

АКАДЕМИЯ НАУК УЗБЕКСКОЙ ССР  
Энергетический Институт

Аспирант В. И. КРАВЧЕНКО

Исследование влияния порывистости ветра  
на работу инерционного аккумулятора  
ветроэлектрического агрегата 1Д-18

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук.

Научный руководитель — доктор технических наук,  
профессор Е. М. ФАТЕЕВ

ТАШКЕНТ  
1954



Работа выполнена в Институте энергетики  
Академии наук Казахской ССР

72462  
ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
А. Н. Ниргизской ССР

В директивах XIX Съезда Коммунистической партии и в постановлении сентябрьского Пленума ЦК КПСС выдвинуты большие задачи в области механизации и электрификации трудоемких процессов сельскохозяйственного производства. Для осуществления этих задач должны быть привлечены все виды энергоресурсов, в том числе и неисчерпаемые запасы энергии ветра.

Во многих отдаленных пустынно-степных районах Казахстана отсутствуют другие виды энергии кроме ветровой, поэтому здесь уделяется особое внимание утилизации этого вида энергии при помощи ветродвигателей.

Однако использование энергии ветра с помощью изолированно работающих, ветроэлектрических агрегатов, до последнего времени наталкивалось на ряд препятствий. Эти препятствия связаны с нерегулярными колебаниями скорости ветра, поскольку существующие ветроэлектрические агрегаты работают в приземном слое атмосферы, т. е. в слое с наиболее развитой порывистостью.

В статье „О параллельной работе ветроэлектрической станции с мощной сетью“<sup>1)</sup> В. А. Андрианов и Д. Н. Быстрицкий сообщали, что на ветроэлектростанции часто наблюдаются изменения мощности в широком интервале. По поводу этих изменений они пишут: „Прежде всего их можно связать с непрерывной пульсацией энергии ветра“.

П. К. Путнем<sup>2)</sup> показывает, что колебания энергии, в больших пределах, наблюдаются и на ветроэлектростанции большой мощности (1250 ква). Причина—нерегулярные колебания скорости ветра. Таким образом, колебания скорости ветра за малые промежутки времени, а значит и колебания мощности ветросиловых агрегатов не позволяют с достаточной эффективностью использовать энергию ветра.

В 1948 году в ЦАГИ под руководством профессора В. П. Ветчинкина было закончено проектирование ветроэлектрического агрегата 1Д—18 с инерционным аккумулятором (впервые предложен и применен на ветроэлектрическом агрегате 1Д—10

<sup>1</sup> Журнал, Электричество. № 5, Госэнергоиздат, 1951.

<sup>2</sup> Путнем П. К. Энергия ветра. Нью-Йорк. 1948.



А. Г. Уфимцевым в 1929 году). Инерционный аккумулятор призван выравнивать энергию ветра. В том же году проект передан Казахстану для внедрения. В 1949 г. на предприятиях г. Алма-Аты был изготовлен первый опытный образец ветроэлектрического агрегата 1Д—18 и установлен на ветроэнергетической базе Института энергетики АН КазССР.

После первых пробных испытаний агрегата возникло много вопросов, в том числе:

При каких значениях порывистости ветра ветроэлектрический агрегат 1Д—18 может выдавать качественную электроэнергию (с определенной частотой и напряжением), пригодную для привода электрических машин. Поскольку основным стабилизирующим фактором энергии в указанном агрегате является инерционный аккумулятор, то важно было знать каково влияние порывистости ветра на его работу, т. е. как часто коэффициент неравномерности хода машины принимает значения большие допустимых ( $\delta = 0,2$ ) при покрытии возможных дефицитов энергии во время провалов скоростей ветра.

Что касается порывистости, то несмотря на большое количество накопившейся метеорологической литературы по механической структуре ветра, до настоящего времени нет общепринятых характеристик, которые можно было бы положить в основу конкретных ветроэнергетических расчетов.

Между тем, отсутствие общепринятых характеристик, приемов получения и обработки исходного материала по порывистости ветра, разбросанность и непригодность имеющихся данных во многих случаях отрицательным образом сказывается на развитии ветроэнергетики. Поэтому изучение свойств горизонтальной составляющей вектора скорости ветра в приземном слое атмосферы и установление значений ряда статистических характеристик порывистости в трехмерном пространстве являлось одной из основных задач проведенного исследования.

