



Некоммерческое партнерство
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ
Единой энергетической системы»

109044 г.Москва, Воронцовский пер., дом 2
Тел. (495) 912-1078, 912-5799, факс (495) 632-7285
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель Председателя
Научно-технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор

 B.V. Молодюк

«30» декабря 2015 г.

17 декабря 2015 г.

г. Москва

ПРОТОКОЛ № 4

заседания секции «Возобновляемая и нетрадиционная энергетика» НП «НТС ЕЭС» по повестке дня:

1. «Рекомендации по совершенствованию методологии оценки ветропотенциала и оптимизации характеристик ветроэнергетических установок».

Докладчик: Игнатьев С.Г. к.т.н., в.н.с. ФГУП «ЦАГИ» им. Н.Е. Жуковского

Эксперты - рецензенты: НИУ МЭИ, профессор Тягунов М.Г., технический директор Корпорации «ЕЭЭК», к.т.н. Перминов Э.М.

2. О плане работы Секции на 2016 год. Сообщение Э. М. Пермина

Присутствовали: члены секции «Возобновляемая и нетрадиционная энергетика» НП «НТС ЕЭС», сотрудники ФГУП «ЦАГИ» имени Н.Е.Жуковского, МГУ имени М.В.Ломоносова, НИЦ «Атмограф», ОАО «ГосМКБ «Радуга», НИЦ «МЭИ», ФГБУ «Российское Энергетическое Агентство», «ОАО «Передвижная Энергетика» РАО Энергетические системы Востока».

Вступительное слово: Э.М.Перминов – председатель секции, к.т.н., с.н.с.

Во вступительном слове Э.М.Перминов отметил, что во всем мире развитие возобновляемой энергетики идет ускоренными темпами. Во многих странах планируется существенно увеличить вклад ВИЭ в выработку электроэнергии. Например, XIV Конференция ВВЭА в Иерусалиме (Израиль) одобрила научно – технический доклад, в котором планируется в мире в течение XXI века достичь 100% обеспечения энергозатрат за счет возобновляемой энергетики. Активно развивающиеся технологии позволяют снижать стоимость электроэнергии, выработанной с использованием НВИЭ (новых технологий ВИЭ), что увеличивает инвестиционную привлекательность проектов развития ВИЭ. По всему миру ведётся активное строительство новых энергогенерирующих объектов на основе ВИЭ мощностью в сотни МВт. Например, в КНР, США, Англии - ВЭС мощностью 0,5 – 2, 5 ГВт, а в Марокко начато строительство солнечной электростанции мощностью 580 МВт.

В России, к сожалению, темпы развития возобновляемой энергетики не столь заметны и обнадеживающие как хотелось бы. Последние постановления

правительства по включению рыночных механизмов стимулирования развития электроэнергетики на ВИЭ оказались не эффективными и вызывают много замечаний со стороны специалистов. Свое негативное влияние на развитие возобновляемой энергетики оказали и кризисы экономической и политической ситуаций в стране и в мире. Тем не менее, необходимо продолжить продвижение вперед по всем направлениям развития энергетики НВИЭ, особенно для энергообеспечения удаленных регионов и локальных потребителей.

Среди направлений возобновляемой энергетики наиболее доступной и поэтому пользующейся особым вниманием является ветроэнергетика. Европейское сообщество к 2050 году планирует более 40% всей вырабатываемой электроэнергии получить за счет ветра. В России усилиями многих специалистов проблемы ветроэнергетики выдвигаются в число наиболее обсуждаемых проблем на многих форумах и совещаниях. В связи с этим большой интерес вызывает авторская работа С.Г. Игнатьева, включенная для обсуждение в повестку сегодняшнего заседания, являющаяся результатом его 20 – летнего труда.

С докладом «Рекомендации по совершенствованию методологии оценки ветропотенциала и оптимизации характеристик ветроэнергетических установок» на основе подготовленной к изданию монографии по данной тематике выступил автор Игнатьев С.Г. к.т.н., в.н.с. ФГУП «ЦАГИ» им. Н.Е. Жуковского (Приложение 1).

