

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
Томский ордена Трудового Красного Знамени  
политехнический институт имени С. М. Кирова

---

В. М. ОСИПОВ

*На правах рукописи*

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ И НЕКОТОРЫЕ  
ВОПРОСЫ РАБОТЫ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель — доктор технических наук,  
профессор И. Д. Кутявин



А3

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР  
Томский ордена Трудового Красного Знамени  
политехнический институт имени С. М. Кирова

гор. Томск, Тимирязева, 9

Телефон 60 51, 2 96

Фрунзе  
АН Кир. ССР

Теоретическое исследование и экспериментальная часть работы выполнены в Томском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте имени С. М. Кирова.

Объем работы составляет 131 стр. текста и 8 стр. приложений. Число рисунков в тексте 37 и в приложении 1. Список литературы — 32 (из них 1 на иностранном языке).

Основное содержание работы опубликовано в статьях:

1. В. М. Осипов, «Некоторые вопросы ветроэнергетических расчетов», Известия Томского политехнического института, том 94, ГЭИ, 1958.

2. В. М. Осипов, «Наивыгоднейшее соотношение между установленной мощностью ветроэлектростанции и нагрузкой», Известия Томского политехнического института, т. 94, ГЭИ, 1958.

Направляем Вам для ознакомления автореферат работы старшего преподавателя В. М. Осипова на тему: «Ветроэнергетические расчеты и некоторые вопросы работы ветроэлектростанций в электроэнергетической системе», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится 6 июня 1959 года

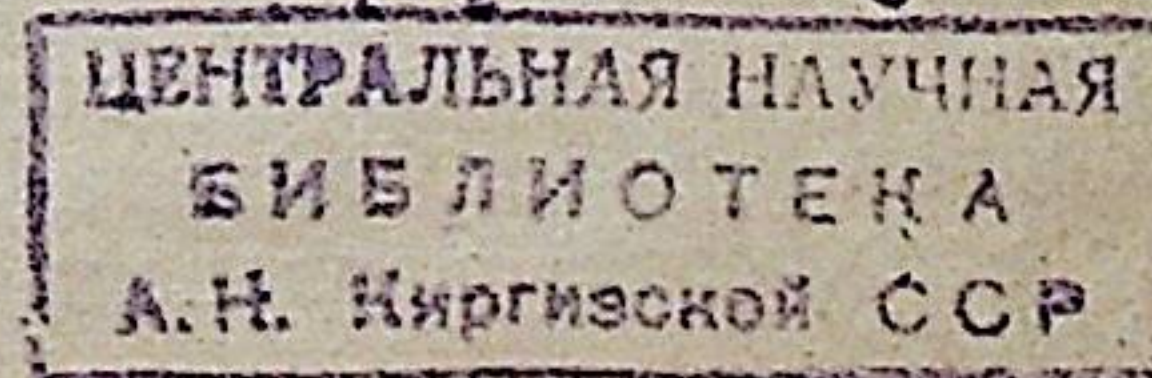
в аудитории института.

Просим принять участие в работе Совета или прислать свои отзывы.

Ученый секретарь Совета

Л. Калачева

" 22 " мая 1959 года.





Электрификация сельского хозяйства является важнейшей задачей в общем плане создания материально-технической базы коммунизма.

Пленум ЦК КПСС 3 сентября 1953 г., а также XX съезд КПСС указали на необходимость расширения работ по электрификации сельского хозяйства путем подключения сельскохозяйственных потребителей к государственным энергосистемам, а также путем строительства новых электростанций, использующих местные энергетические ресурсы: гидроэнергию, различные виды топлива, а также энергию ветра.

Использование энергии ветра для целей сельскохозяйственной электрификации в настоящее время пока не получило широкого развития, несмотря на крупные достижения в этой области. Это объясняется отрицательными качествами ветра, как энергоносителя. Однако многочисленные расчеты и исследования, проведенные в нашей стране и за границей, а также имеющийся опыт эксплуатации ветросиловых установок, со всей очевидностью показывают высокую эффективность использования этого вида энергии в более широких масштабах. При этом наиболее целесообразной следует считать совместную работу ветроэлектростанций (ВЭС) с электростанциями других типов, а также параллельно с мощными сетями государственных энергосистем. Такая форма использования энергии ветра поставила перед ветроэнергетиками ряд новых задач, прежде всего в отношении высокой надежности параллельной работы ВЭС. В этом направлении значительная работа была проделана сотрудниками МИМЭСХ В. Н. Андриановым, А. И. Покатаевым, Д. Н. Быстрицким и др.

