

С.Н. Удалов, В.З. Манусов, А.А. Ачитаев

Возможности программного комплекса «ELCUT» в
решении задач повышения регулировочной способности
подъёмной силы в режиме ограничения мощности
ветровой турбины средствами плазменной технологии

Необходимость повышения запаса регулировочной способности в режиме ограничения мощности ветроэнергетической установки, позволяет создать благоприятные условия эксплуатационной надёжности. В связи с этим, использование плазменной технологии для расширения диапазона регулирования ветроэнергетической установки с применением технологии поверхностного коронного разряда постоянным током на лопасти, имеет адекватный интерес. С учётом этого необходимо провести математическое моделирование, которое даст представление о величине диапазона регулирования в рассматриваемой модели.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, плазменный привод, подъёмная сила, ELCUT, электростатика, упругие напряжения и деформации

Альтернативная энергетика является одной из наиболее динамично развивающейся отраслью современной энергетики. Поиск и разработка новых технических средств и решений в области повышения регулировочной способности ветроэнергетических установок (ВЭУ) также быстро развивается. В работе, представленной ранее Лукутиным Б.В., Муравлевым А.И., Шандаровой Е.Б. рассмотрен вопрос перехода ветротурбины в режим ограничения мощности посредством изменения коэффициента использования энергии ветра C и числа модулей ветродвигателя Z [1]. Это связано с повышением требований, предъявляемых к установкам. Важно отметить, что необходимость

повышения регулировочной способности ВЭУ определяет его эксплуатационную надёжность. На рис. 1 изображён график, иллюстрирующий поведение подъёмной силы в условиях изменения аэродинамических свойств лопасти ВЭУ. Также, на рис. 2 приведена зависимость, при которой наблюдается отличие в запасе по регулировочной способности ВЭУ по углу атаки лопасти в сравнении основного режима с режимом повышения запаса регулирования.

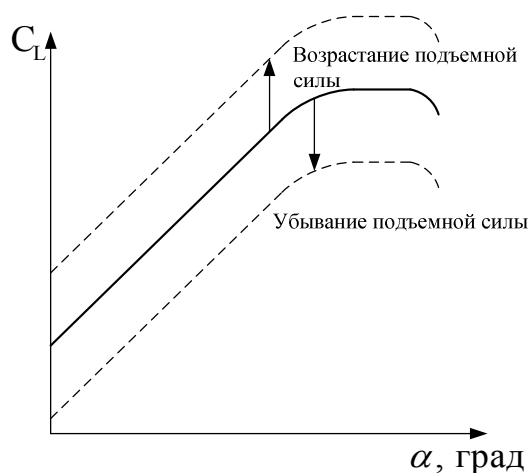


Рис. 1. График зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки в условиях изменения структуры аэродинамики лопасти

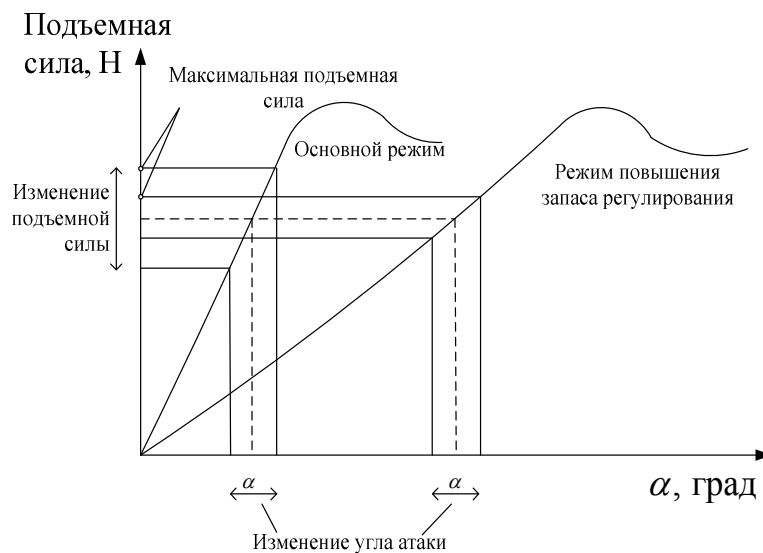


Рис. 2. График зависимости подъемной силы от угла атаки в условиях повышения регулировочной способности

