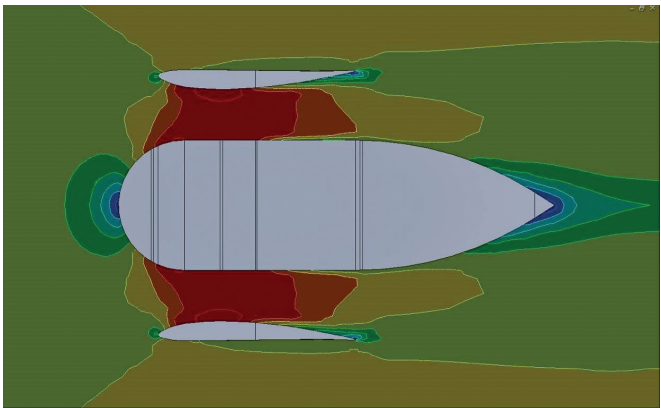


Рис. 4. 2. Поле скоростей в модели концентратора KR1500 в горизонтальной плоскости

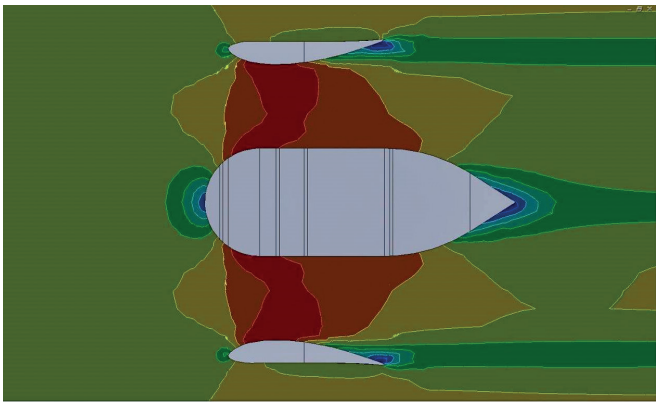


Рис. 5. 1. Поле скоростей в модели концентратора LD071000 в горизонтальной плоскости

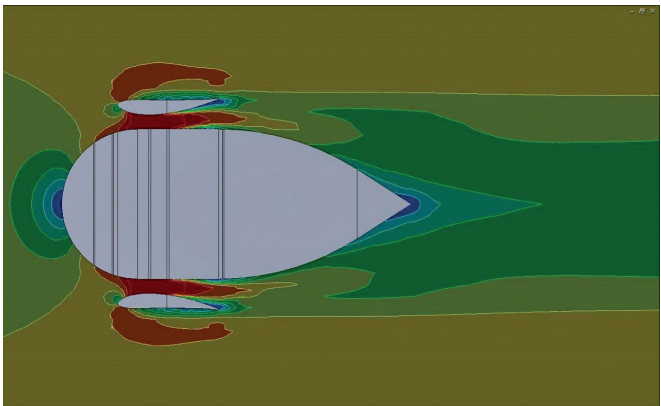


Рис. 5. 2. Поле скоростей в модели концентратора LD151000 в горизонтальной плоскости

Таблица 2. Сводные характеристики моделей ветрогенератора

Название модели						Диапазон средней скорости в горле, м/с	Расчетная мощность (в зависимости от длины хорды), Вт				
Семейство	Длина хорды, мм										
LD07	500	750	1000	1250	1500	13–15,5	567	523	430	275	160
LD	500	750	1000	1250	1500	13,74–14,94	602	659	672	619	594
LD15	500	750	1000	–	1500	15,49	395	198	452	–	405
KR	500	750	1000	1250	1500	13,40–14,96	581	599	607	524	516
KR1	500	750	1000	–	–	14,21–14,8	724	744	751	–	–
AT95		750	1000	–	–	14,23–14,29	–	600	713	–	–
AT100		750	1000	1250	1500	14,65–15,5	–	760	691	743	682
ATL95		750	*	*	–	15,63	–	425	–	–	–

* Решение не сходится.

