

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ

© 2011 г. К. Ю. Соломенцев, О. Ю. Белый, Е. П. Севостьянова

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ)

Проведен анализ состояния мировой ветроэнергетики. Рассмотрены состояние, проблемы, перспективы развития российской ветроэнергетики. Проведен технико-экономический анализ установленных ветрогенераторов в республике Якутия. Предложен метод экономического анализа внедряемых ветрогенераторов.

Ключевые слова: ветроэнергетика; технико-экономический анализ; ветрогенератор.

The article gives a brief overview of the wind-power engineering all over the world. Some nowadays conditions, problems and development prospects of Russian wind engineering are examined. Author also present a technical and economic analysis of wind generators, which are mounted in Yakutia republic, and propose a method of economic analysis for the introduced projects of wind generators.

Key words: wind-power engineering; technical and economic analysis; wind generator.

По данным WWEA к 2009 году, суммарная мощность всех установленных ветроэнергетических установок (ВЭУ) достигла 159,2 ГВт, а в 2009 году было установлено 38,3 ГВт. Последние 20 лет ежегодный прирост установленной мощности всех ВЭУ составляет в среднем 20% ежегодно, а в 2009 году составил 32%. Годовая выработка электроэнергии всеми ВЭУ превысила 2% от общей выработки электроэнергии в мире [5].

В России развитие ветроэнергетики происходит не так бурно как за рубежом. К концу 2009 года суммарная мощность всех ВЭУ установленных в РФ составила 17–19 МВт или 0,008% от электрогенерирующих мощностей РФ (220 ГВт). С помощью возобновляемых источников энергии ежегодно вырабатывается (без учета ГЭС мощностью более 25 МВт) менее 1% от всей электроэнергии [6].

Площадь России составляет 17,075 млн. км², при этом около 12 млн. км² территории (более 70%) не охвачено централизованным электроснабжением. На этих территориях проживает 25 млн. жителей – это 18% населения [1].

Общий ветропотенциал РФ оценивается

в 2000–3000 ТВт·Ч/год. Отличительной особенностью действующих на данный момент ВЭУ является низкий среднегодовой КПД – всего 6,8% [5].

Одной из причин слабого развития ветроэнергетики является несовершенство законодательства РФ. Основные законодательные механизмы поддержки использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в РФ определены Федеральным законом от 4 ноября 2007 года №250-ФЗ [5].

Необходимо отметить, что с момента выхода ФЗ №250 Министерство энергетики инициировало принятие второстепенных подзаконных актов и не продвинулось по ключевым документам, необходимых для развития этого сектора энергетики: механизм тарифообразования для ВИЭ, механизм продажи энергии, вырабатываемой ВИЭ, механизм компенсации затрат на технологическое присоединение ВИЭ к сети. Частично это объясняется несовершенством механизмов и процедур оптового и розничного рынков электрической энергии, а также рынка мощности, разработка которого не завершена [5].

Для оценки эффективности использо-

вания ВЭУ в России проведем анализ ВЭУ установленных в Якутии. Якутия заселена слабо и неравномерно, 64% населения проживают в городах (посёлках городского типа) и 36% – в сельской местности. Низкая плотность населения определяет преобладающий децентрализованный способ энергообеспечения Якутии [3].

Основной поставщик электроэнергии в республике – ОАО «Якутскэнерго», основной комплекса децентрализованного электроснабжения региона является его дочерняя компания ОАО «Сахаэнерго» [2; 3].

В 2010 году в среднем себестоимость 1 кВт·Ч электроэнергии, поставляемой системами ДЭС, составила 17,56 рублей [4]. Для повышения энергоэффективности районов

с децентрализованным электроснабжением начиная с 2007 года были установлены ВЭУ. Техничко-экономические показатели ВЭУ приведены в таблице 1, где: $P_{ВЭУ}$ – мощность ВЭУ; $V_{ср}$ – среднегодовая скорость ветра; $A_{год}$ – годовая выработка электроэнергии ВЭУ; $\Theta_{топ}$ – годовая экономия топлива; $C_{взу}$ – стоимость ВЭУ; $T_{ок}$ – время окупаемости ВЭУ; $\eta_{взу}$ – годовое КПД ВЭУ равно $A_{год}/A_{max}$, где A_{max} – максимальная годовая выработка ВЭУ при работе в номинальном режиме; $C_{кВт}$ – стоимость условного кВт ВЭУ равно $C_{взу}/P_{ВЭУ}$; $\Theta_{год}$ – годовая финансовая экономия от ВЭУ равная $C_{взу}/T_{ок}$; $\Theta_{кВт-Ч}$ – финансовая экономия с 1 кВт·Ч выработанного ВЭУ равная $\Theta_{год}/A_{год}$.