Одно из технических направлений, которое имеет экспериментальное подтверждение возможности повышения регулировочной способности

турбины ВЭУ, является технология плазменного привода, основанного на применении ионизации воздуха на поверхности лопасти. Поверхностные нетермические плазменные приводы создают электрическое поле между двумя электродами, анодом и катодом. При подаче большой разницы напряжений между электродами, формируется электрическое поле и индуцируется электрический ветер или ионический ветер близко к поверхности. Электрический ветер формируется столкновением между дрейфующими ионами и нейтральными частицами в области межэлектродного пространства. Индуцированный ветер действует как массовая сила и возбуждает ближайшую среду, создавая струю с потоком массы нулевой свободы, модифицируя пограничный слой потока воздуха вдоль профиля. На сегодняшний день существует много различных конфигураций, которые классифицируются как плазменные приводы. Ниже будут рассмотрены четыре плазменных привода. Вот эти устройства: 1) поверхностный коронный разряд постоянного тока, 2) поверхностный диэлектрический барьерный разряд переменного тока, 3) скользящий разряд и 4) граничная струя. Характеристики этих устройств более детально описали Moreau, Benard, Jolibois и Touchard [2].

Рассмотрим первый вариант устройства. Привод поверхностного коронного разряда постоянного тока состоит из двух широких электродов, установленных ровно на поверхности диэлектрического профиля (рис. 3а). Когда прикладывается высокое напряжение постоянного тока ($>10\text{кВ}$), формируется корона вокруг проводника небольшого диаметра (обычно анода) и создаётся электрический ветер тангенциально к поверхности между двумя электродами. Электрический ветер способен изменить пограничный слой воздушного потока профиля. Рис. 3б демонстрирует визуализацию низкоскоростного воздушного потока вдоль плоской пластинки. Если привод выключен, дым остаётся вертикальным. Когда привод активен, поток выше анода захватывается по направлению к

поверхности от наружного слоя, вызывая притяжение дыма к поверхности и затем ускоряясь в область разряда. Преимущество этого устройства в том, что оно требует простое электроснабжение, однако дизайн ограничивается скоростью электрического ветра только несколько m/c .

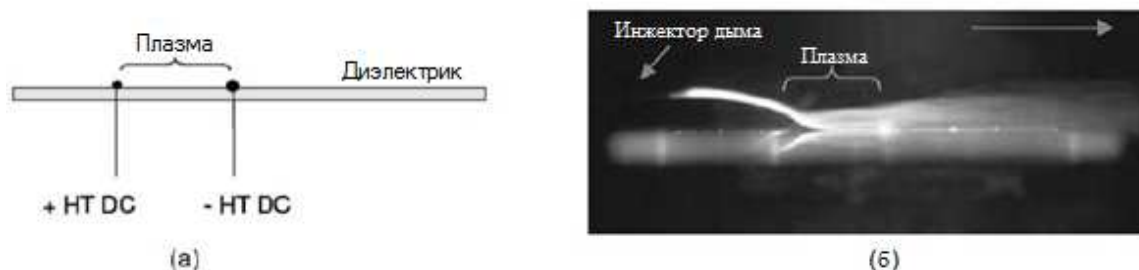


Рис. 3. а) схематическая точка зрения на привод коронного разряда постоянного тока, б) 2d визуализация управляемого воздушного потока вдоль плоской пластины

На рис. 4 показано сечение аэродинамического профиля. При обтекании профиля потоком на него действует аэродинамическая сила, которую можно разделить на две составляющие: подъёмную и силу сопротивления. Подъёмная сила действует на профиль перпендикулярно направлению скорости натекания потока v . Сила сопротивления совпадает с направлением вектора скорости натекающего потока. Эти силы обозначаются F_L и F_D соответственно. Угол между направлением скорости натекающего потока и хордой профиля, называется углом атаки α .

