

## Методика определения установленной мощности генератора и передаточного отношения редуктора для ветроагрегата

*В.Г. Петько, д.т.н., профессор, И.А. Рахимжанова, д.с.-х.н., профессор, М.Б. Фомин, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Увеличение установленной мощности генератора для той или иной ветротурбины определённых технических характеристик приводит к увеличению выработки электроэнергии, но одновременно и к увеличению стоимости генератора. В этой связи при комплектовании системы «ветротурбина – редуктор – генератор» возникает задача: так рассчитать максимальную установленную мощность генератора для ветротурбины и передаточное отношение редуктора, чтобы дополнительные расходы на прирост мощности генератора не превышали доход за счёт дополнительной выработки электроэнергии. В то же время прирост выработки электроэнергии за счёт увеличения установленной мощности генератора зависит от того, в каком ветровом районе по средней скорости ветра будет эксплуатироваться ветроагрегат. Разработка методики определения оптимальной установленной мощности генератора и оптимального передаточного отношения редуктора для ветроэнергетической установки (ВЭУ), предназначенной для работы в определённом по средней скорости ветра климатическом районе, является **целью** настоящей работы.

**Материал и методы исследования.** В электрическую энергию на выходе генератора преобразуется далеко не вся энергия воздушного потока. Большая часть этой энергии теряется при преобразовании её ветротурбиной в механическую энергию и затем механической энергии генератором в электрическую. Существенные потери наблюдаются также

из-за ограничения диапазона рабочих (используемых) скоростей ветра, как со стороны малых, так и со стороны высоких её значений. Так как диапазон используемых скоростей ограничивается в основном номинальной мощностью генератора, оптимальное её значение должно быть определено по экономическому критерию.

На практике наибольшее распространение получили ветроагрегаты, вал ветротурбин которых через редуктор соединён с валом асинхронного генератора, работающего на централизованную сеть переменного тока. При такой компоновке с увеличением скорости ветра, когда угловая скорость вала турбины ( $\omega_t$ ) и соответствующая ей угловая скорость вала генератора ( $\omega_g$ ) не достигли значений, соответствующих синхронной угловой скорости генератора ( $\omega_{гс}$ ), генератор отключён от сети. Турбина работает вхолостую с угловой скоростью, равной её синхронной угловой скорости ( $\omega_{гс}$ ), увеличивающейся пропорционально скорости ветра. В момент, когда угловая скорость генератора станет равной его синхронной угловой скорости,:

$$\omega_t = i\omega_g = \omega_{гс} = 2\pi f/p \quad [1],$$

где  $f$  – частота тока в электрической сети, Гц;

$p$  – число пар полюсов генератора;

$i$  – передаточное отношение между валами генератора и турбины, генератор автоматически подключается к электрической сети.

За счёт этого дальнейшее увеличение угловой скорости генератора практически прекращается. Она будет оставаться на уровне, соответствующем синхронной угловой скорости генератора, а соответствующая ей угловая скорость турбины – на уровне её рабочей скорости:

$$\omega_{\text{тп}} = \omega_{\text{сг}} / i.$$

Скорость ветра, при которой это происходит, определяет нижнюю границу ( $v_0$ ) рабочего диапазона скоростей ветроагрегата:

$$v_0(\omega_{\text{тп}}) = r\omega_{\text{тп}}/z_c \text{ или } v_0(i) = r\omega_{\text{сг}}/iz_c, \quad (1)$$

где  $z_c$  – синхронная быстроходность ветротурбины, показывающая, во сколько раз линейная скорость конца лопасти ветротурбины на холостом ходу  $v_{\text{лс}}$  больше скорости ветра ( $z_{\text{лс}} = (v_{\text{лс}} \llbracket / v = \omega \rrbracket \text{тс} r) / (v)$ );  $r$  – радиус ветротурбины, м.