Вместе с этим, наличие ВЭС в энергетической системе создает в общем случае особенности в отношении режима ее работы, причем ВЭС окажут заметное влияние на все технико-экономические показатели работы системы. Исследование этих вопросов в настоящее время затруднено вследствие слабости и трудоемкости существующей методики ветроэнергетических расчетов. Такие расчеты проводят прежде всего для определения годовой выработки ВЭС, параметров наивыгоднейшего аэродинамического режима и некоторых других величин, характеризующих условия работы ВЭС в годовом разрезе. Расчеты ведутся обычно в форме таблиц и широко используют вариантный принцип. Определяемые вели-

чины получаются в результате суммирования нескольких слагаемых, каждое из которых соответствует целому значению скорости ветра, так как статистическая совокупность по повторяемости ветров обычно задается не в виде плавной кривой, а ломаной и, кроме того, основная характеристика ветродвигателя не имеет аналитического выражения.

Эти обстоятельства делают такие расчеты весьма трудоемкими, особенно в случае, когда их необходимо проводить для нескольких значений среднегодовых скоростей ветра или других паспортных данных ВЭС, при этом, очевидно, анализ влияния различных факторов чрезвычайно затруднен и может быть выполнен только путем сравнения различных вариантов расчета.

Теоретической базой существующей методики ветроэнергетических расчетов являются логически простые положения и приемы, которые оказываются вполне подходящими для проведения основных (хотя и трудоемких) расчетов по ветроиспользованию. Слабость этой теоретической базы, как было уже отмечено, выявляется при рассмотрении более сложных вопросов, связанных прежде всего с оценкой аккумулирующей роли системы и с участием ВЭС в покрытии графика нагрузки, а также с влиянием ВЭС на технико-экономические показатели электроснабжения.

Скорость воздушного потока, определяющая его энергетические возможности, подчиняется закономерностям случайных величин, следовательно, ветроэнергетические расчеты должны основываться на приемах и методах теории вероятностей — математической науки, изучающей эти закономерности.

В настоящей работе была сделана попытка решения следующих вопросов:

1. Рассмотрение с позиций теории вероятностей некоторых положений и понятий, относящихся к скорости ветра, как параметру, определяющему энергетические возможности ветра.
2. На этой основе попытаться найти ряд общих выражений для определения интересующих нас величин в наиболее удобной форме.
3. Рассмотрение вопроса о наивыгоднейшем аэродинамическом режиме ВЭС, имея целью на основе общих соотношений разработать методику непосредственного определения синхронной скорости вращения ветроколеса из условия максимума годовой выработки ВЭС.
4. Разработка простой и достаточно точной методики определения годовой выработки и других величин, характеризующих условия работы ВЭС и ее эффективность.
5. Рассмотрение вопроса о компенсирующем действии ВЭС на потери энергии в линии связи при наличии местной нагрузки.



Электрификация сельского хозяйства является важнейшей задачей в общем плане создания материально-технической базы коммунизма.

Пленум ЦК КПСС 3 сентября 1953 г., а также XX съезд КПСС указали на необходимость расширения работ по электрификации сельского хозяйства путем подключения сельскохозяйственных потребителей к государственным энергосистемам, а также путем строительства новых электростанций, использующих местные энергетические ресурсы: гидроэнергию, различные виды топлива, а также энергию ветра.