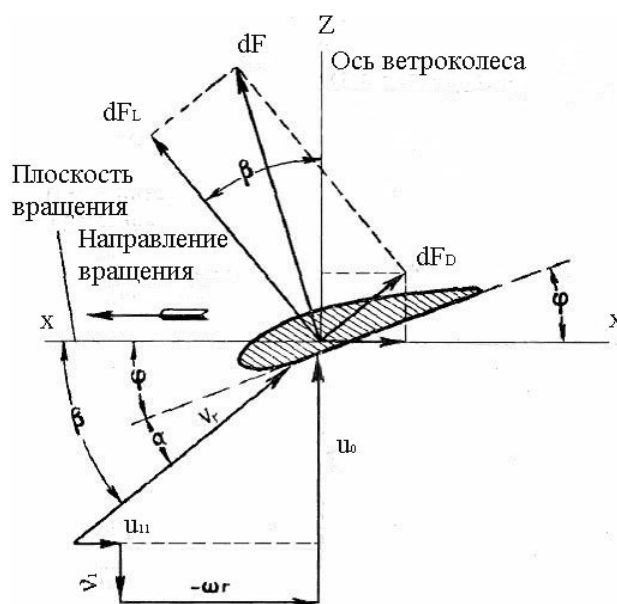


Рис. 4. Векторная диаграмма сил и скоростей воздушного потока при набегании его на элемент лопасти

Рассматриваемые давления соотносятся со значением динамического давления, поэтому можно выделить коэффициент пропорциональности C_L (коэффициент подъёмной силы) [3]:

$$p_L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха $1,223 \text{ кг/м}^3$; v – скорость ветра, м/с ; C_L – коэффициент подъёмной силы.

Средствами программного пакета «ELCUT» был представлен расчёт влияния поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопасть ВЭУ [4].

На рис. 5 изображён результат расчёта электростатического поля, по которому видна область высокой концентрации силовых линий, сосредоточенная на поверхности, вызывая коронный разряд.

Ионизированный газ создаёт дополнительное давление и в свою очередь оказывает влияние на подъёмную силу. Разница создаваемого давления между воздухом и ионизированным газом, описывается уравнением идеального газа Менделеева-Клайперона:

$$\Delta p = RT \left(\frac{\rho_1}{\mu_1} - \frac{\rho_2}{\mu_2} \right), \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, равная $8,31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$; μ_1 , μ_2 – молярные массы воздуха и озона соответственно; T – температура воздуха, $^\circ\text{K}$; ρ_1 , ρ_2 – плотности воздуха и озона соответственно, кг/м^3 .

Расчёт механических деформаций проведён в пакете «ELCUT». На рис. 6 представлен результат полевого расчёта механических деформаций, оказывающих влияние на лопасть при взаимодействии с ветропоток.