Дальнейшие расчеты были проведены с целью оценки влияния размеров внутреннего обтекателя (750 мм, 1000 мм, 1500 мм) на характеристики модели. На базе семейств моделей LD07, LD и LD15 варьировались длина хорды кольцевого крылового диффузора и диаметр внутреннего обтекателя. Всего было смоделировано течение для четырнадцати моделей. Приводятся картины течения для двух крайних вариантов: LD071000 (рис. 5.1) и LD151000 (рис. 5.2). Сравнение полей скорости показывает, что большой внутренний обтекатель сильно сужает канал, а меньший обтекатель не способствует ускорению потока в горле. Для остальных моделей картины течения имеют аналогичный характер. Основной вывод: отношение внутреннего и внешнего обтекателей, равное 1:2, является оптимальным по результатам полученной мощности и картинам течения.

АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенный анализ позволяет оценить характер течения в кольцевом крыловом диффузоре при упрощенной постановке — без ветротурбины внутри конструкции. В таблице 2 приведены полученные значения расчетной мощности для 31 модели и диапазон средних скоростей. Для двух моделей решение не сошлось. Наибольшей расчетной мощностью обладает модель AT100750–760 Вт. Близкие по мощности модели имеют следующие особенности: KR11000 (751 Вт) и AT1001250 (743 Вт) отличаются более протяженным кольцевым концентратором, KR1750 (744 Вт) — меньшей средней скоростью. Расчетная мощность может принимать значения от 160 до 760 Вт, а средняя скорость в горле — от 13,1 до 17,58 м/с; для образца с максимальной мощностью она составляет 14,66 м/с.

На выбор модели могут влиять и другие требования, например устойчивость конструкции с точки зрения сохранения формы кольцевого крылового диффузора и внутреннего обтекателя при наполнении легким газом. Проработка этого требования не производилась. Извест-

но, что конструкция, заполненная газом с избыточным давлением, стремится к форме шара. Данная задача решается построением конструкции кольцевого крыла и внутреннего обтекателя из нескольких оболочек. Ключевыми переменными выступают высота полета аэростата и объем внутренних полостей кольцевого диффузора с гондолой — именно эти параметры определяют необходимую подъемную силу. Кроме того, на итоговый выбор модели влияет ряд дополнительных факторов: масса лопастей ветроколеса и электрогенератора, скорость ветрового потока и рабочая высота [9].

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ПРОТОТИПА МОДЕЛИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Выбранная модель AT100750 была изготовлена для стационарного натурного эксперимента в масштабе 1:4. Внутренний обтекатель содержал трехфазный электрогенератор переменного тока на неодимовых магнитах. Вал генератора был полым; через него проходила ось крепления направляющего аппарата и концентратора кольцевого крылового диффузора. Внутренний обтекатель был изготовлен из склеенных листов фанеры и пенопласта; кольцевой крыловой диффузор напечатан на 3D-принтере из гипса и пропитан эпоксидным клеем.

Ветрогенератор был испытан тремя способами: методом обдува, методом буксировки на багажнике автомобиля с различными скоростями и в двухметровой аэродинамической трубе Санкт-Петербургского политехнического университета. В ходе испытаний фиксировались скорость потока, частота вращения ротора, напряжение и ток на одной фазе; соединение фаз — «звезда». В качестве нагрузки использовался магазин сопротивлений с тремя уровнями: 10, 23 и 37 Ом. В аэродинамической трубе была проведена визуализация потока скорости по данным термоанемометра [1]. Картина течения при натурном эксперименте подтвердила результаты, полученные расчетным путем. При изменении скоростей нагрузка находилась в положении 23 Ом [2,10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение численных методов моделирования позволило отказаться от изготовления 31 модели ветрогенератора, что сократило время разработки и, главное, снизило стоимость создания прототипа. В результате моделирования был выбран экземпляр с наибольшей мощностью, а также выявлено влияние геометрических размеров на мощность и скорость потока в горле. Для выбранной модели был изготовлен прототип ветрогенератора для стационарного натурного эксперимента в масштабе 1:4. В России диффузорные ветрогенераторы могут найти применение в малонаселенных и прибрежных регионах.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1.

