

НАИВЫГОДНЕЙШЕЕ СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТЬЮ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И НАГРУЗКОЙ

В. М. Осипов

(Представлено профессором, доктором техн. наук И. Д. Кутявиным)

При широком использовании энергии ветра для целей сельскохозяйственной электрификации основным методом работы ветроэлектростанций (ВЭС) будет являться их работа в системе совместно с электростанциями других типов. В связи с этим вопрос об эффективном использовании энергии ВЭС в системе приобретает важное значение. В настоящей работе делается попытка решения этого вопроса в достаточно общем случае. При наличии местных потребителей идеальным был бы режим, когда в любой момент времени мощность ВЭС равнялась бы мощности нагрузки. Практически такой режим создать невозможно, не накладывая существенных ограничений на график нагрузки. В общем случае в силу случайного характера мощности ВЭС в сетях системы будут наблюдаться перетоки мощности, величина и направление которых зависят от соотношения между мощностью ВЭС и нагрузкой в каждый данный момент времени, а также от расположения потребителей в системе. При этом годовой график по продолжительности для мощности, протекающей в линии электропередачи, через которую ВЭС вместе с местными потребителями связана с системой, будет характеризоваться наличием отрицательной области и будет иметь вид, показанный на рис. 1. Энергия, вырабатываемая ВЭС, будет полностью использоваться местными потребителями, если ее установленная мощность равна или меньше минимума нагрузки. Однако такое соотношение нельзя признать выгодным, так как в этом случае несравненно большая часть графика нагрузки будет покрываться системой, а роль ВЭС будет сведена к минимуму. Наоборот, при установленной мощности, значительно превосходящей максимум нагрузки, большая часть энергии ВЭС будет отдаваться в систему для питания удаленных потребителей, что также нельзя признать удачным решением.

Таким образом, критерием эффективного 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 передача энергии ВЭС в систему и тем, следовательно, выше годовые технико-экономические показатели ее работы. Если разделить систему на две части таким образом, чтобы в одной из них располагалась ВЭС с близлежащими потребителями, а в другой — все остальное, то размер перетоков мощности на участке линии, связывающей эти части, будет характеризовать долю участия энергии ВЭС в покрытии графика местной нагрузки, т. е. эффективность ее использования. В общем случае график мощности, протекающей на указанном участке линии, будет иметь вид, изображенный на рис. 1. Из сказанного ясно, что условием

наивыгоднейшего соотношения между нагрузкой и установленной мощностью ВЭС может служить равенство.

$$M + N = \text{мин.},$$

где M — годовая доля системы в покрытии графика нагрузки;

N — энергия ВЭС, не использованная местными потребителями в течение года.

Найти минимум суммы этих двух энергий в общем виде практически невозможно, так как графики нагрузки (функции распределения) неизвестны. Необходимо отметить вместе с этим, что установленная мощность ВЭС, найденная таким образом, не будет учитывать, каким путем достигнуто уменьшение площадей M и N .

Одно и то же уменьшение этих площадей может быть достигнуто как путем уменьшения продолжительности небольших мощностей, так и путем сокращения максимумов. Второй путь более предпочтителен, так как при этом улучшаются технико-экономические показатели работы линии связи (уменьшаются потери, повышается качество энергии). величиной, характеризующей в среднем размеры перетоков энергии в линии, а также в какой-то степени учитывающей отмеченное выше обстоятельство, может служить среднеквадратичное значение мощности в начале линии связи ($P_{\text{л.н.ср.кв}}$). Среднеквадратичное значение случайной величины есть не что иное, как среднеквадратичное отклонение последней от своего нулевого значения. Чем оно меньше, тем меньше расселение, тем меньше вероятность больших отклонений и меньше размеры перетоков энергии. Установленная мощность ВЭС, найденная из условия минимума $P_{\text{л.н.ср.кв}}$ (или $P_{\text{л.н.ср.кв}}^2$, что все равно), будет, конечно, отличаться от установленной мощности, найденной из условия минимума суммы $M + N$, однако, это различие не может быть большим, и, кроме того, отмеченное выше обстоятельство дает нам право считать наивыгоднейшей установленную мощность, найденную из условия минимума $P_{\text{л.н.ср.кв}}$. Эта задача может быть решена без особых трудностей, используя простейшие приемы теории вероятностей [1], а также соотношения теории ветроэнергетических расчетов.