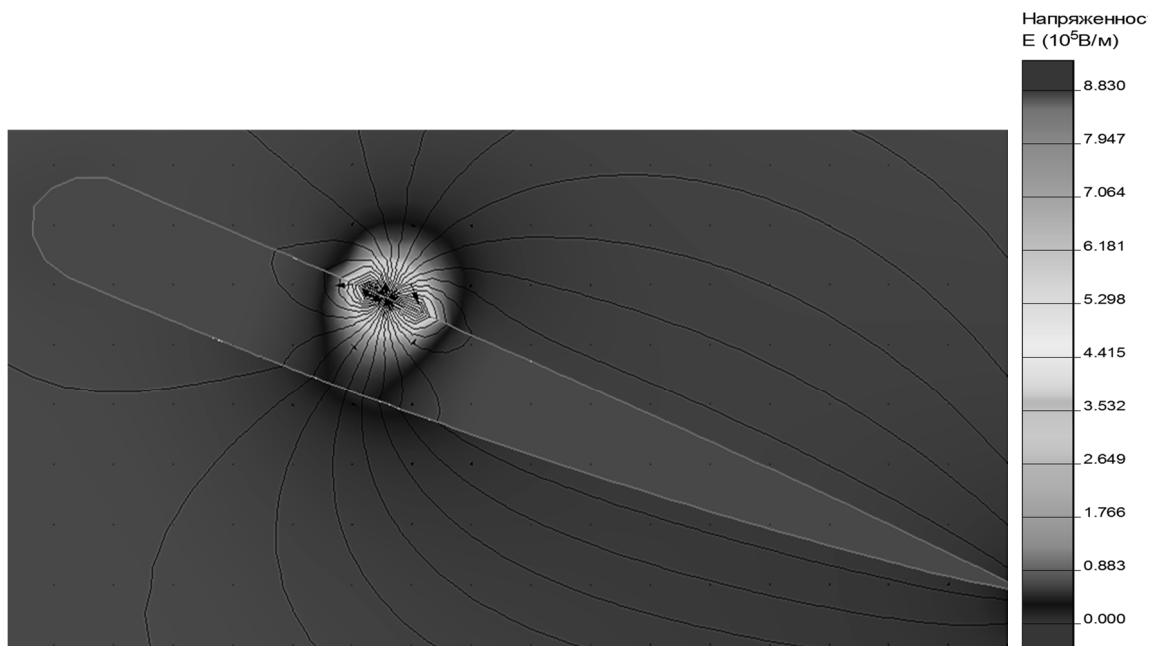


Рис. 5. Результат расчёта распределения напряжённости электрического поля по поверхности лопасти при действии поверхностного коронного разряда постоянного тока

На рис. 7 изображены результаты расчётов зависимости подъёмной силы лопасти от угла атаки, где проиллюстрирован эффект повышения регулировочной способности подъёмной силы лопасти ВЭУ при использовании поверхностного коронного разряда постоянного тока по его поверхности.