Использование энергии ветра для целей сельскохозяйственной электрификации в настоящее время пока не получило широкого развития, несмотря на крупные достижения в этой области. Это объясняется отрицательными качествами ветра, как энергоносителя. Однако многочисленные расчеты и исследования, проведенные в нашей стране и за границей, а также имеющийся опыт эксплуатации ветросиловых установок, со всей очевидностью показывают высокую эффективность использования этого вида энергии в более широких масштабах. При этом наиболее целесообразной следует считать совместную работу ветроэлектростанций (ВЭС) с электростанциями других типов, а также параллельно с мощными сетями государственных энергосистем. Такая форма использования энергии ветра поставила перед ветроэнергетиками ряд новых задач, прежде всего в отношении высокой надежности параллельной работы ВЭС. В этом направлении значительная работа была проделана сотрудниками МИМЭСХ В. Н. Андриановым, А. И. Покатаевым, Д. Н. Быстрицким и др.

Вместе с этим, наличие ВЭС в энергетической системе создает в общем случае особенности в отношении режима ее работы, причем ВЭС окажут заметное влияние на все технико-экономические показатели работы системы. Исследование этих вопросов в настоящее время затруднено вследствие слабости и трудоемкости существующей методики ветроэнергетических расчетов. Такие расчеты проводят прежде всего для определения годовой выработки ВЭС, параметров наиболее выгодного аэродинамического режима и некоторых других величин, характеризующих условия работы ВЭС в годовом разрезе. Расчеты ведутся обычно в форме таблиц и широко используют вариантный принцип. Определяемые вели-

чины получаются в результате суммирования нескольких слагаемых, каждое из которых соответствует целому значению скорости ветра, так как статистическая совокупность по повторяемости ветров обычно задается не в виде плавной кривой, а ломаной и, кроме того, основная характеристика ветродвигателя не имеет аналитического выражения.

Эти обстоятельства делают такие расчеты весьма трудоемкими, особенно в случае, когда их необходимо проводить для нескольких значений среднегодовых скоростей ветра или других паспортных данных ВЭС, при этом, очевидно, анализ влияния различных факторов чрезвычайно затруднен и может быть выполнен только путем сравнения различных вариантов расчета.

Теоретической базой существующей методики ветроэнергетических расчетов являются логически простые положения и приемы, которые оказываются вполне подходящими для проведения основных (хотя и трудоемких) расчетов по ветроиспользованию. Слабость этой теоретической базы, как было уже отмечено, выявляется при рассмотрении более сложных вопросов, связанных прежде всего с оценкой аккумулирующей роли системы и с участием ВЭС в покрытии графика нагрузки, а также с влиянием ВЭС на технико-экономические показатели электроснабжения.

Скорость воздушного потока, определяющая его энергетические возможности, подчиняется закономерностям случайных величин, следовательно, ветроэнергетические расчеты должны основываться на приемах и методах теории вероятностей — математической науки, изучающей эти закономерности.

В настоящей работе была сделана попытка решения следующих вопросов:

1. Рассмотрение с позиций теории вероятностей некоторых положений и понятий, относящихся к скорости ветра, как параметру, определяющему энергетические возможности ветра.
2. На этой основе попытаться найти ряд общих выражений для определения интересующих нас величин в наиболее удобной форме.
3. Рассмотрение вопроса о наиболее выгодном аэродинамическом режиме ВЭС, имея целью на основе общих соотношений разработать методику непосредственного определения синхронной скорости вращения ветроколеса из условия максимума годовой выработки ВЭС.
4. Разработка простой и достаточно точной методики определения годовой выработки и других величин, характеризующих условия работы ВЭС и ее эффективность.
5. Рассмотрение вопроса о компенсирующем действии ВЭС на потери энергии в линии связи при наличии местной нагрузки.



6. Определение наиболее выгодного соотношения между установленной мощностью ВЭС и местной нагрузкой из условия максимального использования энергии ВЭС близлежащими потребителями.

7. Опытная проверка некоторых соотношений.

Реферлируемая диссертация состоит из 4-х глав.

1. В главе первой скорость ветра, как случайная величина, рассматривается с позиций теории вероятностей. Всякая случайная величина характеризуется функцией распределения плотности вероятностей, определение которой общеизвестно.