Микроструктура режима ветра рассматривалась с точки зрения теории стационарных случайных процессов. В работе рассматривались статистические характеристики, пригодные для ветроэнергетических расчетов.

Решение выдвинутых вопросов дало возможность более правильно производить выбор инерционных аккумуляторов с учетом основных—теоретически обоснованных характеристик структуры режима ветра.

Реферлируемая диссертация состоит из 6 глав. В первой главе рассматриваются некоторые теоретические положения по микроструктуре режима ветра.

Во второй—дается описание аппаратуры и методики наблюдения за структурой режима ветра.

Третья глава посвящена общим принципам анализа структуры ветра. Приводятся подробные методические указания с при-

мерами, нехождения функций распределения варьирующих величин и предлагается двумерная характеристика порывистости.

В четвертой и пятой главах излагаются основные характеристики ветроэлектрического агрегата 1Д—18, а затем выявляется влияние порывистости ветра на работу инерционного аккумулятора. Дается расчет возможных дефицитов энергии ветра для расчетной скорости ветра с учетом рабочей характеристики агрегата. Приводится функция распределения этих дефицитов и выясняется какой процент возможных дефицитов, инерционный аккумулятор может покрыть.

В заключительной части работы предлагается метод энергетического расчета инерционного аккумулятора с использованием статистических характеристик микроструктуры режима ветра. Здесь же приводятся сравнительные технико-экономические данные агрегатов с различными схемами подключения инерционного аккумулятора.

Экспериментальная часть работы проводилась на ветроэнергетической базе Института энергетики АН КазССР и Токаревской МТС в период с 1949 года по 1954 год.

1. Задача нахождения связей между средними значениями скоростей в турбулентном потоке и значениями флюктуаций, отвечающих этим средним скоростям, встречает целый ряд трудностей и до настоящего времени не решена положительно.

На первый план всегда выступают трудности, связанные с тем обстоятельством, что в системах, описывающих турбулентное движение жидкости число уравнений всегда меньше числа неизвестных. С другой стороны, невозможно произвести полное разделение поля флюктуационных скоростей и поля средних скоростей.

В 30-х годах нашего столетия Фридман и Келлер указали характеристики, определяющие структуру воздушного потока, так называемые „моменты связи“.

Однако, здесь мы наталкиваемся на трудности, связанные с „эволюцией уровня“ геофизических полей.

Если рассматривать течение воздушного потока как стационарный случайный процесс для которого функции распределения

$$F [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)] = \\ = P \{ \xi(t_1) < x_1, \xi(t_2) < x_2, \dots, \xi(t_n) < x_n \} \quad (1)$$

определяющие  $\xi(t)$ , не изменяются при любом сдвиге всей группы точек  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$  вдоль оси времени, то можно получить ряд зависимостей по микроструктуре ветра.

Физический смысл такого определения заключается в том, что фиксацию горизонтальной составляющей вектора скорости ветра необходимо осуществлять в установившемся потоке или когда остальные метеоэлементы остаются неизменными.

Для того, чтобы случайная функция  $V(t)$  была стационар-



ной, достаточно, чтобы явление, порождающее нашу величину вообще могло изменяться, но при этом—его характеристики, должны оставаться постоянными во время измерения  $V(t)$ . Это требование можно выполнить, приняв время фиксации  $V(t)$  достаточно малым.

Осреднение проводилось не по времени или пространству, как это всегда делалось, а применялся предложенный М. И. Юдиным<sup>1</sup> метод „осреднения с повторением опытов“.

Для того, чтобы получить конкретные данные для ветроэнергетических расчетов предложено разделение уровней ветрового поля, т. е. вся масса результатов наблюдения за скоростью ветра, подразделялась на средние скорости от 4 до 20 м/сек. Затем производилась статистическая обработка полученных результатов, для каждого уровня отдельно. Такое разделение можно производить только для малых промежутков времени, за которые осуществлялось измерение скоростей ветра, в противном случае мы перейдем в макро—область и средний уровень изменится.