При дальнейшем увеличении скорости ветра мощность, отдаваемая генератором в сеть в киловаттах, увеличивается в соответствии с выражением:

$$p(v, \omega_{\text{тп}}) = \xi(v, \omega_{\text{тп}}) \eta \rho s v^3 / 2000, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$s$  – площадь ометаемой турбиной поверхности, м<sup>2</sup>;

$\eta$  – совокупный коэффициент полезного действия генератора и системы передачи энергии от вала ветротурбины к валу генератора;

$\xi(v, \omega_{\text{тп}}(i))$  – коэффициент использования энергии ветра, являющийся функцией скорости ветра  $v$  и рабочей угловой скорости вала ветротурбины ( $\omega_{\text{тп}}$ ), являющейся, в свою очередь, функцией передаточного отношения редуктора  $i$ .

С учётом этого уравнение (2) может быть записано в виде:

$$p(v, i) = \xi(v, i) \eta \rho s v^3 / 2000. \quad (3)$$

Когда скорость ветра достигает установленного значения ( $v=v_y$ ), вступает в действие система ограничения мощности ветротурбины [2–6]. Тогда генератор при всех скоростях ветра выше  $v_y$  работает при мощности  $p_y$ , соответствующей этой скорости:

$$p_y(v_y, i) = \xi(v_y, i) \eta \rho s v_y^3 / 2000. \quad (4)$$

На неё и ориентируются при определении номинальной мощности генератора, установленного на ветроагрегат. Затраты на его приобретение  $C$  являются возрастающей функцией номинальной мощности, а следовательно, и функцией установленной (заранее определённой) скорости ветра  $C(p_y(v_y, i)) = C(v_y, i)$ .

Годовая выработка электроэнергии при такой системе взаимодействия турбины, генератора и электрической сети в функции конструктивно варьируемых  $v_y$  и  $i$  при известной плотности распределения скоростей ветра  $f(v)$  определяется по выражению:

$$w(v_y, i) = 8760 \int_{v_0}^{v_y} p(v, i) f(v) dv + 8760 p_y(v_y, i) \int_{v_y}^{\infty} f(v) dv, \quad (5)$$

а годовой доход от её реализации – по выражению:

$$D(v_y, i) = T_3 w(v_y, i), \quad (6)$$

где  $T_3$  – отпускная цена электроэнергии, руб/кВт·ч.

Прибыль от продажи электроэнергии, равная доходу за вычетом стоимости блока генератор-редуктор  $C(v_y, i)$ , отнесённой к году эксплуатации, рассчитывается как:

$$Q(v_y, i) = T_3 w(v_y, i) - C(v_y, i) / T_n, \quad (7)$$

где  $T_n$  – нормативный срок эксплуатации ветроустановки, лет.

В выражении не учитывается стоимость ветротурбины и стойки ветроагрегата при условии, что она является постоянной величиной и практически не зависит ни от  $v_y$ , ни от  $i$ .

Как было показано выше, величина прибыли имеет максимум при определённых (оптимальных) значениях передаточного отношения редуктора  $i_{\text{опт}}$  и скорости ветра  $v_{y, \text{опт}}$ , при которой необходимо осуществлять ограничение мощности ветротурбины. Их определение осуществляется классическим методом путём приравнивания частных производных  $\partial Q(v_y, i) / \partial i$  и  $\partial Q(v_y, i) / \partial v$  нулю и решения полученной системы двух уравнений относительно  $i$  и  $v_y$  [7] или любым из численных методов определения максимума функции двух независимых переменных.

**Результаты исследования.** В качестве конкретного примера применения изложенной выше методики определим оптимальную установленную мощность генератора и оптимальное передаточное отношение редуктора для ветроагрегата D-18 [8], установленного в климатическом районе со средней скоростью ветра  $v_c$ , равной 5 м/с. Цену реализации вырабатываемой ветроагрегатом электрической энергии  $T_3$  примем равной 1,5 р/кВт·ч. Турбина трёхлопастная,  $z_c=9$ , диаметр 18 м. Приведённая в ранее опубликованной работе [8] в виде графика зависимость коэффициента использования энергии ветра от быстроходности для данного ветроагрегата аппроксимирована в виде функции  $\xi(v, \omega)$  [9], представленной семью членами ряда Фурье:

$$\xi(\gamma(v, \omega)) = B_1 \text{Sin}(\gamma(v, \omega)) + B_2 \text{Sin}(2\gamma(v, \omega)) + \dots + B_7 \text{Sin}(7\gamma(v, \omega)), \dots \quad (8)$$

где  $\omega$  – угловая скорость ветротурбины, 1/с;

$\gamma(v, \omega) = \pi \omega r / (v z_c)$  – фазовый угол первой гармоники, рад;

$B_1 \dots B_7$  – коэффициенты гармоник:  $B_1=0,414$ ;  $B_2=-0,0627$ ;  $B_3=-0,039$ ;  $B_4=-0,04$ ;  $B_5=0,0017$ ;  $B_6=0,00443$ ;  $B_7=0,00821$ .