Следует отметить, что определение установленной мощности вообще не требует большой точности, так как окончательный выбор последней производится по шкале номинальных мощностей с учетом перспективного роста нагрузок.

Рассмотрим достаточно общий случай односторонней связи ВЭС с системой при наличии промежуточных отборов мощности. Пусть число отборов равно двум (рис. 2). Мощность на головном участке без учета потерь будет равна:

$$P_{\Sigma 4} = P_1 + P_2 + P_3 - P_{\text{ВЭ}} = P_{\Sigma \kappa} - P_{\text{ВЭ}}, \quad (1)$$

где $P_{\Sigma \kappa} = P_1 + P_2 + P_3$ — суммарная нагрузка.

Мощность в начале головного участка (т. е. у шин системы) будет, очевидно, равна:

$$P_c = P_{\Sigma \kappa} - P_{\text{ВЭ}} + \Delta P_{\Sigma} = P_{\Sigma \kappa} - P_{\text{ВЭ}} + \Delta P_{\Sigma p} + \Delta P_{\Sigma Q}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\Sigma p}$ — суммарные потери в линии связи от потоков активной мощности;

$\Delta P_{\Sigma Q}$ — то же от потоков реактивной мощности.

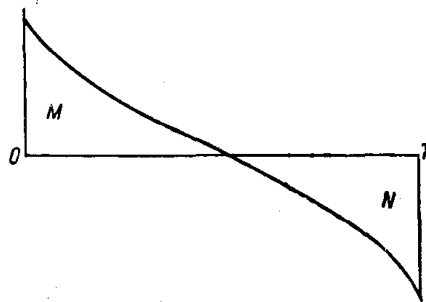


Рис. 1.

Выразим потери от потоков активной мощности через нагрузки и электрическую мощность ВЭС ($P_{BЭ}$).

Потоки мощности на отдельных участках без учета потерь будут равны (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} P_{12} &= P_1 - P_{BЭ}; \\ P_{23} &= P_1 + P_2 - P_{BЭ}; \\ P_{34} &= P_1 + P_2 + P_3 - P_{BЭ}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Суммарные потери от этих потоков будут пропорциональны сумме:

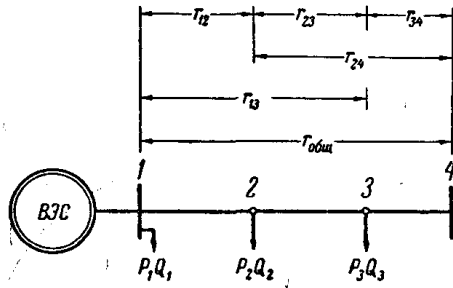


Рис. 2.

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma P} &\equiv P_{12}^2 r_{12} + P_{23}^2 r_{23} + \\ &+ P_{34}^2 r_{34} = P_{BЭ}^2 (r_{12} + r_{23} + r_{34}) - \\ &- 2P_{BЭ} [P_1 (r_{12} + r_{23} + r_{34}) + P_2 (r_{23} + \\ &+ r_{34}) + P_3 r_{34}] + K_P, \end{aligned}$$

где

$$K_P = P_1^2 r_{12} + (P_1 + P_2)^2 r_{23} + (P_1 + P_2 + P_3)^2 r_{34}.$$

Учитывая, что

$$r_{12} + r_{23} + r_{34} = r_{общ};$$

$$r_{23} + r_{34} = r_{24},$$

можем окончательно написать:

$$\Delta P_{\Sigma P} = \frac{P_{BЭ}^2 r_{общ} - 2[P_1 r_{общ} + P_2 r_{24} + P_3 r_{34}] P_{BЭ} + K_P}{U_{cp}^2}.$$