Важным экономическим параметром яв-

Таблица 1

Техничко-экономические характеристики ВЭУ ОАО «Сахаэнерго»

Наименование ДЭС	$P_{ВЭУ}$ кВт	$V_{ср}$ м/с	$A_{год}$ тыс. кВт·Ч	$\Theta_{топ}$ тонн	$C_{взу}$ тыс. руб.	$T_{ок}$ лет	$\eta_{взу}$ %	$C_{кВт}$ тыс. руб./кВт	$\Theta_{год}$ тыс. руб./год	$\Theta_{кВт-Ч}$ руб./ кВт·Ч
Анабарский РЭС										
Саскылах	250	6,98	220,7	35,3	8125	11,5	10,08	32,5	706,520	3,201
Юрюнг-Хая	100	6,43	69,0	11,0	3750	17,0	7,88	37,5	220,588	3,196
Булунские ЭС										
Быков Мыс	50	7,92	99,0	19,8	2125	5,4	22,60	42,5	393,519	3,975
Кюсюр	100	8,00	132,9	21,3	3750	8,8	15,17	37,5	426,136	3,206
Найба	70	8,00	142,9	28,6	2975	5,2	23,30	42,5	572,115	4,004
Намы	50	7,92	99,0	19,8	2125	5,4	22,60	42,5	393,519	3,975
Сиктях	30	7,48	63,6	12,7	1275	5,0	24,20	42,5	255,000	4,009
Таймылыр	50	7,92	99,0	19,8	2125	5,4	22,60	42,5	393,519	3,975
Тикси	750	8,78	762,5	122,0	18750	7,7	11,61	25,0	2435,065	3,194
Усть-Оленек	10	6,90	16,7	3,3	425	6,4	19,08	42,5	66,406	3,976
Нижнеколымский РЭС										
Андрюшкино	100	6,54	72,6	11,6	3750	16,1	8,29	37,5	232,919	3,208
Колымское	100	6,54	72,6	11,6	3750	16,1	8,29	37,5	232,919	3,208
Походск	20	6,06	22,6	4,5	850	9,4	12,90	42,5	90,426	4,001
Депутатский	1000	8,12	804,2	128,7	25000	9,7	9,18	25,0	257,732	3,205
Казачье	100	6,88	84,5	13,5	3750	13,9	9,65	37,5	269,784	3,193
Нижнеянк	250	7,07	229,3	36,7	8125	11,1	10,47	32,5	731,982	3,192
Сайылык	100	6,88	84,5	13,5	3750	13,9	9,65	37,5	269,784	3,193
Тумат	30	6,38	39,5	7,9	1275	8,1	15,03	42,5	157,407	3,984
Усть-Куйга	250	7,07	229,3	36,7	8125	11,1	10,47	32,5	731,982	3,192
Усть-Янск	30	6,38	39,5	7,9	1275	8,1	15,03	42,5	157,407	3,984
Хайыр	30	6,38	39,5	7,9	1275	8,1	15,03	42,5	157,407	3,984
Юкагир	10	6,00	11,0	2,2	425	9,7	12,56	42,5	43,814	3,983

ляется $T_{ок}$ определим его зависимость от $V_{ср}$. Для этого необходимо знать $C_{кВт}$, $\eta_{вэу}$, $\mathcal{E}_{кВтч}$. Найдем зависимость $C_{кВт}(P_{вэу})$. Из графика на рис. 1 видно, что при увеличении $P_{вэу}$ уменьшается $C_{кВт}$. Затем определим $\eta_{вэу}(V_{ср})$ с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Из рис. 2 видно, что ВЭУ меньшей мощности при одинаковом $V_{ср}$ имеет больший $\eta_{вэу}$, чем ВЭУ большей мощности. С технической точки зрения это можно объяснить тем, что ВЭУ большей мощности имеет более инерционное ветроколесо и больший момент страгивания электрогенератора.