Так как в нашем случае при работе генератора на сеть  $\omega = \omega_{\text{тп}} = \omega_{\text{сг}} / i$ ,

$$\gamma(v, \omega) = \pi \omega_{\text{сг}} r / (i v z_c) = \gamma(v, i).$$

Тогда выражение (1) запишется в виде:

$$\xi(v, i) = B_1 \text{Sin}(\gamma(v, i)) + B_2 \text{Sin}(2\gamma(v, i)) + \dots + B_7 \text{Sin}(7\gamma(v, i)). \quad (9)$$

Поскольку генератор начинает отдавать энергию в сеть со скоростью  $v_0$ , являющейся функцией  $i$  (1), то функция  $\xi(v, i)$  имеет область определения для скоростей ветра выше  $v_0$ . Для скоростей ветра ниже этой скорости коэффициент использования энергии ветра равен нулю. Графики зависимости  $\xi(v)$  для различных значений  $i$  и  $\xi(i)$  для различных значений  $v$ , рассчитанные с учётом вышеизложенного для рассматриваемой ветротурбины и построенные в системе MathCAD, изображены на рисунке 1.

Эти же расчёты позволяют определить коэффициент использования энергии ветра для лю-

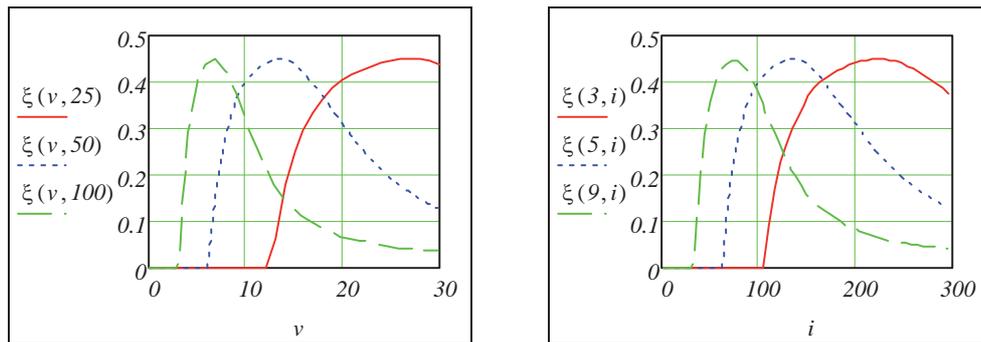


Рис. 1 – Графики зависимости  $\xi(v)$  для  $i=25; 50$  и  $100$  и  $\xi(i)$  для  $v=3, 5$  и  $9$  м/с (на данных графиках, как и на всех графиках, изображённых ниже, по осям физические величины отложены в основных единицах международной системы единиц измерения СИ)

бых промежуточных значений  $v$  и  $i$ . Например,  $\xi(8,50)=0,297$ ;  $\xi(4,200)=0,421$ ;  $\xi(5,20)=0$ .

Анализ полученных зависимостей показывает, что наибольший коэффициент использования энергии ветра наблюдается в определённом диапазоне его скоростей, зависящем в свою очередь от передаточного отношения редуктора. Следовательно, и выработка электроэнергии будет наибольшей, если в этот диапазон попадает наиболее вероятная в течение года скорость ветра (скорость ветра с наибольшей повторяемостью).