Наиболее полная характеристика случайной стационарной величины может быть получена, если будет известна ее функция распределения. Функция распределения дает аналитическое выражение эмпирического ряда и показывает какие значения будет принимать случайная величина, какова плотность распределения и т. д.

Для того, чтобы найти функцию распределения в самом общем виде, необходимо знать статистические моменты. Обычно пользуются моментами первого и второго порядка, а при более тонких исследованиях применяются моменты до четвертого, моменты более высоких порядков, как правило, не употребляются.

В работе использовались моменты до четвертого порядка включительно.

2. Приемной частью в нашей установке служил блок датчика, скорости и направления электрического анеморумбометра (АРМЭ-1). Блок датчика устанавливался на 20-метровой цельнометаллической мачте, специально для этой цели изготовленной.

Регистрирующая часть состояла из приемной части АРМЭ-1 и из последовательно подключенного 3-х шлейфового осциллографа Сименса. Осциллограф Сименса был выбран потому, что регистрацию процесса можно было проводить на широкую фотоленту. После проявления, ее можно свободно читать и анализировать.

Время одного наблюдения было выбрано равным 20 минутам. В предположении, что ни динамические, ни погодные условия за этот период не изменятся, т. е. средний уровень ско-

<sup>1</sup> Юдин М. И.—Вопросы теории турбулентности и структуры ветра с приложением к задаче о колебаниях самолета. Гидрометеиздат. 1946.

рости ветра останется постоянным. Скорость движения ленты была равной 1,7 мм/сек. Большая скорость ленты давала слишком растянутую кривую по времени и не отражала бы характера изменения скорости ветра, а малая, могла сильно затруднить анализ и расшифровку осциллограмм.

Для питания осциллографа использовались два шестивольтовых кислотных аккумулятора. Чтобы зарядка аккумуляторов поддерживалась на высоком уровне, батарея была подключена к сети ветроэлектрического агрегата 1Д—18 через лабораторный трансформатор (ЛАТР-2) и выпрямитель переменного тока.

Для получения на осциллограмме тонкой отчетливой кривой скорости ветра в интервале от 4 до 20 м/сек был изготовлен специальный шлейф—чувствительный к слабым токам.

Отметка времени на ленте осциллограммы делалась при помощи нулевой линии. В цепь электромагнита ставился специальный часовой механизм, который замыкал цепь ровно через 5 сек.

Из описания аппаратуры в основном ясна и методика наблюдения. Она сводилась к осциллографированию скорости ветра, т. е. к получению ряда реализаций, для различных осредненных уровней стационарного случайного процесса.

3. При изучении механической структуры воздушного потока многие ученые (Робич, Пеплер, Коффлер, Пирхер, Молчанов, Бидлингмеер, Емцев), придерживались мнения о необходимости найти универсальную меру порывистости, т. е. такую одномерную характеристику, которая содержала бы в себе исчерпывающие данные по структуре такого сложного явления, как ветер.

Я. И. Шефнер исследуя работу стабилизаторного ветродвигателя, правильно отметил, что при расчете дефицитов энергии ветра необходимо учитывать глубину и длительность провалов скоростей ветра, однако для определения порывистости он предлагает одномерную характеристику.

В работе предложена двумерная характеристика порывистости в виде двух функций распределения:

1. Функции распределения глубины провалов—подъемов скоростей ветра.

2. Функции распределения длительностей подъемов—провалов скоростей ветра.

После тщательных проработок оказалось, что распределение относительных скоростей ветра для малых промежутков времени происходит по нормальному закону (для всего диапазона рабочих скоростей ветра от 4 до 20 м/сек).

Для всех указанных средних скоростей ветра были получены численные значения основных характеристик  $M_1, M_2, M_3, M_4$ —статистических моментов,  $E$  и  $K$ —коэффициентов асимметрии и эксцесса.



Распределение частот длительностей провалов—подъемов для всех рассматриваемых уровней скоростей ветра (от 4 до 20 м/сек) имеет вид:

$$F dt = \frac{N_0}{\sqrt{M_2}} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\sqrt{M_2}}} \cdot dt \quad (2)$$

где  $\Delta t$  — длительности подъемов—провалов в сек.