Определим $\mathcal{E}_{кВтч}(V_{ср})$ с помощью МНК.

Как видно у ВЭУ малой и средней мощности экономия с 1 кВт·ч больше, чем у ВЭУ большой мощности это объясняется тем, что техническое обслуживание для них обходится дешевле, из-за отсутствия надобности применения более дорогостоящих техники, обслуживающего персонала, комплектующих, а также практически не меняется при изменении $V_{ср}$. Это объясняется тем, что необходимость обслуживания мало зависит от времени прошедшем с момента последнего обслуживания, и больше зависит от количества выработанной электроэнергии. С помощью полученных ранее параметров можно спрогнозировать сроки окупаемости ВЭУ, устанавливаемых в Якутии. Формула срока окупаемости в этом случае имеет следующий вид

$$T_{ок} = \frac{C_{вэу}}{\mathcal{E}_{год}} = \frac{C_{кВт} \cdot P_{вэу}}{\mathcal{E}_{кВтч} \cdot \left(\frac{\eta_{вэу}}{100}\right) \cdot P_{вэу} \cdot 8760}$$

Построим графики $T_{ок}(V_{ср})$ для ВЭУ различной мощности (рис. 3). Очевидно, что ВЭУ малой мощности при одинаковой $V_{ср}$ имеют меньший Ток, чем ВЭУ большей мощности.

Для полного анализа необходимо учесть финансовые показатели и риски, наиболее вероятны: экономический (производственный, рыночный, инвестиционный, коммерческий), экологический.

Для этих расчетов целесообразно использовать величину $RRR = 10\%$, применяемую компанией «Energy-Wind» (один из крупнейших зарубежных поставщиков реновированных ВЭУ). Так как срок службы реновированного ВЭУ составляет 15–20 лет, то время инвестиционного проекта будет рассчитываться для 15 и 20 лет позитивного и негативного исхода [10].

Предполагается, что $\mathcal{E}_{год}$ с течением времени будет одинаков, поскольку спрогнозировать её изменение затруднительно, так как с одной стороны цена на топлива растет, а с другой ведутся меры по повышению энергоэффективности. Очевидно, что это является грубым допущением. Однако в рассматриваемом случае оно представляется допустимым.