Аналогично этому

$$\Delta P_{\Sigma Q} = \frac{Q_B^2 r_{общ} - 2[Q_1 r_{общ} + Q_2 r_{24} + Q_3 r_{34}] Q_B + K_Q}{U_{cp}^2},$$

где

$$K_Q = Q_1^2 r_{12} + (Q_1 + Q_2)^2 r_{23} + (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 r_{34}.$$

Из (2) получаем:

$$P_c^2 = (P_{\Sigma\kappa} - P_{BЭ})^2 + 2(P_{\Sigma\kappa} - P_{BЭ})(\Delta P_{\Sigma P} + \Delta P_{\Sigma Q}) + (\Delta P_{\Sigma P} + \Delta P_{\Sigma Q})^2.$$

Последний член этого равенства весьма мал по сравнению с двумя первыми членами и им можно пренебречь, после чего получим:

$$P_c^2 = (P_{\Sigma\kappa} - P_{BЭ})^2 + 2(P_{\Sigma\kappa} - P_{BЭ})(\Delta P_{\Sigma P} + \Delta P_{\Sigma Q}). \quad (5)$$

Учитывая предыдущие равенства и сделав ряд преобразований, будем иметь:

$$\begin{aligned} P_c^2 &= (P_{\Sigma\kappa} - P_{BЭ})^2 + 2 \frac{P_{\Sigma\kappa} P_{BЭ}^2 r_{общ} - P_{BЭ}^3 r_{общ} - P_{BЭ} [3P_1^2 r_{общ} + \\ &+ 3P_2^2 r_{24} + 3P_3^2 r_{34} + 2P_1 P_2 (2r_{24} + r_{общ}) + 2P_1 P_3 (2r_{34} + r_{общ}) + 2P_2 P_3 (2r_{34} + r_{24})]}{U_{cp}^2} + \\ &+ 2 \frac{P_{BЭ}^2 (P_1 r_{общ} + P_2 r_{24} + P_3 r_{34})}{U_{cp}^2} + 2(P_{\Sigma\kappa} - P_{BЭ}) \Delta P_{\Sigma Q}. \end{aligned}$$

Имея в виду, что суммарная нагрузка (P_{Σ}) и мощность ВЭС ($P_{ВЭ}$) являются независимыми случайными величинами, найдем математическое ожидание величины $P_{с.ср.кв}^2$.

$$\begin{aligned} M[P_c^2] = P_{с.ср.кв}^2 = P_{\Sigmaн.ср.кв}^2 - 2P_{\Sigmaн.ср.кв}P_{ВЭср} + P_{ВЭср.кв}^2 + \\ + 2(P_{\Sigmaн.ср} - P_{ВЭср})\Delta P_{\Sigma Qср} + \\ + 2 \frac{P_{\Sigmaн.ср}P_{ВЭср.кв}^2 r_{общ} - P_{ВЭср.кв}^3 r_{общ} - P_{ВЭср}M[S]}{U_{ср}^2} + \\ + \frac{2P_{ВЭср.кв}^2(P_{1ср}r_{общ} + P_{2ср}r_{24} + P_{3ср}r_{34})}{U_{ср}^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Буквой S обозначено выражение

$$\begin{aligned} S = 3P_1^2 r_{общ} + 3P_2^2 r_{24} + 3P_3^2 r_{34} + 2P_1P_2(2r_{24} + r_{общ}) + \\ + 2P_1P_3(2r_{34} + r_{общ}) + 2P_2P_3(2r_{34} + r_{24}). \end{aligned}$$

Математическое ожидание величины S будет, очевидно, равно сумме математических ожиданий отдельных членов, т. е.