$M_2$  — момент второй степени.

Кривая, описываемая уравнением (2), представляет собой  $J$  —образную кривую с размахом от 0 до  $\infty$ , т. е. с увеличением средней скорости ветра увеличивается число менее длительных провалов, причем для каждой средней скорости вид распределения сохраняется (изменяются численные параметры). Такое заключение, вполне отвечает спектральному распределению вихрей в атмосфере.

Особый интерес представляло выяснение связи между средними длительностями провалов—подъемов и средними скоростями ветра за малые промежутки времени. Выяснилось, что связь между этими величинами довольно тесная и характеризуется коэффициентом корреляции, равным  $r = -0,89$ . Это говорит о том, что существует обратная зависимость, т. е. с увеличением средней скорости ветра, средняя длительность провалов—подъемов уменьшается. Корреляционная зависимость этих величин имеет вид

$$\overline{\Delta t} = 42,92 - 1,46 \bar{V} \text{ сек} \quad (3)$$

где  $\overline{\Delta t}$  — средняя длительность в сек.

$\bar{V}$  — средняя скорость в м/сек.

Связь между средней скоростью ветра  $\bar{V}$  и максимальной длительностью провалов—подъемов характеризуется коэффициентом корреляции  $r = -0,92$ , а уравнение этой связи имеет вид

$$\Delta t_{max} = 296,54 - 12,08 \bar{V} \text{ сек} \quad (4)$$

Используя уравнения (3) и (4), представилась возможность построить номограмму из выравненных точек для определения длительностей провалов скоростей ветра в зависимости от средних скоростей.

Номограмма позволяет определить  $\Delta t$  в сек провала любой обеспеченности, что сильно облегчает работу по прикидочным расчетам инерционного аккумулятора.

В работе приводятся подробные методические указания с примерами по определению моментов и других статистических величин при нахождении функций распределения.

4. Основные аэродинамические характеристики ветроэлектрического агрегата 1Д—18 были получены по общепринятой методике с использованием регистрирующих приборов. Оказалось, что начальный относительный момент на ветроколесе  $\bar{M}_0 = 0,011$ ,

максимальный момент  $\bar{M}_{max} = 0,084$ , нормальный момент  $\bar{M}_n = 0,076$ . Максимальный коэффициент использования энергии ветра при  $z = 5$  равен  $\xi = 0,41$ . Синхронная скорость вращения наступает при  $z = 9,7$ .

На ветроэлектрическом агрегате 1Д—18 установлены цельноповоротные лопасти, поэтому скорости ветра, при которых агрегат трогается (3 м/сек) и выходит на нормальный режим (4 м/сек), — незначительны.

Рассматриваемый инерционный аккумулятор выполнен в виде гироскопического маятника, представляет из себя стальной клепаный диск, толщиной 160 мм и диаметром 1240 мм. Благодаря большой массе и скорости вращения (900—2300 об/мин) он может нести большую кинетическую энергию, в силу этого при провалах скоростей ветра он покрывает дефициты энергии, а при повышении скорости накапливает энергию.

Такое свойство инерционного аккумулятора дает возможность получить от ветроэлектрического агрегата 1Д—18 электроэнергию, пригодную для многих видов сельскохозяйственного производства.

С точки зрения динамики механизмов, важно было знать, какова неравномерность хода генератора ветроэлектрического агрегата 1Д—18 при существующем соотношении между вращающейся массой инерционного аккумулятора и действующими силами (порывами ветра, для различных осредненных уровней ветра), при выбранном значении  $\delta$ .

Коэффициент неравномерности хода определялся из соотношения

$$\delta = \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{\omega_{cp}} \quad (5)$$

Анализ полученных в результате опытов данных показывает, что  $\delta$  хотя и варьирует в значительных пределах, но редко выходит за рамки допустимого  $\delta = 0,2$  (в этом случае скорость вращения генератора изменяется от 900 до 1100 об/мин). Опыты проводились на скоростях ветра до 8 м/сек включительно, поскольку при  $V > 8$  м/сек вступает в действие регулирование агрегата.