Как видно из таблицы 2 при $RRR = 10\%$ 12 из 22 ВЭУ имеют $DPP > 20$ лет. Также

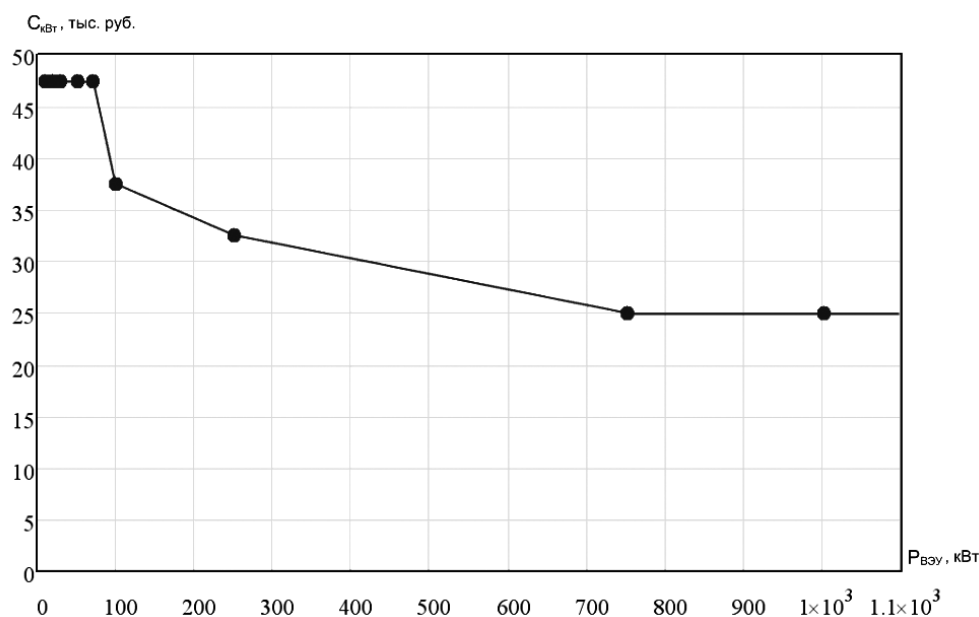


Рис. 1. Зависимость стоимости условного кВт ВЭУ от мощности ВЭУ

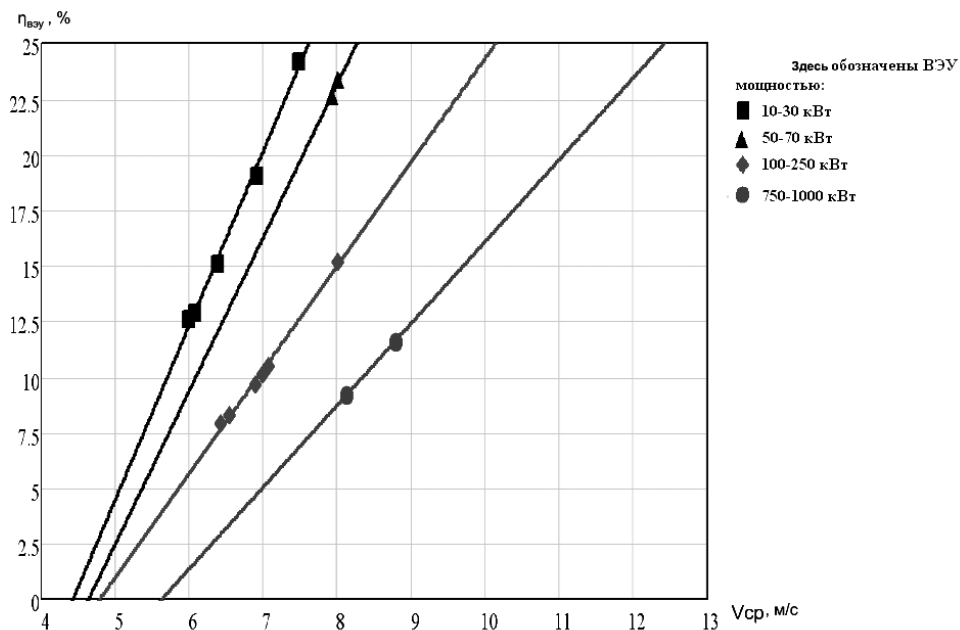
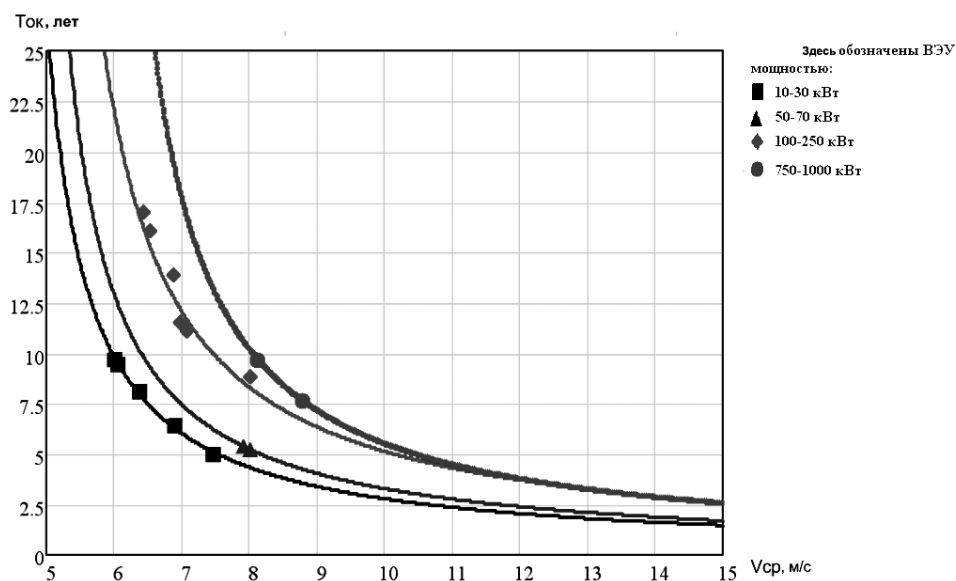