Случайную величину можно определить используя иную функцию, чем функция распределения плотности вероятности. График этой функции широко используется в энергетике для оценки нагрузки в годовом разрезе и получил название графика по продолжительности. Мы назвали эту функцию убывающей интегральной функцией распределения. Связь между функцией плотности и убывающей интегральной функцией дается формулой

$$\frac{t(v)}{T} = t_*(v) = \int_v^{v_m} f(v) dv, \quad (1)$$

где  $t(v)$  — годовая продолжительность скоростей ветра больших чем данное значение  $v$  (час) (убывающая интегральная функция распределения),  $T = 8760$  ч — число часов в году;  $t_*(v)$  — тоже в относительных единицах;  $v_m$  — максимальное значение скорости ветра;  $f(v)$  — функция распределения плотности вероятности скорости ветра. Таким образом, убывающая интегральная функция распределения численно дает вероятность попадания нашей случайной величины в интервал между  $v$  и  $v_m$ . Использование этой функции создает большую наглядность в проводимых расчетах. В частности, на основе этой функции легко выявляется геометрический смысл момента любого порядка — основной числовой характеристики случайной величины.

Мощность ветроэлектростанции (ВЭС) является сложной функцией скорости ветра и, следовательно, есть также случайная величина. Уравнение убывающей интегральной кривой (графика по продолжительности) для мощности ВЭС легко представить в параметрической форме.

$$\left. \begin{aligned} P_s &= 0,481 \cdot 10^{-3} D^2 v^3 \xi \eta \\ t_* &= \int_v^{v_m} f(v) dv \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $P_s$  — мощность ВЭС (кВт);  $D$  — диаметр ветроколеса (м);  $v$  — скорость ветра (м/сек);  $\xi$  — коэффициент использования энергии ветра;  $\eta$  — общий к. п. д. Среднегодовая мощность (годовая выработка) ВЭС будет, очевидно, равна площади под интегральной кривой, взятой в пределах от нуля до расчетной мощности, т. е.

$$P_{ср.в.} = \int_0^{P_{р.в.}} t_* dP_s \quad (3)$$

Для проведения конкретных расчетов нами найдены убывающие интегральные функции для двух теоретических распределений, широко применяемых в советской ветроэнергетике: для кривой Поморцева, представляющей собой нормальный закон, и кривой Гуллена. Для нормального закона уравнение интегральной кривой имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} t_* &= \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{v - v_{ср}}{\sigma} \right) \right] & v > v_{ср} \\ t_* &= \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{v - v_{ср}}{\sigma} \right) \right] & v < v_{ср} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\Phi \left( \frac{v - v_{ср}}{\sigma} \right)$  — интеграл вероятности от сложного аргумента  $\frac{v - v_{ср}}{\sigma}$ ;  $v_{ср}$  — среднегодовая скорость ветра;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение, в нашем случае является функцией среднегодовой скорости.

Для распределения Гуллена получаем:

$$t_* = \left[ 3 \sin(av) + \cos(av) \right] \exp(-3av), \quad (5)$$

где  $a = \frac{3}{5v_{ср}}$ .

По уравнениям (4) и (5) построены кривые, которые используются в работе как расчетные.

2. Вторая глава посвящена исследованию наиболее выгодного аэродинамического режима ветроэлектростанции и созданию простой, но достаточно точной методики непосредственного определения



наивыгоднейшей синхронной скорости вращения ветроколеса годовой выработки и других величин, характеризующих работу ВЭС в течение года.

Для ветродвигателя возможны два различных аэродинамических режима: первый характеризуется постоянной скоростью вращения ветроколеса и переменным значением коэффициента использования энергии ветра, меняющимся в соответствии с характеристикой  $\xi(v_{\text{окр.}}, v)$ ; для второго режима характерно постоянное значение  $\xi$ , равное максимальному, и переменная скорость вращения ветроколеса. Для ВЭС второй режим представляет лишь теоретический интерес хотя и является наивыгоднейшим с точки зрения годовой выработки, в то время как первый просто необходим в виду использования электрических машин нормального типа. В первом режиме скорость вращения ветроколеса, обеспечивающая максимальную годовую производительность ветродвигателя (ВЭС), и будет являться наивыгоднейшей для этого режима. В настоящее время эту наивыгоднейшую скорость находят путем сравнения вариантов довольно громоздкого расчета, что чрезвычайно затрудняет анализ этого вопроса.