Таким же образом по уравнению (3) рассчитывается зависимость мощности генератора от  $v$  и  $i$  ( $p(v, i)$ ), а также любое из промежуточных её значений. Например, для рассматриваемого ветроагрегата ( $r = 9$  м, площадь ометаемой поверхности  $s = 254,5$  м<sup>2</sup>):  $p(5,100) = 8,29$  кВт;  $p(10,100) = 51,1$  кВт;  $p(4,150) = 4,63$  кВт;  $p(5,20) = 0$ . Как видим, отдаваемая в сеть мощность генератора в значительной степени зависит не только от скорости ветра, но и от передаточного отношения  $i$  редуктора. На рисунке 2 приведены кривые зависимости мощности генератора от скорости ветра для различных фиксированных значений передаточного отношения и кривые зависимости мощности от передаточного отношения при различных фиксированных значениях скорости ветра.

Для ветрового потока, повторяемость скоростей ветра которого с достаточной степенью точности описывается двухпараметрическим распределением Вейбулла [10–12], осуществлена оценка энер-

гетического потенциала как во всём диапазоне наблюдаемых в данном климатическом районе скоростей ветра, так и в выделенном диапазоне, ограниченном минимальным и максимальным значениями этих скоростей. При этом найдены параметры распределения Вейбулла, с достаточной степенью точности обеспечивающие совпадение кривых распределения по Вейбулла, и кривых, построенных по взятой за основу таблицы повторяемости скоростей ветра по Поморцеву [13]. Их зависимость от среднегодовой скорости ( $v_c$ ) ветра аппроксимированы уравнениями [10]:

$$\text{параметр формы} - \alpha = 1,45v_c^{0,33};$$

$$\text{и параметр масштаба} - \beta = 1,0875v_c + 0,625$$

Тогда для рассматриваемого случая ( $v_c = 5$  м/с):  $\alpha = 1,45 \cdot 5^{0,33} = 2,466$ ;  $\beta = 1,0875 \cdot 5 + 0,625 = 6,063$ .

В результате для принятой средней скорости ветра функция распределения плотности вероятности скоростей ветра по Вейбулла примет вид:

$$f(v) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} v^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha} =$$

$$= \frac{2,466}{6,063^{2,466}} v^{2,466-1} e^{-\left(\frac{v}{6,063}\right)^{2,466}} =$$

$$= 0,029 v^{1,466} e^{-\frac{v^{2,466}}{85,135}}$$

График этой функции представлен на рисунке 3.

Подставив выражение этой функции в (5), получим величину годовой выработки энергии  $w$  в функции  $v_y$  и  $i$ . На рисунке 4 приведены кривые зависимости годовой выработки электроэнергии

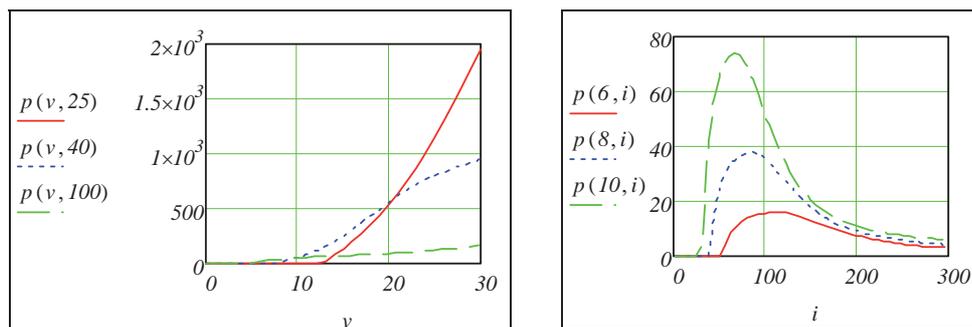


Рис. 2 – Графики зависимости  $p(v)$  для  $i=25; 40$  и  $100$  и  $p(i)$  для  $v=6, 8$  и  $10$  м/с

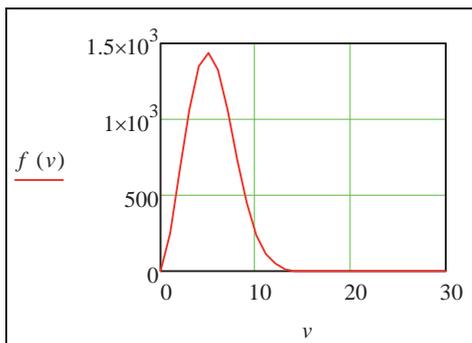


Рис. 3 – Распределение плотности вероятности скоростей ветра

в кВт·часах от  $v_y$  при различных фиксированных значениях передаточного отношения и кривые зависимости годовой выработки электроэнергии от передаточного отношения при различных фиксированных значениях  $v_y$ .