Основные положения доклада.

Первая тема книги - анализ методов оценки ветроэнергетических ресурсов и производительности ветроэнергетических установок.

В 1 и 2 главах рассмотрены методы, которые создавались с конца XIX до начала XXI века. При этом анализ осуществляется как с точки зрения метеорологии, так и с точки зрения специалистов, которые проектировали ветроэнергетические установки. В течение XX века эти методы неоднократно подвергались критике.

Причина неадекватности предложенных к настоящему времени методов потребностям ветроэнергетики состоит в том, что они опираются на предположение, что измеряемые на метеорологических станциях значения скорости ветра рассматриваются как случайная величина. Это предположение, с одной стороны, служит основанием для применения методов теории вероятностей и математической статистики, а с другой стороны, предопределяет неудовлетворительную с точки зрения ветроэнергетики результативность разработанных на этой основе методов.

В 3-7 главах монографии построен новый подход к оценке энергетических свойств ветра на основе предположения, что скорость ветра является случайной функцией времени. При этом доказывается, что каждую реализацию такой случайной функции на произвольном отрезке времени можно характеризовать дополнительной функцией, аргументом которой является не время, а скорость ветра. Эта дополнительная функция обладает такими же свойствами, что и функция плотности вероятности случайной величины. Поэтому она названа тоже функцией плотности вероятности, но рассматривается как характеристика состоявшейся реализации функционального изменения скорости ветра по времени. Через эту функцию плотности вероятности определяются такие

энергетические характеристики ветра, как средняя скорость и энергия воздушной струи с заданной площадью поперечного сечения.

Проведен анализ методологии определения энергетических характеристик ветра, которая используется в Западной Европе при ветромониторинге. Показано, что применяемая в ней процедура осреднения ежесекундных измерений скорости ветра на 10-минутный интервал приводит к занижению на 15-20% величины ветроэнергетического потенциала местности.

На основе нового взгляда на скорость ветра предложена новая методология обработки данных метеорологических станций. В результате выясняется, что на циклических промежутках времени с повторяющимися условиями (например, годовое время или время одноименного месяца в течение многих лет) такие числовые характеристики функционального изменения скорости ветра по времени как средняя скорость и энергия воздушной струи являются случайными величинами. При этом случайная величина «энергия воздушной струи», которая является источником энергии для ветроэнергетической установки и определяет её производительность, характеризуется очень большим и несимметричным разбросом относительно среднего многолетнего значения. Так, отклонения годового значения ветроэнергетического потенциала от среднего многолетнего могут быть более чем вдвое меньше, и более чем вдвое больше его среднего многолетнего значения. Таким образом, исходные данные для процесса проектирования ветроустановки и определения её оптимальных параметров содержат очень значительную случайную составляющую. Использование детерминированных алгоритмов определения оптимальных параметров проектируемой ветроустановки в этих условиях может привести к непредсказуемым результатам.

В 8 главе получена каноническая функция плотности вероятности, которая достоверно отражает важные с точки зрения проектирования ветроустановок энергетические характеристики ветра и позволяет в процессе проектирования исключить случайную составляющую первичного источника энергии.

Вторая тема книги - определение оптимальных параметров ветроэнергетической установки из условия максимальной производительности и из условия минимума себестоимости производимой ею электроэнергии. Этой теме посвящены 9 и 10 главы.

Вначале дается оценка энергетической эффективности современных рыночных ВЭУ путем сравнения с производительностью идеального ветряка, в котором при всех скоростях ветра ветроколесо работает с максимальной аэродинамической эффективностью и процесс преобразования энергии вала ветроколеса в электроэнергию характеризуется величиной КПД=1. В результате показано, что годовая производительность перспективных ВЭУ может быть увеличена в полтора-два раза по сравнению с современными рыночными ВЭУ.

Определены основные мероприятия для повышения энергетической эффективности ветроустановок. Количественно эффективность использования этих мероприятий оценивается величиной коэффициента использования ветроэнергетического потенциала. При полном использования ветроэнергетического потенциала этот коэффициент равен единице.