Существующий инерционный аккумулятор может обеспечить покрытие 90% всех возможных дефицитов энергии ветра (это очень высокий процент обеспеченности), при этом  $\delta$  не превышает 0,2.

5. Дефициты энергии ветра, которые необходимо покрывать за счет живой силы инерционного аккумулятора, подсчитывались для расчетной скорости ветра в 8 м/сек методом численного интегрирования по соотношению

$$\Delta A = N_8 \sum_{i=1}^{i=n} \Delta t - \sum_{i=1}^{i=n} N_i \Delta t \text{ (квт сек)} \quad (6)$$



где  $\Delta A$  — дефицит энергии ветра в квт сек.

$N_8$  — мощность ветроэлектрического агрегата 1Д-18 при  $V = 8$  м/сек в квт.

$\Delta t$  — интервал времени в 5 сек.

$N_i$  — мощность ветродвигателя для измеряемой скорости ветра в квт.

Распределение дефицитов энергии ветра получено методом моментов высших порядков, имеет вид

$$n_{\Delta A} = n_0 \left(1 + \frac{\Delta A}{8,035}\right)^{0,190} \cdot \left(1 - \frac{\Delta A}{9,000}\right)^{1,933} \quad (7)$$

где  $n_{\Delta A}$  — повторяемость в процентах.

$\Delta A$  — дефициты энергии в промилях.

Во время практических расчетов инерционного аккумулятора необходимо по уравнению (7) построить интегральную кривую обеспеченности. Лучше всего для этой цели пользоваться клетчаткой вероятностей Хазена для кривых со значительной асимметричностью.

При данном способе расчета дефицитов учитывалась как длительность провала, так и глубина провала.

б. а. Известно, что между сопротивлениями, противодействующими движению, и силами, преодолевающими их существует зависимость, выражающаяся уравнением д'Аламбера

$$M_m = M_s - M_d \quad (8)$$

где  $M_m$  — вращающий момент в кг м.

$M_s$  — момент сопротивления в кг м.

$M_d$  — момент сил сопротивления инерционных масс в кг м.

Необходимо учитывать, что колебание энергии на ветроэлектрическом агрегате происходит от изменения  $M_m$  в силу порывистого характера энергии ветра. С другой стороны специфические свойства ветровой энергии не дают возможности поддерживать  $M_s$  — строго постоянным на рабочем диапазоне скоростей ветра. Все это создает большие трудности при расчете оптимальных размеров инерционного аккумулятора.

Для расчета махового момента инерционного аккумулятора была использована формула

$$GD^2 = \frac{K \cdot \Delta A}{n_{cp}^2 \cdot \delta} \quad (9)$$

где:  $GD^2$  — маховый момент кг м<sup>2</sup>,

$\Delta A$  — дефицит энергии ветра квт,

$n_{cp}$  — средняя скорость вращения генератора об/мин,

$\delta$  — коэффициент неравномерности хода машин,

$K = 734400$  — размерный коэффициент  $\frac{м}{сек^2}$

Диаметр диска выбирается из конструктивных соображений, (рекомендуем, при выборе размеров диска придерживаться условия, при котором отношение толщины диска к его радиусу

не превышает 0,25),  $\Delta A$  — определяется по интегральной кривой обеспеченности построенной по уравнению (7), коэффициент неравномерности  $\delta = 0,2$ .

От того, какой процент обеспеченности принят, зависит число случаев, нарушающих работу ветроэлектрического агрегата 1Д-18. Этот результат особенно важен, поскольку он дает ключ к правильному расчету инерционного аккумулятора.

Инерционный аккумулятор, установленный на ветроэлектрическом агрегате 1Д-18 буфером, может покрывать 90% всех дефицитов энергии ветра.

Интегральное уравнение обеспеченности показывает, что полное покрытие всех возможных дефицитов энергии ветра при помощи инерционного аккумулятора исключается.

В работе отмечается, что инерционный аккумулятор с большими скоростями вращения (900-2300 об/мин) можно применять только с вращающимся кожухом, в противном случае будут происходить большие потери энергии на трение диска аккумулятора о воздух.