Аналогично может быть конкретизирована зависимость от этих аргументов величины годового дохода, полученного от реализации выработанной за год электроэнергии  $D(v_y, i)$  (рис. 5).

В большинстве случаев в качестве генератора ВЭУ используется асинхронный электродвигатель в комплекте с редуктором (мотор-редуктором), работающим в генераторном режиме. Примем в качестве примера мотор-редуктор серии F. Его цена  $C_n$  на 20.01.2017 г. в зависимости от номинальной мощности  $P_n$  представлена в таблице 1 [14].

Коэффициент корреляции Пирсона исходных точек данной таблицы равен 0,995 (близок к 1).

Поэтому зависимость с достаточной точностью может быть аппроксимирована линейной зависимостью  $C_y = f(p_y) = 37590 + 3754p_y$ . Её коэффициенты рассчитаны в системе MathCAD с максимальным среднеквадратичным приближением аппроксимирующей зависимости к исходным точкам [15]. Графически зависимости  $C_n = f(P_n)$  и  $C_y = f(p_y)$  представлены на рисунке 6.

Тогда зависимость прибыли  $Q(v_y, i)$  (7) приобретает конкретный для рассматриваемого случая вид. Графики этой зависимости приведены на рисунке 7.

Как видим, максимум прибыли наблюдается при определённой (оптимальной) величине установленной скорости ветра и при определённом (оптимальном) передаточном отношении редуктора. Причём величина оптимальной установленной скорости ветра не зависит от передаточного отношения редуктора (расчёты показывают, что это справедливо только при условии линейной зависимости стоимости мотор-редуктора от его номинальной мощности). В то же время оптимальное значение передаточного отношения редуктора наблюдается при различной установленной скорости ветра.

Величины оптимальных значений установленной скорости и передаточного отношения определяются, как было показано выше, путём приравнивания частных производных  $\partial Q(v_y, i_y)/\partial i_y$  и  $\partial Q(v_y, i_y)/\partial v_y$  нулю. При этом, так как величина оптимальной установленной скорости ветра в данном частном случае не зависит от передаточного отношения редуктора, решение полученной системы

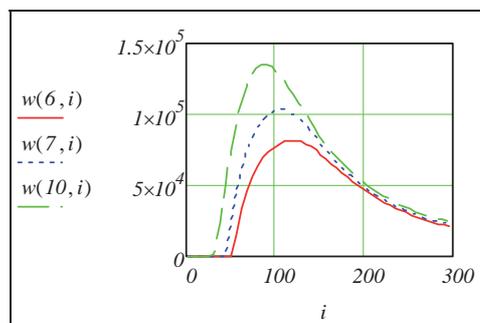
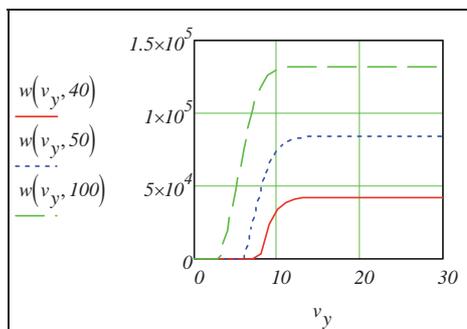


Рис. 4 – Кривые зависимостей годовой выработки энергии от  $v_y$  при  $i$ , равном 40; 50 и 100, и от передаточного отношения при  $v_y$ , равном 6; 7 и 10 м/с