$$\begin{aligned} M[S] = 3P_{1ср.кв}^2 r_{общ} + 3P_{2ср.кв}^2 r_{24} + 3P_{3ср.кв}^2 r_{34} + 2M[P_1P_2](2r_{24} + r_{общ}) + \\ + 2M[P_1P_3](2r_{34} + r_{общ}) + 2M[P_2P_3](2r_{34} + r_{24}). \end{aligned}$$

Между величинами P_1 , P_2 и P_3 существует корреляционная связь, поэтому $M[P_1P_2] \neq M[P_1]M[P_2]$ и т. д. [1,2], однако, учитывая незначительное влияние величины $M[S]$ на $P_{с.ср.кв}^2$, можно считать, что

$$\begin{aligned} M[S] = 3P_{1ср.кв}^2 r_{общ} + 3P_{2ср.кв}^2 r_{24} + 3P_{3ср.кв}^2 r_{34} + 2P_{1ср}P_{2ср}(2r_{24} + r_{общ}) + \\ + 2P_{1ср}P_{3ср}(2r_{34} + r_{общ}) + 2P_{2ср}P_{3ср}(2r_{34} + r_{24}). \end{aligned} \quad (7)$$

Величина $P_{с.ср.кв}^2$ является функцией установленной мощности ВЭС, так как

$$\left. \begin{aligned} P_{ВЭср} &= \frac{1}{T} \int_0^{P_{уст}} t dP_{ВЭ}; \\ P_{ВЭср.кв}^2 &= \frac{2}{T} \int_0^{P_{уст}} t P_{ВЭ} dP_{ВЭ}; \\ P_{ВЭср.куб}^3 &= \frac{3}{T} \int_0^{P_{уст}} t P_{ВЭ}^2 dP_{ВЭ}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Учитывая последние равенства, возьмем первую производную от $P_{с.ср.кв}^2$ по $P_{уст}$ и приравняем ее нулю:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{с.ср.кв}^2}{dP_{уст}} = -2 \frac{t_{уст}}{T} P_{\Sigmaн.ср} + 2 \frac{t_{уст}}{T} P_{уст} + 2 \frac{t_{уст}}{T} \frac{2P_{\Sigmaн.ср}P_{уст}r_{общ}}{U_{ср}^2} + \\ + 2 \frac{t_{уст}}{T} \frac{4(P_{1ср}r_{общ} + P_{2ср}r_{24} + P_{3ср}r_{34})P_{уст} - 3P_{уст}^2 r_{общ} - M[S]}{U_{ср}^2} - \\ - 2 \frac{t_{уст}}{T} M[\Delta P_{\Sigma Q}] = 0. \end{aligned}$$

Сокращая на $2 \frac{t_{уст}}{T}$, получим квадратное уравнение относительно $P_{уст}$:

$$AP_{уст}^2 - BP_{уст} + C = 0,$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= 3 \frac{r_{общ}}{U_{ср}^2}; \\ B &= 1 + \frac{2P_{\Sigma н.ср} r_{общ}}{U_{ср}^2} + \frac{4(P_{1ср} r_{общ} + P_{2ср} r_{24} + P_{3ср} r_{34})}{U_{ср}^2}; \\ C &= \frac{M[S]}{U_{ср}^2} + \Delta P_{\Sigma Qср} + P_{\Sigma н.ср}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Корни уравнения

$$P_{уст1,2} = \frac{B \mp \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (10)$$

Рассмотрим выражение $B^2 - 4AC$:

$$\begin{aligned} B^2 - 4AC &= \left\{ 1 + \left[\frac{2P_{\Sigma н.ср} r_{общ}}{U_{ср}^2} + \frac{4(P_{1ср} r_{общ} + P_{2ср} r_{24} + P_{3ср} r_{34})}{U_{ср}^2} \right] \right\}^2 - \\ &- 12 \frac{P_{\Sigma н.ср} r_{общ}}{U_{ср}^2} - 12 \frac{\Delta P_{\Sigma Qср} r_{общ}}{U_{ср}^2} - 12 \frac{M[S] r_{общ}}{U_{ср}^4}. \end{aligned}$$