Наши эксперименты для случаев: когда диск заключен в неподвижный кожух и в кожух вращающийся показывают, что аэродинамические потери на нем, соответственно уменьшаются 1,38 и 2,70 раза. По эмпирической формуле

$$N_{aэр} = A \cdot \rho \cdot R^5 \left(1 + 2,5 \frac{h}{R}\right) \omega^3 \text{ квт} \quad (10)$$

где  $R$  — радиус диска в м,

$h$  — толщина диска в м,

$\omega$  — скорость вращения  $\frac{1}{сек}$ ,

$\rho$  — массовая плотность воздуха в  $\frac{кг \text{ сек}^2}{м^4}$ ,

$A = 1,18 \cdot 10^{-5}$  — безразмерный коэффициент, можно определить мощность трения диска, заключенного во вращающийся кожух с зазорами по ободу 6 мм и по поверхностям 25 мм.

При определении аэродинамических потерь на диске инерционного аккумулятора применялся метод выбега.

Применяемый вращающийся кожух (конструкция подробно описана в работе) очень прост и дешев в изготовлении, вместе с тем он вносит существенное изменение в баланс выдаваемой ветроэлектрическим агрегатом 1Д-18 энергии. Двухгодичная эксплуатация кожуха указывает на его надежность в работе.

б) Инерционный аккумулятор ( $J = 29,6$  кг м сек<sup>2</sup>,  $G = 1450$  кг) ветроэлектрического агрегата 1Д-18 в первом своем варианте устанавливался буфером, т.е. он не ставился в цепи соединительных передаточных механизмов между ветроколесом и генератором, а присоединялся через редуктор. (В этом случае имеется возможность отключать аккумулятор).



Во втором варианте инерционный аккумулятор ( $J = 102 \text{ кг м}^2$ ,  $G = 3200 \text{ кг}$ ) установлен между редуктором и генератором и жестко связан с последним (фактически генератор и инерционный аккумулятор посажены на один вал).

Буферное расположение инерционного аккумулятора (не обязательно на вертикальном валу) дает ряд преимуществ. При буферном расположении аккумулятора имеется возможность увеличивать его энергоемкость за счет скорости вращения, путем подбора передаточного отношения промежуточного редуктора, с одновременным пропорциональным уменьшением веса диска.

При всех равных условиях энергоемкость инерционного аккумулятора является функцией скорости вращения диска, а скорость вращения диска зависит от скорости ветра (до расчетной), т. е. с увеличением скорости ветра увеличивается и скорость вращения ветроколеса с одновременным увеличением скорости вращения диска, следовательно, энергоемкость его также будет увеличиваться. В этом случае представляется возможным иметь подвижную шкалу энергоемкости инерционного аккумулятора.

Такое изменение энергоемкости вполне согласуется с основным назначением инерционного аккумулятора. При малых ветрах мощность ветроэлектрического агрегата 1Д—18 незначительна (при  $V = 4 \text{ м/сек}$   $N = 4 \text{ квт}$ ), поэтому для покрытия провалов скоростей ветра, даже при большой их длительности, энергоемкость инерционного аккумулятора должна быть не большой.

По мере увеличения скорости ветра энергоемкость должна увеличиваться. Потери мощности на инерционном аккумуляторе изменяются в зависимости от скорости его вращения, т. е. при малой мощности агрегата потери незначительны, при большей — потери увеличиваются, не превышая, однако,  $9,8\%$  установленной мощности.

Во втором случае мы лишены возможности иметь подвижную шкалу энергоемкости инерционного аккумулятора и его потерь, поскольку здесь инерционный аккумулятор должен иметь скорость вращения, равную номинальной скорости вращения генератора ( $1000 \text{ об/мин} \pm 10\%$ ).

Для того, чтобы инерционный аккумулятор имел достаточную энергоемкость при данной компоновке, приходится непомерно увеличивать его вес и размеры. В свою очередь, это влечет за собой увеличение потерь, а также повышение скорости ветра, при которой агрегат выходит на режим ( $5,5 \text{ м/сек}$ ).

В результате годовая выработка электроэнергии ветроэлектрического агрегата сильно понижается, так как по годовому распределению скоростей ветра на скорости  $4-5 \text{ м/сек}$  падает около 2000 часов годового времени.