Рис. 2. Зависимость КПД ВЭУ от средней скорости ветра

Таблица 2

Функции КПД и экономии с одного кВт-Ч для ВЭУ различной мощности

$P_{\text{ВЭУ}}, \text{ кВт}$	$\eta_{\text{ВЭУ}}(V_{\text{ср}}), \%$	$\mathcal{E}_{\text{кВтЧ}}(V_{\text{ср}})$
10–30	$-34,738 + 7,844 * V_{\text{ср}}$	$3,972 + 0,002572 * V_{\text{ср}}$
50–70	$-32,021 + 6,901 * V_{\text{ср}}$	$3,972 + 0,002572 * V_{\text{ср}}$
100–250	$-22,375 + 4,673 * V_{\text{ср}}$	$3,197 + 0,000306 * V_{\text{ср}}$
750–1000	$-20,716 + 3,682 * V_{\text{ср}}$	$3,197 + 0,000306 * V_{\text{ср}}$

Рис. 3. График $T_{\text{ок}}(V_{\text{ср}})$, зависимость срока окупаемости от средней скорости ветра

видно, что все ВЭУ имеют IRR не превышающий 20%, и лишь 5 из 22 ВЭУ имеют $IRR > 15\%$. Также следует учитывать показатель PI. По рекомендации С. Д. Фурты данный показатель должен быть не менее 1,2 [11]. При положительном стечении обстоятельств под данный критерий попадают, только 5 из 22 ВЭУ.

Подобные проекты очень сильно подвержены экологическим рискам, одним из них является ветер. Для анализа построим графики $PI(V_{cp})$, $IRR(V_{cp})$, $NPV(V_{cp})$ (для анализа рассматриваются показатели для $t = 20$ лет)

Формула расчета NPV имеет следующий вид:

$$NPV = -C_{ВЭУ} \cdot \varepsilon_{кВт\cdotч} \cdot \left(\frac{\eta}{100}\right) \cdot P_{ВЭУ} \cdot 8760 \cdot S_{20}$$

Показательна относительная величина $NPV_{кВт} = NPV/P_{кВт}$. Построим графики $NPV_{кВт}(V_{cp})$, $IRR(V_{cp})$ и $PI(V_{cp})$. Очевидно, что все приведенные технико-экономические параметры находятся в тесной взаимосвязи друг от друга и зависят от изменения V_{cp} . Отклонение данных таблиц 1 и 2 от построенных графиков имеет место по причинам погрешности измерения скорости ветра, изменения годовой повторяемости скоростей ветра в зависимости от расположения ВЭУ, различного состояния энергосетей и эффективности ДЭС в месте установки ВЭУ, различных транспортных расходов и т. д.

Пример Якутии показывает сложность

использования ВЭУ для повышения энергоэффективности районов с децентрализованным электроснабжением. По приведенным графикам видно, что ВЭУ становятся выгодными при $V_{cp} > 7$ м/с, а для районов, где нет проблемы с выделением площади для размещения ВЭУ, наиболее выгодны установки меньшей мощности, поскольку имеют наибольшие ЭкВт-Ч и $\eta_{ВЭУ}$.

Использование сетевых ВЭУ (подключенных к центральной электросети) на данный момент является практически трудноосуществимым, поскольку юридически не проработаны подключение и эксплуатация. Это наглядный пример, сложившейся в России ситуации, когда неадекватность законодательных и других нормативных актов является главным тормозом технологической модернизации страны.

По нашему мнению для развития ветроэнергетики в России необходимо техническое усовершенствование предлагаемых ветрогенераторов по следующим направлениям: повышение КПД ветроколеса, возможность эксплуатации ВЭУ при экстремальных температурах крайнего севера, снижение стоимости установки и сервисного обслуживания. Для распространения сетевых ВЭУ необходимо улучшение правового обеспечения, а именно: возможность бесплатного подключения ВЭУ к электросети, сбыт всех излишков электроэнергии вырабатываемых ВЭУ и тарификация продаваемой электроэнергии. При этом