Для различных значений окружной скорости ветроколеса можно построить семейство интегральных кривых распределения мощности ВЭС; огибающая этого семейства будет интегральной кривой при переменной скорости ветроколеса и постоянном значении  $\xi$ , равном максимальному (второй режим). Эта огибающая будет, очевидно, ограничивать максимально возможную площадь и будет иметь точку касания с каждой кривой указанного семейства. Искомому наивыгоднейшему режиму будет отвечать такая кривая (и, следовательно, определенная точка касания), которая ограничивает максимальную площадь при постоянной скорости ветроколеса.

В такой постановке оказалось возможным приближенное решение задачи по определению непосредственно наивыгоднейшей окружной скорости ветроколеса.

В работе вначале рассматривается сравнительно простой случай, когда потери отсутствуют или, когда общий КПД ВЭС есть постоянная величина. Для этого случая была получена формула для определения оптимальной окружной скорости вращения ветроколеса:

$$v_{\text{окр. опт.}} = \left( 1 + \frac{\alpha}{6} - \frac{\alpha^2}{9} \right) Z_n \sqrt[3]{\frac{P_p}{2c\xi_m}}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от вида функции распределения скорости ветра и крутизны правой части характеристики ветро-

двигателя. Для теоретических распределений Поморцева и Гуллена в работе получены формулы, позволяющие найти значение этого коэффициента;  $Z_n$  — быстроходность ветродвигателя;  $P_p$  — расчетная мощность (квт);  $c = 0,481 \cdot 10^{-3} D^2$  — постоянная, зависящая от диаметра ветроколеса;  $\xi_m$  — максимальное значение коэффициента использования энергии ветра.

Как показывает анализ и многочисленные расчеты, формула (7) не дает каких-либо заметных отклонений от значений  $v_{\text{окр. опт.}}$  найденных обычным путем.

При небольших значениях коэффициента  $\alpha$  можно с большой точностью расчет вести по формуле

$$v_{\text{окр. опт.}} = Z_n \sqrt[3]{\frac{P_p}{2c\xi_m}}. \quad (8)$$

При распределении скорости ветра по кривой Гуллена расчет по этой формуле можно производить практически всегда без ущерба для точности, так как значение коэффициента оказывается мало и меняется он незначительно с изменением среднегодовой скорости и паспортных данных ВЭС. При распределении скорости ветра по нормальному закону указанная формула может применяться при малых значениях  $\alpha$  и при ориентировочных расчетах, однако, и в этом случае погрешность формулы не превышает 5—10%. Таким образом, может быть сделан практически важный вывод о том, что наивыгоднейшая (оптимальная) окружная скорость ветроколеса практически мало зависит от вида функции распределения скорости ветра, а определяется быстроходностью ветродвигателя, диаметром ветроколеса расчетной мощностью и максимальным значением коэффициента использования энергии ветра. На величину оптимальной окружной скорости некоторое влияние оказывает отношение

$$\frac{Z_n^2}{(Z_0 - Z_n)^2}$$

— где  $Z_0$  — синхронная модульность, чем оно меньше при данном значении  $Z_n$ , тем меньше  $v_{\text{окр. опт.}}$  и тем больше годовая выработка ВЭС, так как уменьшается отношение  $\frac{Z_n}{Z_0}$  и началь-

ная скорость ветра. Разработан весьма простой графоаналитический прием определения начальной и расчетной скорости ветра в наивыгоднейшем аэродинамическом режиме. Дана формула для определения среднегодовой мощности ВЭС

$$P_{\text{ср. г.}} = \frac{P_p}{6} \left[ t_{*0} + 4t_{*1} + t_{*p} \right] \quad (\text{квт}), \quad (9)$$



где  $t_{*0}$  — продолжительность скоростей больших, чем начальная (т. е. вероятность того, что скорость ветра окажется больше, чем начальная скорость);  $t_{*1}$  — продолжительность скорости больших, чем то, при котором  $\xi = \xi_m$ ;  $t_{*p}$  — продолжительность скоростей больших расчетной.