Дан анализ влияния характеристик системы генерирования электроэнергии, и том числе используемых генераторов, с позиций энергетической эффективности ВЭУ. Обычно генераторы проектируются как однорежимные машины, оптимизируемые на заданное значение проектной мощности. В результате анализа показано, что генератор ВЭУ должен проектироваться как многорежимная машина с заданной величиной ЕДС при минимальной рабочей скорости ветра и высоким КПД, который должен сохранять постоянное значение при изменении мощности в диапазоне от $\approx 5\%$ до 100% номинальной мощности.

В 9 главе даны методы определения оптимальных параметров ВЭУ с точки зрения максимальной их производительности. Такие методы разработаны для двух режимов работы ВЭУ.

Первый режим - работа с постоянным числом оборотов ветроколеса, который характерен при работе ВЭУ на энергосистему. При работе в этом режиме на местностях со среднегодовой скоростью ветра 4-5 м/с современные рыночные ВЭУ используют максимум 45-70% ветроэнергетического потенциала местности. С увеличением среднегодовой скорости ветра доля используемого ветроэнергетического потенциала уменьшается до 25-30%.

При втором режиме, когда ветроколесо при всех скоростях ветра работает с максимальной аэродинамической эффективностью, потенциально возможно полное использование ветроэнергетического потенциала местности. Однако для реализации этого решения необходимо многократное увеличение мощности устанавливаемого генератора.

В 10 главе даны методы определения оптимальных параметров ВЭУ с точки зрения минимальной себестоимости производимой ими электроэнергии. Для реализации этих методов, на основе анализа эмпирических данных, определены функции стоимости систем ВЭУ и ветроустановки в целом. С учетом этих функций разработаны методы определения оптимальных параметров ВЭУ для тех же двух режимов их работы. В результате решения вариационных задач установлено:

1. Для каждой среднегодовой скорости ветра существуют свои значения оптимальных параметров ветроустановки.

2. С увеличением среднегодовой скорости ветра себестоимость производимой электроэнергии стремительно уменьшается.

3. Размерность ветроустановки влияет на себестоимость производимой электроэнергии. Для ВЭУ больших размерностей ($W > 500$ кВт) себестоимость электроэнергии от ветроустановок с оптимальными параметрами изменяется незначительно. При уменьшении размерности ветроустановок до размерности, которая характерна для автономных ВЭУ, себестоимость электроэнергии стремительно возрастает.

При анализе полученных оптимальных решений установлено, что для местностей с различными значениями среднегодовой скорости ветра при весьма незначительном увеличении себестоимости электроэнергии, возможна унификация параметров ВЭУ. Эта унификация состоит в том, что ветроустановку с оптимальными параметрами для среднегодовой скорости ветра 6 м/с можно использовать на местностях с другими значениями среднегодовой скорости ветра. При этом ветроустановка с таким образом унифицированными параметрами при

среднегодовой скорости ветра меньше 6 м/с более полно (до 60-70%) использует ветроэнергетический потенциал. Такая унификация возможна для ветроустановок всех размерностей и позволяет добиться снижения их стоимости за счет повышения серийности производства.

Полученные оптимальные параметры ветроустановок соответствуют параметрам лучших современных ВЭУ, работающих на энергосистему. С целью отыскания методов дальнейшего повышения экономической и энергетической эффективности ветроустановок проведено исследование влияния функций стоимости систем ВЭУ. Установлено, что наиболее сильно на эффективность ветроустановок влияет стоимость системы генерирования электроэнергии, включающая генератор, мультиплексор и устройства подключения к энергосистеме.

Определён вид функций стоимости систем ветроустановки, которые обеспечивают независимость стоимости электроэнергии от размерности ветроустановки. Обеспечение этих параметров функций стоимости делает экономически эффективными малые ветроэнергетические установки.

В результате анализа оптимальных с точки зрения себестоимости производимой электроэнергии определены основные направления исследований, которые позволяют создать отечественные ВЭУ нового поколения, конкурентоспособные с лучшими современными и перспективными зарубежными рыночными образцами.