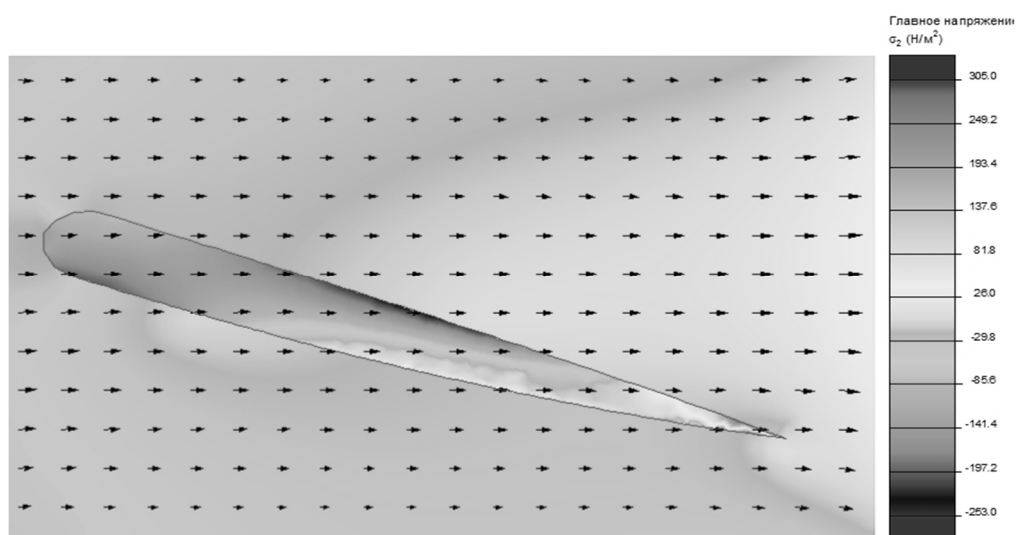


Рис. 6. Результат расчёта распределения механической напряжённости

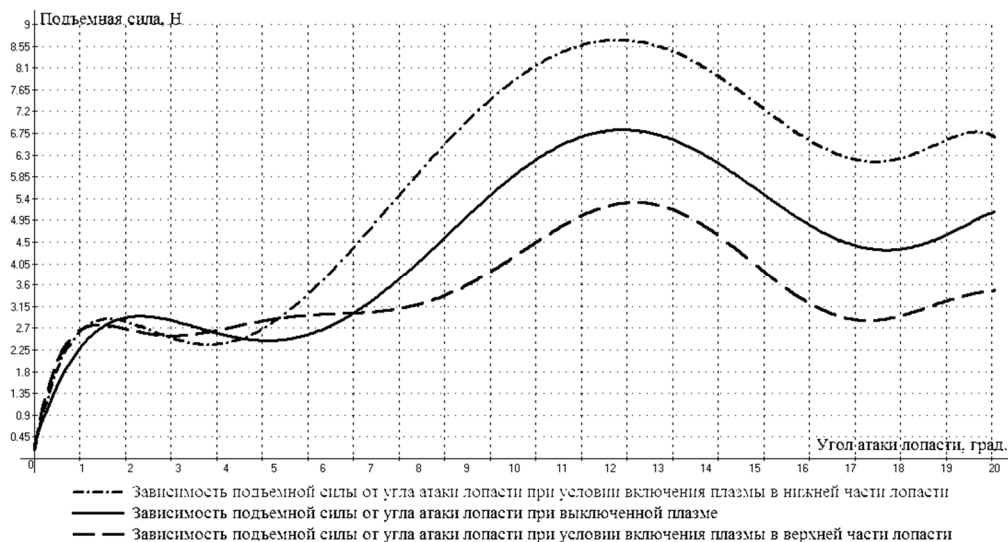


Рис. 7. Сравнительная характеристика зависимости подъемной силы лопасти ВЭУ от угла атаки

Выводы

Была создана математическая модель коронного разряда по экспериментальным исследованиям, проводимых в США. На основании математической модели по применению поверхностного коронного разряда постоянного тока на лопасти ВЭУ показано, что это позволит увеличить по сравнению с обычным вариантом, запас регулирования по изменению угла атаки, что обеспечивает надёжность функционирования ветроэнергетической установки в условиях повышенных ветровых нагрузок. При работе ВЭУ в режиме ограничения мощности, наличие плазменного привода позволит добиться не изменности угол атаки. В режиме набора мощности, технология коронного разряда позволит обеспечить выход на номинальную мощность ВЭУ за меньшее время, как показано в результатах моделирования.

Литература

1. Лукутин Б.В., Муравлев А.И., Шандарова Е.Б. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций //Известия Томского политехнического университета, 2008. - т.312 - № 4. - с.

2. Scott J. Johnson, C.P. van Dam, Dale E. Berg. Active Load Control Techniques for Wind Turbines / Sandia Corporation, a Lockheed Martin Company, report SAND2008-4809 – 2008. – P. 125-140.
3. Альдо В. да. Роза. Возобновляемые источники энергии физико-технические основы. – М.: Издательский дом «Интеллект», МЭИ, 2010. – 704 с.
4. «ELCUT». Комплекс программ моделирования двумерных физических полей с помощью метода конечных элементов. НПКС «ТОР», Санкт-Петербург, 2010 г.

Об авторах

Удалов Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета;

Манусов Вадим Зиновьевич, д-р техн. наук, профессор кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета;

Ачитаев Андрей Александрович, магистрант кафедры систем электроснабжения предприятий Новосибирского государственного технического университета.