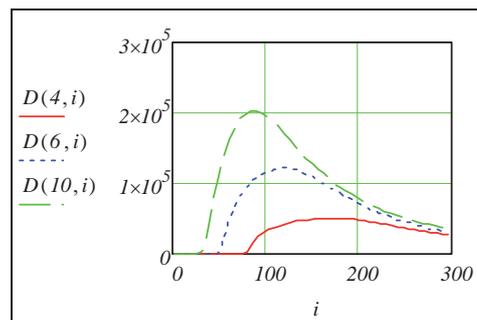
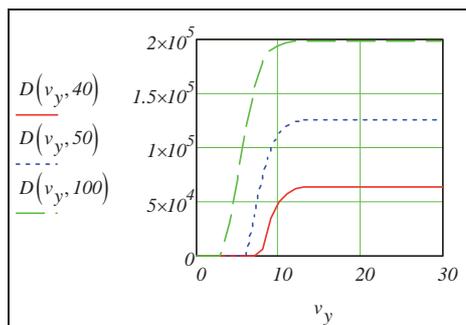


Рис. 5 – Кривые зависимостей годового дохода от выработанной энергии от  $v_y$  при  $i$ , равном 4; 5 и 10, и от передаточного отношения при  $v_y$ , равном 4; 6 и 10 м/с

1. Цена мотор-редуктора для различных значений номинальной мощности

$P_n$ , кВт	2,2	3,0	5,5	11	15	22	37	90	160
$C_n$ , руб	26640	32930	43450	67330	104750	136900	211160	395460	617570

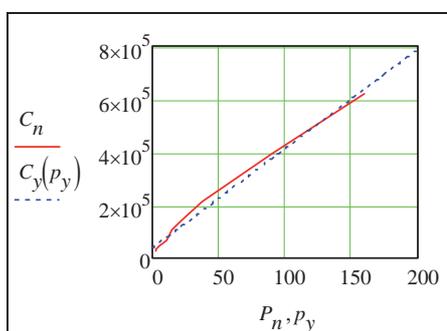
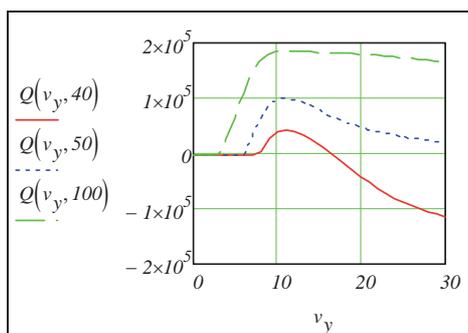


Рис. 6 – Зависимость стоимости мотор-редуктора по данным таблицы от номинальной мощности  $C_n = f(P_n)$  и аппроксимирующая её зависимость стоимости установленного мотор-редуктора от его установленной мощности  $C_y = f(p_y)$

двух уравнений относительно  $i_y$  и  $v_y$  существенно упрощается. В этом случае оптимальное значение установленной скорости ветра можно определить непосредственно из первого уравнения. Подставив это значение во второе уравнение, найдём и оптимальное значение передаточного отношения редуктора. Далее по выражениям (1), (4), (5), (6), (7), подставив в них вместо  $v_y$  и  $i$  найденные значения  $v_{y,opt}$  и  $i_{opt}$ , найдём последовательно начальную скорость ветра  $v_{0,opt}$  (при оптимальном передаточном отношении), оптимальную величину установленной мощности генератора  $p_{y,opt}$ , годовую выработку электрической энергии  $w_{opt}$ , дохода от реализации электроэнергии и прибыли  $Q_{opt}$  при оптимальных установленных значениях скорости ветра и передаточного отношения.

Все проведённые выше расчёты для средней скорости ветра 5 м/с осуществим и для других средних скоростей ветра, наблюдаемых в различных климатических районах. Результаты расчётов сведены в таблицу 2. Кроме того, в таблицу внесены:

переносимая за год энергия воздушного потока, ометаемого плоскость ветротурбины,



$$w_{вп}(v_c) = 8760 \int_{v=v_{min}}^{v=v_{max}} p(v)f(v, v_c)dv;$$

средняя мощность генератора

$$p_c = w_{opt} / 8760;$$

интегральный коэффициент использования энергии воздушного потока

$$k_{иэвп} = w_{opt} / w_{вп};$$

коэффициент использования установленной мощности генератора

$$k_{иумг} = p_{cp} / p_{y,opt}.$$

Более наглядное представление о зависимостях показателей оптимального режима ветроустановки от средних скоростей ветра, наблюдаемых в местах её установки, дают построенные по данным таблицы графики этих зависимостей, приведённые на рисунках 8–10.