Выражение в квадратных скобках мало по сравнению с единицей, поэтому его квадратом можно пренебречь; после раскрытия фигурных скобок получим:

$$\begin{aligned} B^2 - 4AC &\approx 1 + 8 \frac{P_{1ср} r_{общ} + P_{2ср} r_{24} + P_{3ср} r_{34}}{U_{ср}^2} - 8 \frac{P_{\Sigma н.ср} r_{общ}}{U_{ср}^2} - \\ &- 12 \frac{\Delta P_{\Sigma Qср} r_{общ}}{U_{ср}^2} - 12 \frac{M[S] r_{общ}}{U_{ср}^4}. \end{aligned}$$

Это выражение больше нуля, в противном случае зависимость $P_{с.ср.кв} = f(P_{уст})$ не имеет минимума, чего не может быть.

По правилу приближенного вычисления корней можно получить:

$$\begin{aligned} \sqrt{B^2 - 4AC} &\approx 1 - 4 \frac{P_{\Sigma н.ср} r_{общ}}{U_{ср}^2} - 6 \frac{\Delta P_{\Sigma Qср} r_{общ}}{U_{ср}^2} - \\ &- 6 \frac{M[S] r_{общ}}{U_{ср}^4} + 4 \frac{P_{1ср} r_{общ} + P_{2ср} r_{24} + P_{3ср} r_{34}}{U_{ср}^2}. \end{aligned}$$

Далее находим:

$$P_{уст1} = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \approx P_{\Sigma н.ср} + \Delta P_{\Sigma Qср} + \frac{M[S]}{U_{ср}^2}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_{уст2} &= \frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \approx \frac{U_{ср}^2}{3r_{общ}} + \frac{4}{3} \left[P_{1ср} + P_{2ср} \frac{r_{24}}{r_{общ}} + P_{3ср} \frac{r_{34}}{r_{общ}} \right] - \\ &- \frac{2}{3} P_{\Sigma н.ср} - \Delta P_{\Sigma Qср} - \frac{M[S]}{U_{ср}^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Найдем значение второй производной при условии (10)

$$\left. \frac{d^2 P_{с.с.р.кв}^2}{dP_{уст}^2} \right|_{P_{уст} = P_{уст1,2}} = 2 \frac{t_{уст}}{T} (B - 2AP_{уст}) \big|_{P_{уст} = P_{уст1,2}}.$$

При $P_{уст} = P_{уст1}$ имеем:

$$\left. \frac{d^2 P_{с.с.р.кв}^2}{dP_{уст}^2} \right|_{P_{уст} = P_{уст1}} = 2 \frac{t_{уст1}}{T} \sqrt{B^2 - 4AC} > 0.$$

При $P_{уст} = P_{уст2}$

$$\left. \frac{d^2 P_{с.с.р.кв}^2}{dP_{уст}^2} \right|_{P_{уст} = P_{уст2}} = -2t_{уст2} \sqrt{B^2 - 4AC} < 0.$$

Таким образом, при условии (11) имеем минимум, а при (12) — максимум. Последний можно представить как момент, когда прирост $P_{с.с.р.кв}^2$ от увеличения установленной мощности целиком компенсируется ростом потерь в линии связи. Итак, оптимальная установленная мощность определяется равенством (11):

$$P_{уст.опт} = P_{\Sigma \text{ л.ср}} + \Delta P_{\Sigma \text{ Qcр}} + \frac{M[S]}{U_{ср}^2}.$$