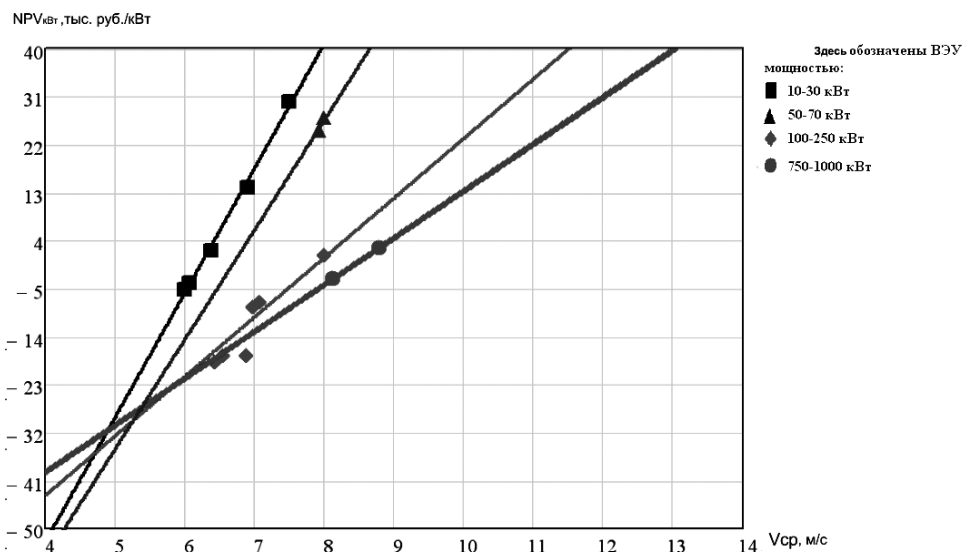
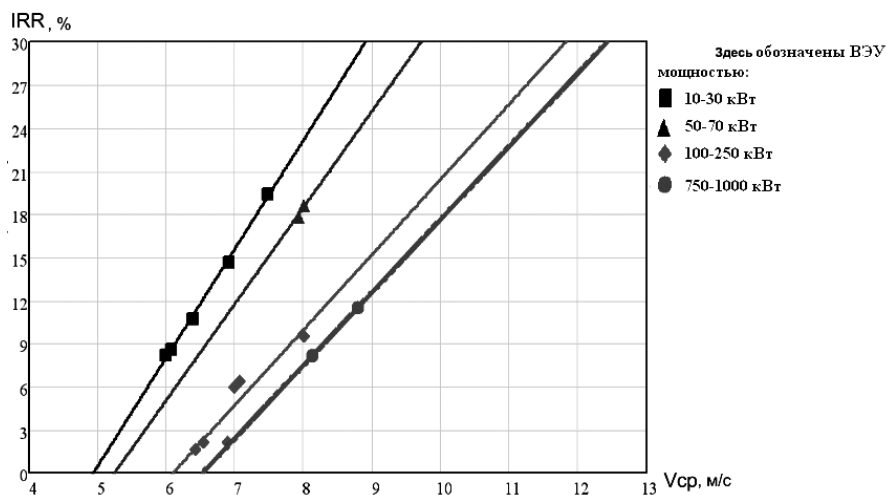


Рис. 4. График $NPV_{кВт}(V_{cp})$ зависимость NPV на кВт от средней скорости ветра