Izmaylov R.A. Small wind turbine aerodynamics: old wine in new bottle / R.A. Izmaylov, S.Y. Dudnikov, A.A. Lebedev, E.N. Khoroshev, Y.S. Chumakov // The 13th ISUAAAT: proceedings, Tokyo, Japan. Tokyo, [s. n.]. ISUAAAT 13-S7.

2.

Лебедев А.А. Аудит характеристик ветрогенераторов с применением CFD моделирования на суперкомпьютере // Суперкомпьютерные дни в России 2016: труды международной конференции, Москва, 26–27 сентября 2016 г. Москва: Изд-во МГУ, 2016. С.14

3.

В ЦАГИ завершились исследования ветроэнергетических установок с диффузорными ускорителями потока // ЦАГИ: официальный сайт. URL: <https://tsagi.ru/pressroom/news/1902/> (Дата обращения: 25.03.2026).

4.

Fabrication and Experimentation of Diffuser Augmented Wind Turbine / Santoshkumar Borkar, Kanaka Muthu, Arunkumar G.L., Ashok Kumar K. // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). 2019. Vol. 8, ss. 2. URL: https://www.researchgate.net/publication/364118551_Fabrication_and_Experimentation_of_Diffuser_Augmented_Wind_Turbine (Дата обращения: 06.02.2026).

5.

В Китае прошли успешные испытания мощной воздушной ветровой установки // Tsinghua University : официальный сайт / School of Environment. URL: <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/en/info/1038/3497.htm> (Дата обращения: 12.02.2026).

6.

Yattou El Fadili, Youssef Berrada, Ismail Boumhidi. Novel control strategy for the global model of wind turbine // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2024. Vol. 14, iss. 1. P. 258–267. DOI: <http://doi.org/10.11591/ijece.v14i1.pp258-267>.

7.

Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо; пер. с англ. под ред. Я.И. Шефтера. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 272 с., ил.

8.

Хорлокк Дж. Х. Осевые турбины (газовая динамика и термодинамика) / Дж. Х. Хорлокк; [пер. с англ.]. Москва: Машиностроение, 1972. 212 с.

9.

Wind lens technology and its application to wind and water turbine and beyond / Yuji Ohya, Takashi Karasudani, Tomoyuki Nagai, Koichi Watanabe // Renewable Energy and Environmental Sustainability. 2017. Vol. 2. Art. 2. DOI: 10.1051/rees/2016022.

10.

Aerodynamics of small wind turbine: a new game on old ground / R.A Izmaylov, S.Y Dudnikov, A.A Lebedev [et al.] // SYMKOM 2011: proceedings of the international symposium, Łódź, 26–28 October 2011. Łódź, 2011. P. 140.



АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ И КОМПЕНСАТОРЫ. МОНОГРАФИЯ

СОКУР П. В.
МОСКВА; ВОЛОГДА: ИНФРА-ИНЖЕНЕРИЯ, 2025. 156 С.
ISBN 978-5-9729-2188-1

Рассмотрены устройство асинхронизированных турбогенераторов и компенсаторов, их конструктивные особенности, работа в установившихся и переходных режимах, резервные режимы работы, в том числе асинхронный режим работы без возбуждения. Представлена математическая модель асинхронизированного турбогенератора, даны рекомендации по моделированию в программном пакете MATLAB Simulink, в том числе по работе модели в режиме реального времени. В приложениях даны подробные справочные данные по эксплуатируемому и проектируемому асинхронизированным турбогенераторам и компенсаторам.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов высших учебных заведений, специалистов проектных организаций, работников электростанций и других предприятий в сфере электроэнергетики.