Указанные величины для теоретических распределений могут быть взяты непосредственно из интегральных кривых, либо подсчитаны по формулам (4) или (5). Точность формулы (9) выше, чем точность обычно применяемой методики.

Для ориентировочных расчетов целесообразно пользоваться приближенной формулой

$$P_{ср.э.} = P_p \cdot t_{*1} \quad (10)$$

Эта формула, как правило, дает заниженное на 5—10% значение  $P_{ср.э.}$ . Достоинством ее является исключительная простота, в результате чего расчет сокращается до чрезвычайности. Из формулы (10) непосредственно следует, что коэффициент использования расчетной (установленной) мощности ВЭС весьма мало (на 5—10%) отличается от  $t_{*1}$ , т. е. весьма близок к вероятности появления скоростей ветра больших, чем то значение, при котором коэффициент использования энергии ветра равен своему максимальному значению ( $\xi = \xi_m$ ).

Далее рассмотрено влияние переменных потерь на параметры аэродинамического режима. Установлено, что наличие переменных потерь увеличивает наивыгоднейшую окружную скорость тем больше, чем больше отклоняется от единицы отношение номинального общего к. п. д. ВЭС к значению к. п. д. при  $\xi = \xi_m$ . Поскольку зависимость к. п. д. от первичной мощности не имеет аналитического выражения задача по определению интересующих нас величин сильно усложняется, однако, используя те же приемы, что и прежде, удалось создать достаточно простой графоаналитический метод расчета всех параметров режима, точность которого соответствует точности расчетов по обычной методике, а трудоемкость несравненно ниже. Графическая часть расчета обусловлена отсутствием аналитического выражения для характеристики ветродвигателя  $\xi(z)$  и зависимости  $\eta(p)$ .

3. В третьей главе рассмотрены некоторые частные случаи компенсирующего действия ВЭС на потери энергии в линии электропередачи, связывающей ВЭС с системой (линия связи), а также вопрос о наивыгоднейшем соотношении между установленной мощностью ВЭС и нагрузкой из условия максимального использования энергии ВЭС близлежащими потребителями. Вопросы эти могут быть решены элементарными приемами теории вероятностей.

В силу случайного характера мощности ВЭС в сетях системы неизбежны перетоки мощности и, следовательно, потери. В каждый данный момент при наличии ВЭС в системе в общем случае нельзя обеспечить распределение нагрузок, отвечающее минимуму потерь, однако, за определенный период времени (год) минимум потерь может быть обеспечен путем соответствующего выбора установленной мощности ВЭС, как величины, определяющей параметры функции распределения активной мощности ВЭС. Этим, однако, не исчерпывается компенсирующее действие ВЭС на потери энергии.

Действуя на возбуждение синхронного генератора ВЭС, мы можем существенно влиять на размер потоков реактивной мощности в линии, следовательно, на величину потерь от этих потоков. Регулирование напряжения на выводах генератора ВЭС нежелательно с точки зрения устойчивости параллельной работы, поэтому реактивная мощность ВЭС будет постоянной в течение года. Величина этой мощности может быть выбрана из условия минимума потерь от потоков реактивной мощности.

Установленная мощность ВЭС, отвечающая максимальной компенсации, определяемая среднегодовой нагрузкой и активными сопротивлениями участков линии и совершенно не зависит от вида функции распределения скорости ветра. С увеличением среднегодовой скорости ветра компенсация возрастает, в пределе приближаясь к дисперсии нагрузки.

Критерием эффективности использования энергии ВЭС может служить степень ее использования потребителями расположенными вблизи установки ВЭС. Чем больше доля участия энергии ВЭС в питании наиболее близко расположенных потребителей, тем меньше транзит энергии в системе, и тем, следовательно, выше годовые технико-экономические показатели ее работы. Размер перетоков мощности на участке линии, связывающей ВЭС с системой, будет характеризовать долю участия энергии ВЭС в покрытии графика местной нагрузки, т. е. эффективность ее использования. Размер этих перетоков может быть определен величиной среднеквадратичной мощности, являющейся функцией установленной мощности ВЭС. Условие минимума этой функции определяет наивыгоднейшее соотношение между установленной мощностью и нагрузкой.