Таблица 3

Основные финансовые показатели ВЭУ

Наименование ДЭС	$P_{ВЭУ}$ кВт	$C_{ВЭУ}$ тыс. руб.	$T_{ок}$ лет	$\mathcal{E}_{год}$ тыс. руб./год	DPP при RRR = 10%	NPV при $t = 15$ лет RRR = 10%	NPV при $t = 20$ лет RRR = 10%	IRR при $t = 15$ лет	IRR при $t = 20$ лет	PI при $t = 15$ лет RRR = 10%	PI при $t = 20$ лет RRR = 10%
Анабарский РЭС											
Саскылах	250	8125	11,5	706,522	>20	-2751,1	-2110,0	3,521	5,967	0,6614	0,7403
Юрюнг-Хая	100	3750	17,0	220,588	>20	-2072,2	-1872,0	0,000	1,600	0,4474	0,5008
Булунские ЭС											
Быков Мыс	50	2125	5,4	393,519	8,2	868,137	1225,25	16,69	17,821	1,4085	1,5766
Кюсюр	100	3750	8,8	426,136	>20	-508,78	122,06	7,550	9,520	0,8643	0,9675
Найба	70	2975	5,2	572,115	7,7	1376,6	1895,7	17,524	18,596	1,4627	1,6372
Намы	50	2125	5,4	393,519	8,2	868,137	1225,25	16,69	17,821	1,4085	1,5766
Сиктях	30	1275	5,0	255,000	7,3	664,6	896,0	18,415	19,425	1,5212	1,7027
Таймылыр	50	2125	5,4	393,519	8,2	868,137	1225,25	16,69	17,821	1,4085	1,5766
Тикси	750	18750	7,7	2435,065	15,4	-228,7	1981,1	9,786	11,520	0,9878	1,1057
Усть-Оленек	10	425	6,4	66,406	10,7	80,0893	140,352	13,188	14,601	1,1885	1,3302
Нижнеколымский РЭС											
Андрюшкино	100	3750	16,1	232,919	>20	-1978,4	-1767,0	0,000	2,161	0,4724	0,5288
Колымское	100	3750	16,1	232,919	>20	-1978,4	-1767,0	0,000	2,161	0,4724	0,5288
Походск	20	850	9,4	90,426	>20	-162,2	-80,152	6,504	8,592	0,8092	0,9057
Депутатский	1000	25000	9,7	2577,320	>20	-5396,7	-3057,8	6,019	8,163	0,7841	0,8777
Казачье	100	3750	13,9	269,784	>20	-1978,4	-1767,0	0,000	2,161	0,4724	0,5288
Нижнеянк	250	8125	11,1	731,982	>20	-2557,5	-1893,2	4,024	6,407	0,6852	0,7670
Сайылык	100	3750	13,9	269,784	>20	-1978,4	-1767,0	0,000	2,161	0,4724	0,5288
Тумат	30	1275	8,1	157,407	17,4	-77,8	65,1	8,917	10,741	0,9390	1,0511
Усть-Куйга	250	8125	11,1	731,982	>20	-2557,5	-1893,2	4,024	6,407	0,6852	0,7670
Усть-Янск	30	1275	8,1	157,407	17,4	-77,8	65,1	8,917	10,741	0,9390	1,0511
Хайыр	30	1275	8,1	157,407	17,4	-77,8	65,1	8,917	10,741	0,9390	1,0511
Юагир	10	425	9,7	43,814	>20	-91,747	-51,987	6,019	8,163	0,7841	0,8777

Рис. 5. График $IRR(V_{cp})$ зависимость IRR от средней скорости ветра

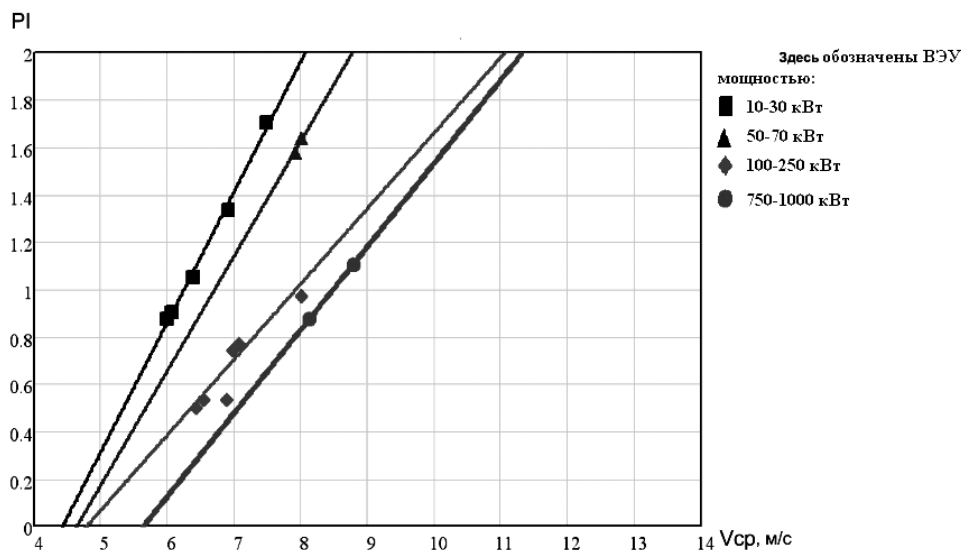


Рис. 6. График $IRR(V_{ср})$ зависимость IRR от средней скорости ветра

следует учитывать, что сетевая ВЭУ имеет меньшую стоимость и наиболее проста в эксплуатации.