**Выводы.** В работе изложена методика определения установленной мощности генератора и передаточного отношения редуктора для ветротурбины с заданными техническими характеристиками. Проведённые по программе, составленной на её основе в математической среде MathCAD, расчёты и анализ полученных результатов позволили установить следующее:

1. Коэффициент использования энергии ветра при работе генератора на сеть переменного тока достигает максимума и далее снижается как при увеличении скорости ветра, так и при увеличении передаточного отношения редуктора;

2. Мощность, развиваемая генератором на сеть, с увеличением скорости ветра увеличивается, в то же время с увеличением передаточного отношения редуктора она имеет явно выраженный максимум;

3. Энергия, вырабатываемая генератором за определённый промежуток времени, с увеличением скорости ветра асимптотически приближается к предельному значению, величина которого имеет максимум при определённом передаточном отношении редуктора;

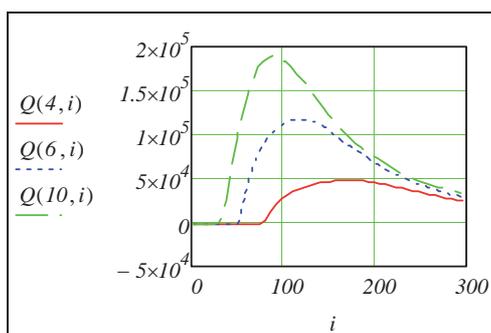


Рис. 7 – Кривые зависимостей годовой прибыли от  $v_y$ , при  $i$ , равном 40; 50 и 100, и от передаточного отношения при  $v_y$ , равном 4; 6 и 10 м/с

2. Показатели оптимального режима ВЭУ для различных средних скоростей ветра

$v_c$ , м/с	$v_{y,opt}$ , м/с	$i_{opt}$	$v_{0,opt}$ , м/с	$p_{y,opt}$ , кВт	$w_{opt}$ , т. кВт·ч	$w_{вп}$ , т. кВт·ч	$\kappa_{нвп}$	$p_{ср}$ , кВт	$\kappa_{нумг}$
1	4,64	217,39	1,45	5,03	5,11	15,25	0,335	0,58	0,12
2	6,19	160,64	1,96	12,24	16,70	46,66	0,358	1,91	0,16
3	7,78	126,04	2,49	24,93	39,89	107,7	0,370	4,55	0,18
4	9,35	104,65	3,03	44,16	78,64	207,7	0,379	8,98	0,20
5	10,90	88,07	3,57	71,05	137,00	356,2	0,385	15,64	0,22
6	12,42	76,61	4,10	106,69	219,00	562,6	0,389	25,00	0,23
7	13,92	67,83	4,63	152,15	328,70	836,3	0,393	37,52	0,25
8	15,41	60,87	5,16	208,48	470,20	1186	0,396	53,68	0,26
9	16,88	55,23	5,69	276,68	647,60	1613	0,401	73,93	0,27
10	18,34	50,56	6,21	357,77	865,10	2106	0,411	98,76	0,28

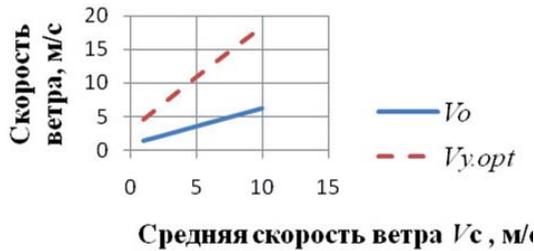


Рис. 8 – Кривые зависимостей начальной и установленной скорости ветра от средней скорости ветра в месте установки ВЭУ

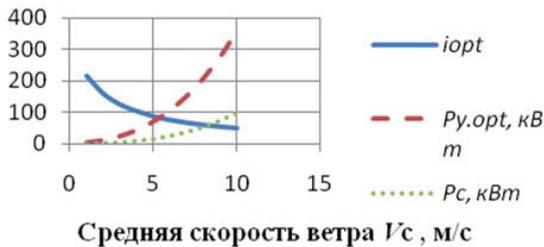


Рис. 9 – Кривые зависимостей оптимального передаточного отношения редуктора, установленной мощности генератора и среднегодовой мощности от средней скорости ветра в месте установки ВЭУ