Можно без труда написать условие минимума при любом числе промежуточных отборов мощности. Заметим, что во всех выражениях $U_{ср}$ — среднее напряжение линии связи. Легко видеть, что оптимальная установленная мощность ВЭС совершенно не зависит от вида функций распределения мощности ВЭС (т. е. от вида функции распределения скорости ветра и среднегодовой скорости), а определяется главным образом суммарной среднегодовой нагрузкой. Можно видеть также, что

значение второй производной $\frac{d^2 P_{с.с.р.кв}^2}{dP_{уст}^2}$, подсчитанной при условии (11),

определяется величиной $t_{уст}$ при заданной нагрузке и параметрах линии, т. е. зависит от вида функции распределения скорости ветра и среднегодовой скорости. С увеличением последней $t_{уст}$ будет расти, и, следовательно, минимум $P_{с.с.р.кв}^2$ будет проявляться сильнее. Иначе говоря, степень использования энергии ВЭС местными потребителями увеличивается с ростом среднегодовой скорости ветра.

Установленная мощность ВЭС может быть найдена не только из условия минимума перетоков энергии на участке линии, соединяющем ВЭС и местную нагрузку с системой. Включение ВЭС в общем случае существенно изменяет потоки мощности на всех участках линии связи, причем при определенном значении установленной мощности достигается минимум суммарных потерь от потоков активной мощности ($\Delta P_{\Sigma P}$). Хотя в высоковольтных сельскохозяйственных сетях относительная величина потерь и велика, вопрос об их снижении не имеет большого значения вследствие незначительной абсолютной величины этих потерь [3]. Тем не менее, небезынтересно остановиться на этом вопросе несколько подробнее.

Ранее мы нашли [см. (4)]:

$$\Delta P_{\Sigma P} \equiv P_{ВЭ}^2 r_{общ} - 2P_{ВЭ} [P_1 r_{общ} + P_2 r_{24} + P_3 r_{34}] + K_P.$$

Суммарные среднегодовые потери будут, очевидно, пропорциональны:

$$\Delta P_{\Sigma P} \equiv P_{ВЭ.ср.кв}^2 r_{общ} - 2P_{ВЭ.ср} [P_{1ср} r_{общ} + P_{2ср} r_{24} + P_{3ср} r_{34}] + M[K_P],$$

или, учитывая равенства (8), можем написать:

$$\Delta P_{\Sigma P.c.p} \equiv 2r_{общ} \frac{1}{T} \int_0^{P_{уст}} t P_{ВЭ} dP_{ВЭ} - \\ - 2 [P_{1c.p} r_{общ} + P_{2c.p} r_{24} + P_{3c.p} r_{34}] \frac{1}{T} \int_0^{P_{уст}} t dP_{ВЭ} + M[K_P].$$

Приравнивая первую производную от $\Delta P_{\Sigma P.c.p}$ по $P_{уст}$ нулю, найдем;

$$2 \frac{t_{уст}}{T} P_{уст} r_{общ} - 2 \frac{t_{уст}}{T} [P_{1c.p} r_{общ} + P_{2c.p} r_{24} + P_{3c.p} r_{34}] = 0,$$

откуда

$$P_{уст} = P_{1c.p} + \frac{r_{24}}{r_{общ}} P_{2c.p} + \frac{r_{34}}{r_{общ}} P_{3c.p} \quad (13)$$

и вообще при n отборах

$$P_{уст} = \sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{r_{i(n+1)}}{r_{1(n+1)}} P_{ic.p}. \quad (14)$$

Вторая производная $\frac{d^2 \Delta P_{\Sigma P.c.p}}{dP_{уст}^2}$ будет пропорциональна величине

$2 \frac{t_{уст}}{T} > 0$ при условии (13), следовательно, суммарные годовые потери имеют минимум. Условие минимума как и прежде, не зависит от вида функции распределения скорости ветра, а определяется среднегодовыми нагрузками и активными сопротивлениями участков линии связи.