Для создания конкурентоспособных отечественных ветроустановок необходимо разработать новые существенно более дешевые генераторы. Эти генераторы должны иметь постоянное и высокое значение КПД в рабочем диапазоне скоростей ветра $\eta(V_\infty) = \text{const} \rightarrow 1$. Для них функция стоимости системы генерирования электроэнергии $S_W(W_p, k_W, \varepsilon_W)$ должна иметь коэффициент $\varepsilon_W \rightarrow 0$, а коэффициент k_W должен быть на порядок меньше по сравнению с его величиной, характерной для генераторов, применяемых в современных ветроустановках.

Выступление экспертов по докладу:

Тягунов М.Г. (Приложение 2).

В монографии Игнатьева С.Г. рассмотрен весьма широкий круг вопросов ветроэнергетики. В списке литературы указаны источники с 1920 по 2009 года, которые тщательно проанализированы автором и легли в основу его разработок. Монография содержит 10 глав, в которых раскрыты две крупные темы, упомянутые в докладе автора. В приложениях даны справочные материалы, помогающие пониманию и осмыслению данной работы.

В целом монография Игнатьева С.Г. представляет собой весьма интересную работу, в которой содержится интересный исторический материал, важные теоретические разработки и вытекающие из них практические рекомендации. Она выделяется из многих научных и научно-популярных работ, посвященных возобновляемым источникам энергии, прежде всего тем, что сохраняет ясность изложения самых сложных вопросов, оставляя читателю свободу принятие собственного обоснованного решения.

Всесторонний анализ позволяет рекомендовать монографию Игнатьева С.Г. к изданию для использования специалистами в области исследования и проектирования ветроэнергетических установок, а так же, в качестве учебного пособия для студентов, магистрантов и аспирантов, проходящих подготовку по

направлению использования энергии возобновляемых источников энергии.

Перминов Э.М. (Приложение 3)

Игнатьев С.Г. много лет и плодотворно занимается вопросами ветроэнергетики и представленная монография плод его 20-ти летнего труда.

Несомненно, эта работа дополняет теорию ветроустановок, и ценность подхода автора заключается в том, что он предлагает и много идей для практического приложения. Появление такой работы необходимо приветствовать и поддержать в плане его издания и обеспечения доступности для многих заинтересованных читателей.

Рустамов Н.А. зачитал рецензию Киселевой С.В. – к.ф.-м.н., в.н.с. НИЛ ВИЭ Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова горячо поддерживающей появление данной книги (Приложение 4).

Представленная работа посвящена актуальным проблемам современной ветроэнергетики.

Среди других направлений, развиваемых в представленной рукописи, стоит выделить следующие, имеющие как теоретический интерес, так и практическое применение:

1) анализ вопроса влияния случайной погрешности измерений скорости ветра на точность определения энергетических характеристик ветра;

2) предложение – на основе обобщения значительного эмпирического материала по о. Сахалину – авторской канонической функции плотности вероятности скорости ветра. Предложенная каноническая функция представляет собой новый инструмент для достоверной оценки ветроэнергетического потенциала местности и определения параметров ВЭУ;

3) введение коэффициента использования ветроэнергетического потенциала (K_{iwp}) как критерия результативности усилий по повышению производительности ВЭУ и обоснованной альтернативы широко применяемого коэффициента использования установленной мощности (K_{iwm}). С позиций введенного коэффициента рассмотрены пути повышения производительности ветроустановок, работающих в режимах $\xi(V_\infty) = \xi_{\max}$ и $\omega_{BK} = const$. Помимо того, что для каждого режима выявлены диапазоны скоростей ветра, где установки каждого типа работают с максимальной производительностью, обоснован чрезвычайно значимый, по нашему мнению, тезис: «генератор ветроэнергетической установки и используемые в ней машины преобразования энергии должны проектироваться не как однорежимные машины с высоким значением КПД, а как машины, характеристики которых являются наилучшими и неизменными в широком диапазоне изменения мощности»;