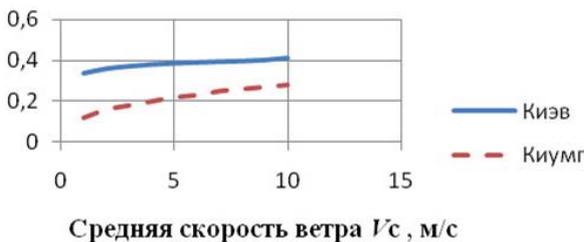


Рис. 10 – Кривые зависимостей коэффициентов использования энергии воздушного потока и установленной мощности генератора от средней скорости ветра

4. Максимум прибыли от реализации полученной энергии наблюдается при определённых оптимальных значениях установленной скорости ветра и передаточного отношения редуктора. Причём при линейной зависимости стоимости мотор-редуктора от его мощности оптимальное значение установленной скорости ветра не зависит от передаточного отношения редуктора;

5. Оптимальные по критерию максимума прибыли установленная скорость ветра и передаточное отношение редуктора зависят от средней скорости ветра в месте установки ВЭУ. Поэтому их величина должна быть изначально заложена при проектировании ВЭУ с учётом предполагаемого места установки. Так, при установленных для рассматриваемой ВЭУ скорости ветра и передаточного отношения редуктора, оптимальных при средней скорости ветра 10 м/с ( $v_{y,opt} = 18,34$  м/с и  $i_{opt} = 50,56$ ), при средней скорости ветра 5 м/с при этих же значениях годовая выработка электроэнергии будет в 4 раза меньше, чем при оптимальных для этой средней скорости ( $v_{y,opt} = 10,9$  и  $i_{opt} = 88,1$ ).

Литература

1. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 425 с.
2. Пат. 2535194, Ветроагрегат с системой ориентации и ограничения мощности ветротурбины / Петько В.Г.; Заявитель и патентообладатель – ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 10.12.2014.
3. Пат. 2587022, Система ограничения частоты вращения и мощности ветроагрегата / Петько В.Г.; Заявитель и патентообладатель – ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 10.06.2016.
4. Пат. 2587028, Ветроагрегат с системой ограничения мощности и частоты вращения / Петько В.Г., Денисов С.М.; Заявитель и патентообладатель – ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 10.05.2016.
5. Пат. 2643885, Гидравлическая система ограничения мощности и частоты вращения ветроагрегата / Петько В.Г.; Пугачёв В.В. Заявитель и патентообладатель – ФГОУ ВПО ОГАУ; опубл. 06.02.2018.
6. Пат. 2605490, Гидравлическая система регулирования угла установки лопастей ветротурбины / Петько В.Г.; Заявитель и патентообладатель – ФГОУ ВПО ОГАУ; Зарегистр. в Гос. реестре изобретений РФ 29.11.2016.
7. Бермант А.Ф., Араманович И.Г. Краткий курс математического анализа для втузов. М., 1966. 441 с.
8. Фатеев Е.М. Ветродвижатели и ветроустановки. М., 1948. С. 162, 239.
9. Петько В.Г., Рахимжанова И.А., Шахов В.А. Аппроксимация зависимости коэффициента использования энергии ветра от быстроходности ветротурбины ветроагрегатов сельскохозяйственного назначения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6. С. 77–80.
10. Петько В.Г., Рахимжанова И.А. Оценка энергетического потенциала воздушного потока // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 4 (72). С. 227–231.
11. Фомин М.Б. Ветроэнергетическая установка для повышения устойчивости металлической водонапорной башни к обледенению // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (64). С. 86–88.
12. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. М., 1998. С. 236–237.
13. Распределение Вейбулла. Непрерывные распределения в MS EXCEL / [Электронный ресурс]. URL: <http://www/exel2.ru/articles/raspredelenie-veybulla-nepregruyye-raspredeleniya-v-ms-excel> (дата обраш. 03.06.2018).
14. Поморьев М.М. О законе распределения скоростей ветра // Записки по гидрографии. 1894. Вып XV.
15. Мехпривод. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mechprivod.ru/price-list/>.