Минимум потерь энергии, так же как и минимум $P_{с.с.p.ка}$, проявляется сильнее с ростом среднегодовой скорости ветра. Сравнивая условия этих минимумов, легко видеть, что минимум потерь достигается при значительно меньшем значении установленной мощности ВЭС.

Этим, однако, не исчерпывается компенсирующее действие ВЭС на потери энергии связи. Действуя на возбуждение синхронного генератора ВЭС, мы можем существенно влиять на размер потоков реактивной мощности в линии и, следовательно, на величину потерь от этих потоков. Этот вопрос, однако, связан с регулированием напряжения на выводах генератора ВЭС. В сельскохозяйственных сетях отношение активного сопротивления к реактивному (т. е. $\frac{r}{x}$) достаточно велико, поэтому может оказаться, что встречный поток реактивной мощности ВЭС, необходимый для поддержания заданного уровня напряжения, превысит располагаемую реактивную мощность генератора и регулирование окажется невозможным. Кроме того, при совпадении периода минимальных нагрузок с периодом сильных ветров (а это всегда возможно) увеличение мощности генератора ВЭС ($P_{ВЭ}$) при наличии регулятора возбуждения приведет к более быстрому уменьшению реактивной мощности Q_B . Генератор перейдет в режим недозовбуждения, в результате чего внутренний предел передаваемой мощности резко упадет. Указанные обстоятельства дают право считать, что регулирование напряжения на выводах генератора ВЭС, даже если оно возможно, нежелательно с точки зрения устойчивости параллельной работы. При отсутствии регулятора напряжения реактивная мощность генератора ВЭС сохранится постоянной в течение года; величина ее может быть выбрана из условия минимума потерь, хотя этот вопрос нуждается в дополнитель-

ном исследовании. Совершенно аналогично предыдущему можно найти, что минимум потерь от потоков реактивной мощности при n отборах достигается при условии:

$$Q_B = \sum_{i=1}^{i=n+1} \frac{r_{i(n+1)}}{r_{1(n+1)}} Q_{icp}.$$

Таким образом, ВЭС, вообще говоря, может существенно снизить потери энергии в линии связи. Полученные соотношения с успехом можно использовать для случая, когда параметры линии связи зависят от протекающего тока.

Экспериментальная проверка основных положений и соотношений, проведенная в лаборатории Томского политехнического института, целиком подтвердила их правильность.

Выводы

1. Оптимальная установленная мощность ВЭС, найденная из условия минимума перетоков энергии на участке линии, соединяющем ВЭС и местную нагрузку с системой, определяется в основном суммарной среднегодовой нагрузкой и совершенно не зависит от вида функции распределения скорости ветра и среднегодовой скорости. Параметры графиков нагрузок и активные сопротивления участков линии оказывают незначительное влияние.

2. С ростом среднегодовой скорости ветра степень использования энергии ВЭС близлежащими потребителями увеличивается.

3. ВЭС оказывает серьезное компенсирующее действие на потери энергии в линии связи. Установленная мощность ВЭС, найденная из условия минимума потерь энергии, определяется среднегодовыми нагрузками и активными сопротивлениями участков линии и совершенно не зависит от вида функции распределения скорости ветра и среднегодовой скорости.

4. Степень компенсации зависит от среднегодовой скорости ветра. С увеличением последней компенсация возрастает.

5. Ввиду значительной величины отношения $\frac{r}{x}$ регулятор напряжения у генератора ВЭС ухудшает устойчивость параллельной работы и с этой точки зрения является нежелательным.

6. Величина реактивной мощности ВЭС, найденная из условия минимума потерь энергии от потоков реактивной мощности, определяется среднегодовой реактивной нагрузкой и активными сопротивлениями участков линии.

Литература

1. Гнеденко Б. В., Курс теории вероятностей, Гостехтеоретиздат, М., 1954.
2. Боев Г. П., Теория вероятностей, Гостехтеоретиздат, М.—Л., 1950.
3. Залесский А. М., Передача электрической энергии, Госэнергоиздат, 1948.