4) поиск оптимальных технических решений для ВЭУ, работающих в двух, обозначенных выше режимах ($\xi(V_\infty) = \xi_{\max}$ и $\omega_{BK} = const$) с позиций минимума себестоимости электроэнергии. Считаем, что при разработке данного вопроса чрезвычайно продуктивным оказалось введение в рассмотрение функции стоимости $S_{B\dot{E}U}$, что позволило детально рассмотреть влияние на себестоимость электроэнергии отдельных элементов ветроустановки. В результате, во первых, было проведено обоснование оптимальных расчетных скоростей ветра и, во вторых, сделан вывод об унификации параметров ветроэнергетических установках при обоих указанных режимах. Унификация позволяет определять оптимальные параметры ВЭУ на основе среднегодовой скорости ветра в данной

местности и использовать, таким образом, для снижения себестоимости производимой энергии потенциал серийности производства установок. Следует отметить особо, что в рукописи содержатся конкретные обоснованные направления дальнейшего снижения себестоимости энергии от ВЭУ.

Рукопись содержит ряд приложений. Приложения 1, 2 чрезвычайно важны и удобны как тематически связанный справочный материал (важные для понимания работы сведения о термодинамических свойствах газов, а также положения теории вероятности и математической статистики). Приложения 3, 4 включают детальный вывод тех математических результатов, которые используются в основной части работы, что позволяет, сохранив строгость изложения, не загромождать текст.

Работа чрезвычайно насыщена качественно выполненными графиками, таблицами; расчеты и оценки сделаны на основе фактических (метеорологических) данных. Отдельной высокой оценки заслуживает уровень изложения, стиль, структура работы в целом. Считаем публикацию представленной рукописи Игнатьева С.Г. чрезвычайно важной для развития теоретической и практической ветроэнергетики в России.

В обсуждении доклада приняли участие: Николаев В.Г., Рустамов Н.А., , Перминов Э.М., Тягунов М.Г., Шеин В.Я. и др.

2. С дополнительным сообщением о практике эксплуатации ветродизельной гибридной системы, построенной год тому назад на Камчатке ОАО «Передвижная энергетика» РАО «ЕС Востока» выступил Шеин В.Я.

3. С информационным сообщением о плане работы Секции на 2016 год выступил Э. М. Перминов – к.т.н., с.н.с., председатель секции «Возобновляемая и нетрадиционная энергетика»

Заслушав доклад, замечания и предложения участников дискуссии заседание секции отмечает:

1. При анализе исторического развития методов оценки энергии ветра приводится анализ терминологии, которая применяется при обработке результатов измерения скорости ветра. Приведенный анализ позволяет читателю избегать ошибок, связанных с использованием неточно определенных и неверно трактуемых понятий. Практически каждый тезис, разбор, этап анализа иллюстрирован авторскими очень показательными, выразительными и наглядными примерами.

2. Монография является чрезвычайно ценной с точки зрения образовательного процесса. Живой язык изложения делает монографию чрезвычайно интересным и привлекательным не только для специалистов, но и для студентов, молодых исследователей, которые только начинают заниматься проблемами ветроэнергетики. Монография представляет огромное подспорье для тех, кто по разным причинам не имеет доступа к первоисточникам, или не имеет времени самостоятельно разобраться с историей и логикой развития подходов к оценке энергии ветра.

Заседание секции решило:

1. Рекомендовать НП «НТС ЕЭС» оказать содействие в издании монографии ведущего сотрудника ФГУП «ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского», к.т.н. С.Г. Игнатьева «Новые методы оценки энергии ветра и оптимизации параметров ветроэнергетических установок».
2. Рекомендовать С. Г. Игнатьеву подготовить обзорную статью в отраслевой журнал о практическом значении его исследований для отечественной ветроэнергетики.

По второму вопросу:

Одобрить представленный проект план работы секции на 2016 год.

Председатель секции «Возобновляемая
и нетрадиционная энергетика»
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.



Э.М.Перминов

Ученый секретарь Научно-
технической коллегии
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

Ученый секретарь секции
«Возобновляемая и нетрадиционная
энергетика» НП «НТС ЕЭС», к.ф.-м.н.



Я.Ш.Исамухамедов



Н.А.Рустамов