Литература

1. Энергетика в глобальном мире: сб. тезисов докладов первого международного научно-технического конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2010. – 448 с.

2. ОАО АК «Якутскэнерго» – флагман энергетики Дальневосточного региона России [Электронный ресурс] / Сайт ОАО АК «Якутскэнерго». – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.yakutskenergo.ru>, свободный (23.11.2010). – Загл. с экрана.

3. Парников Н. М. Повышение энергетической эффективности комплексов децентрализованного электроснабжения на примере Республики Саха (Якутия). Автореферат. – Томск, 2009.

4. Модернизация для стабильности [Электронный ресурс] / Сайт ОАО АК «Якутскэнерго». – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.yakutskenergo.ru>, свободный (23.11.2010). – Загл. с экрана.

www.yakutskenergo.ru/news/press/?id=1997, свободный (23.11.2010). – Загл. с экрана.

5. Кулаков А. Ветроэнергетика в России: проблемы и перспективы развития. // Energy Fresh. – 2010. – №2 (сентябрь).

6. Пармухина Е. Рынок ветроэнергетики. // Электротехнический рынок. – 2010. – №1–2. [Электронный ресурс] / Официальный сайт журнала «Электротехнический рынок». – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://market.elec.ru/nomer/29/gynok-vetroenergetiki/>, свободный. – Загл. с экрана.

10. Презентация «Перспективы ветроэнергетики» [Электронный ресурс] / Сайт компании «Energy-Wind». – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://energy-wind.ru/img/presentation.pdf>, свободный (14.11.2010). – Загл. с экрана.

11. Фурта С. Д. Финансовый анализ проектов [Электронный ресурс] / Открытый инновационный университет. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://oiu.ru/lecture/35>, свободный (17.11.2010). – Загл. с экрана.

Поступила в редакцию

12 ноября 2010 г.



Кирилл Юрьевич Соломенцев – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» ЮРГТУ (НПИ). Автор 35 печатных работ, соавтор 7 изобретений и полезных моделей.

Kirill Yurievich Solomentsev – Ph.D., candidate of technics, docent of SRSTU (NPI) «Automation and Remote Control» department. Author of 35 publications, co-author of 7 inventions and utility models.

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
132 Prosveshcheniya st., 346428, Novocherkassk, Rostov reg., Russia
Тел.: +7 (908) 51-18-931; e-mail: sol_kir@mail.ru



Олег Юрьевич Белый – студент 5 курса факультета Информационных технологий и управления ЮРГТУ (НПИ), специальность «Управление и информатика в технических системах». Руководитель студенческого исследовательского проекта «Ветрогенератор нового поколения».

Oleg Yurievich Belyi – fifth-year student of SRSTU (NPI) faculty of Information Technologies and Management, «Automation and Remote Control» department. Head of students' research project «New Generation of Wind Generators». Author's research specialty is «Management and Informatics for Technical Systems».

353411, г. Анапа, пос. Су-Псех, ул. Тупик Северный, д. 7
7 Tupik Severniy st., 353411, Su-Psekh, Anapa, Krasnodarskiy kr., Russia
Тел.: +7 (918) 53-77-539; e-mail: olegbelyi@yandex.ru



Екатерина Петровна Севостьянова – студентка 4 курса Физико-математического факультета ЮРГТУ (НПИ), специальность «Прикладная математика в экономике». Участник студенческого исследовательского проекта «Ветрогенератор нового поколения».

Yekaterina Petrovna Sevostyanova – fourth-year student of SRSTU (NPI) faculty of physics and mathematics, «Applied Mathematics» department. Participant of students' research project «New Generation of Wind Generators». Author's research specialty is «Applied Mathematics for the Economics».

346175, Ростовская обл., Верхнедонской р-н, х. Заикинский, ул. Заикинская, д. 94
94 Zaikinskaya st., Zaikinskiy kh., 346175, Verkhnedonskoy r., Rostov reg., Russia
Тел.: +7 (960) 46-71-059; e-mail: SevostyanovaKate@yandex.ru