Установленная мощность ВЭС, найденная из условия минимума перетоков мощности, определяется в основном среднегодовой нагрузкой и не зависит от вида функции распределения скорости ветра. Параметры графиков нагрузок и активные сопротивления участков линии весьма мало влияют на ее величину. Минимум перетоков достигается при значительно большей величине установленной мощности, чем минимум потерь.

Величина минимума перетоков мощности зависит от вида функ-



ции распределения скорости ветра и среднегодовой скорости так же, как и величина минимума потерь.

4. Глава четвертая содержит описание опыта и результаты экспериментальной проверки основных соотношений третьей главы. Наблюдалось полное совпадение опытных данных с теорией. Эксперимент был поставлен в лаборатории электрических станций Томского политехнического института.

### Выводы

1. Существующая методика ветроэнергетических расчетов теоретически весьма несовершенна, а практически неудобна в силу своей трудоемкости. В основе ветроэнергетических расчетов должна лежать теория вероятностей, так как ветер, как энергоноситель, подчиняется закономерностям случайных величин. При этом целесообразно исходить из убывающей интегральной функции распределения, используемой в энергетике под названием графика продолжительности. Это создает наглядность в использовании методов теории вероятности.

2. Функция распределения мощности ВЭС, как случайной величины, легко может быть выражена через функцию распределения скорости ветра, при этом особенно просто получить уравнение интегральной кривой, а на ее основе и общее выражение для определения годовой выработки.

3. Наивыгоднейшая окружная скорость вращения ветроколеса практически мало зависит от вида функции распределения скорости ветра и от ее параметров, а определяется быстроходностью ветродвигателя, расчетной мощностью и величиной максимального коэффициента использования энергии ветра.

При распределении скорости ветра по кривой Гуллена наивыгоднейшая окружная скорость почти не зависит от среднегодовой скорости ветра. Некоторое влияние на нее оказывает крутизна правой части характеристики ветродвигателя.

4. Суммарные потери, связанные с преобразованием механической энергии в электрическую, увеличивают наивыгоднейшую окружную скорость. Их влияние тем больше, чем больше отношение  $\frac{\eta_{ном}}{\eta_{к}}$  отклоняется от единицы.

5. Предлагаемый графоаналитический метод расчета параметров наивыгоднейшего аэродинамического режима ВЭС позволяет практически с той же точностью, что и обычно применяемая методика, но гораздо быстрее провести расчет и выявить влияние различных факторов на этот режим.

Разработанная методика с успехом может быть применена и

для расчета параметров режима, отличного от наивыгоднейшего.

6. ВЭС оказывает серьезное компенсирующее действие на потери энергии в линии связи. Установленная мощность ВЭС, найденная из условия минимума потерь энергии при наличии промежуточных отборов мощности, определяется среднегодовой нагрузкой и активными сопротивлениями участков линии и совершенно не зависит от вида функции распределения скорости ветра. Степень компенсации зависит от среднегодовой скорости ветра. С увеличением последней компенсация возрастает, в пределе приближаясь к потерям, определяемым дисперсией нагрузки.

7. Существует определенная величина установленной мощности ВЭС, обеспечивающая минимум перетоков мощности в линии связи. Эта установленная мощность определяется в основном среднегодовой нагрузкой и не зависит от вида функции распределения скорости ветра. Параметры графиков нагрузок и активные сопротивления участков линии весьма мало влияют на ее величину.

8. Минимум перетоков достигается при значительно большей величине установленной мощности, чем минимум потерь. Это различие тем больше, чем больше отборов мощности от линии связи. Минимум перетоков мощности выражен слабее, чем минимум потерь. Величины этих минимумов зависят от вида функции распределения скорости ветра.

К301199. Сдано в набор 12/V-59 г. Подписано к печати 19/V-59 г.  
Бумага 60 × 92<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Объем печ. л. 0,75; бум. л. Заказ 3251-59. Тираж 150.

Томск, типогр. 1. Полиграфиздата. Советская, 47.



144568

ЦЕНТРАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
А.Н. Киргизской ССР