В работе проделан расчет выработки ветроэлектрических агрегатов 1Д—18 с различными инерционными аккумуляторами для трех пунктов: для условий Западного Казахстана (г. Уральск),

центрального Казахстана (г. Караганда) и условий юго-восточной части Казахстана (ст. Чокпар) во всех трех случаях выработка агрегата, у которого инерционный аккумулятор присоединен буфером на  $25\%$  выше, чем у агрегата, у которого инерционный аккумулятор посажен на один вал с генератором.

При буферном расположении инерционного аккумулятора расход металла на  $10\%$  меньше, чем во втором варианте. Если вспомнить, что ветродвигатели вообще очень металлоемкие, то такую экономию следует признать значительной.

Фундамент ветроэлектрического агрегата 1Д—18 в первом варианте составляет  $12 \text{ м}^3$ , тогда как во втором —  $44 \text{ м}^3$ . Здесь также ощутима разница, как в количестве материалов, так и в стоимости.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Используя достижения советских ученых в области теории турбулентности приземного слоя атмосферы и применяя идею о „физическом осреднении“, удалось поставить наблюдения за микроструктурой режима ветра, применительно к современным требованиям ветроэнергетики и рассматривать ее как стационарный случайный процесс.

Предложено разделение всего статистического коллектива полученных значений скорости на узкие осредненные уровни для всего диапазона рабочих скоростей ветра от  $4$  до  $20 \text{ м/сек}$ .

В результате получен ряд основных статистических закономерностей микроструктуры ветра и, в первую очередь, функций распределения, как наиболее полных характеристик, а именно:

1. Функция распределения относительных скоростей ветра представляет собой нормальный закон, причем для каждого осредненного уровня значение дисперсии является строго определенным, а ход изменения дисперсии от уровня к уровню закономерным, выражающимся в том, что для абсолютных значений скоростей ветра дисперсия увеличивается по мере нарастания средней скорости ветра.

2. Получена функция распределения длительностей подъемов провалов скоростей ветра. Графически распределение представляется  $j$ -образной кривой с размахом от  $0$  до  $\infty$ . Это говорит о том, что с увеличением скорости ветра длительности провалов подъемов уменьшаются.

3. Получена корреляционная зависимость между максимальными —  $100\%$  — обеспеченности длительностями провалов — подъемов и средними скоростями, а также между длительностями  $50\%$  — обеспеченности. Для расчета длительностей провалов различной обеспеченности построена номограмма  $V_{cp} = f(\Delta t_{cp}, \Delta t_{max})$

4. Получена функция распределения дефицитов энергии ветра для расчетной скорости ветра ( $8 \text{ м/сек}$ ), позволяющая выяснить влияние порывистости на работу инерционного аккумулятора.



Представилась возможность определить какой процент (90%) из всех случаев вероятных дефицитов энергии будет покрываться инерционным аккумулятором (при этом скорость его вращения будет изменяться в пределах, определяемых коэффициентом неравномерности  $\delta = 0,2$ ) и какой процент (10%) случаев дефицитов энергии будет нарушать работу ветроэлектрического агрегата 1Д—18.

5. Предложен метод энергетического расчета инерционного аккумулятора с использованием статистических характеристик микроструктуры режима ветра.

6. Получены основные аэродинамические характеристики ветроэлектрического агрегата 1Д—18.

7. Экспериментальные работы с буферным инерционным аккумулятором показали, что:

- а) он имеет подвижную шкалу энергоемкости,
- б) при малом весе (1450 кг), за счет скорости вращения (900-2300 об/мин), обладает значительной энергоемкостью,
- в) применение вращающегося кожуха снижает аэродинамические потери в 2,7 раза. Двухгодичная эксплуатация его показала, что он надежен в работе.

8. Сравнительный технико-экономический анализ работы ветроэлектрического агрегата 1Д—18 с различными схемами подключения инерционного аккумулятора показал, что выработка агрегата с буферным расположением инерционника на 25% выше, а расход металла на 10% ниже и в 3,5 раза меньше объем фундаментов по сравнению с агрегатом, у которого инерционник жестко связан с генератором без промежуточных передач.

