

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

УДК 62-533.6

С.В. Иносов, Л.Г. Соболевская, О.В. Чернявский

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ЖИЛЬЯ

Методами статистического моделирования исследуется энергетическая эффективность автономного автоматизированного ветроэлектрического генератора малой мощности для индивидуального жилья в условиях Крыма

Ключевые слова: индивидуальный ветрогенератор, энергетическая эффективность, статистическое моделирование.

Постановка проблемы

Глобальные потребности в энергии непрерывно растут, но в скором времени эта тенденция должна столкнуться с исчерпанием мировых запасов нефти, что может породить энергетический кризис. В последние годы большие надежды, в смысле решения глобальной энергетической проблемы, возлагаются на альтернативные источники энергии и новейшие технологии. Ветряные электростанции с некоторых пор стали символом альтернативной и «экологичной» энергетики. Открытым остается вопрос энергетической и экономической эффективности ветрогенераторов в различных условиях эксплуатации по сравнению с традиционными источниками электроэнергии.

Анализ последних исследований и публикаций

В связи с либерализацией экономики и индивидуализацией социума, в последнее время увеличился интерес к автономным автоматизированным ветрогенераторам, не связанным с электросетью и обслуживающим индивидуальное жилье [1;2].

Цель исследования. Задачей является исследование энергетической и экономической эффективности автоматизированных автономных ветрогенераторов малой мощности методами статистического моделирования.

Идея использовать «даровую» энергию ветра для получения электричества в собственном доме на первый взгляд очень привлекательна. Однако, как ни странно, электричество от домашнего

ветрогенератора оказывается парадоксально дорогим.

С одной стороны, электроснабжение домашнего хозяйства должно соответствовать двум обязательным условиям:

1 – это должен быть переменный ток 220 В частотой 50 Гц;

2 – электропитание должно быть бесперебойным. Ветер – явление непостоянное, и ветряк напрямую не сможет полноценно обеспечивать дом электричеством. Поэтому к затратам на ветрогенератор нужно добавить расходы на громоздкие и дорогие электрические аккумуляторы, накапливающие энергию ветра. Аккумулятор вырабатывает постоянный ток, который должен быть преобразован в переменный. Для этого необходим инвертор, стоимость которого дополнительно увеличивает затраты на получение «бесплатной энергии». Необходимость установки ветрогенератора на высокой мачте также увеличивает затраты.

С другой стороны, все эти дополнительные устройства приводят к потерям энергии при ее хранении и преобразовании.

Представляет интерес вопрос, можно ли добиться энергетической автономности индивидуального жилья за счет использования ветрогенератора, хотя бы в наиболее благоприятных для Украины условиях Крыма, где средняя скорость ветра доходит до 7 м/с (в степи на побережье и на возвышенностях).

Изложение основного материала

В качестве расчетного варианта была выбрана современная ветроэлектрическая установка ВЭУ-М-3/5 [2]. Она соответствует по мощности

предъявляемым требованиям и является типичным представителем в своем классе. Это классический трёхлопастной ветроагрегат с неизменяемым углом установки лопастей, максимальной электрической мощностью 3 кВт, диаметром ветродвигателя 4,6 м и скоростью вращения 500 об/мин. Лопасть особой конструкции выполнена из стеклоуглепластика по специальной технологии, имеет высокий ресурс при малом весе и обеспечивает низкий уровень шума. Мачтовый комплект (труба на растяжках) максимально упрощен и удешевлен (рис. 1).

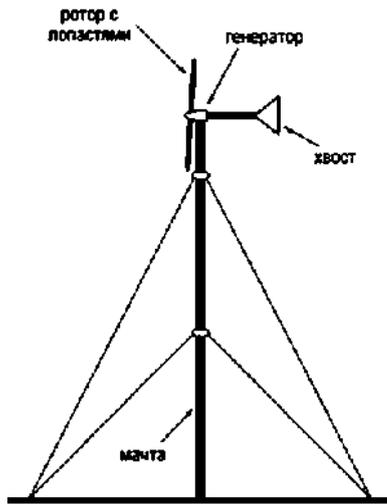


Рис. 1. Типовая конструкция индивидуального ветрогенератора

Основой ВЭУ является разработанный специально для нее низкооборотный безредукторный электрогенератор. По принципу работы – это трехфазный многополюсный синхронный генератор переменного тока с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов.

Мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра и вычисляется по формуле:

$$P = 0,5 \cdot V^3 \cdot S \cdot \rho,$$

где P – мощность ветрового потока; V – скорость ветра; S – площадь поперечного сечения потока; ρ – плотность воздуха.

Зависимость мощности ветрового потока от скорости для ветрогенератора ВЭУ-М-3/5 приведена на рис. 2. На том же рис. 2 приведены паспортные значения электрической мощности ВЭУ-3/5. В рабочем диапазоне скоростей 3 – 11 м/с коэффициент использования мощности ветра ветрогенератором ВЭУ-3/5 составляет около 0,3. Это неплохое значение для ветроустановок. Даже теоретически невозможно достичь коэффициента 0,6, а реально, этот коэффициент еще в 1,5 – 2 раза меньше. При высоких скоростях ветра коэффициент использования уменьшается еще сильнее. Так, при

скорости ветра 20 м/с мощность ветра доходит до 80 кВт (рис. 2), но генератор не в состоянии ее использовать. К сожалению, технически невозможно обеспечить высокий коэффициент использования мощности ветра в столь широком динамическом диапазоне ее изменения (на три порядка).

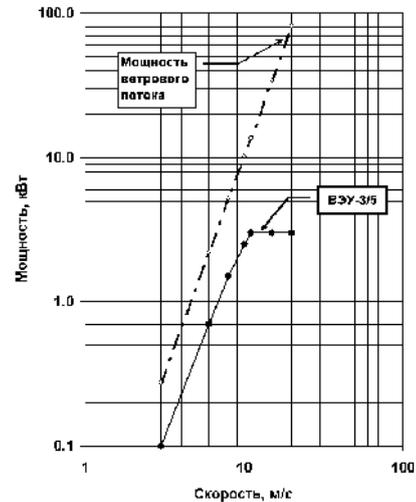


Рис. 2. Зависимость мощности от скорости ветра

Структурная схема установки представлена на рис. 3. Ветрогенератор генерирует трехфазное переменное напряжение. Аккумуляторная батарея заряжается через выпрямитель постоянным током. Этим процессом управляет контроллер заряда. Аккумуляторная батарея нужна для сглаживания случайных колебаний нагрузки и мощности ветра. Регулирование и ограничение скорости вращения ветродвигателя при высоких скоростях ветра (до 40 м/с) достигается за счет электромагнитного торможения генератором. Если при этом аккумулятор уже заряжен, то генерируемая избыточная энергия рассеивается в резистивных трубчатых электронагревателях (ТЭН-ах).

Питание бытовых электроприборов переменным напряжением 220 В, 50 Гц осуществляется от аккумуляторной батареи через инвертор. В случае отсутствия ветра, используется резервный бензиновый электрогенератор. Хотя резервный генератор может непосредственно питать бытовые электроприборы, такой режим энергетически невыгоден. Большую часть времени резервный генератор будет недогружен из-за непостоянства потребляемой мощности. Выгоднее заряжать от него аккумулятор (через выпрямитель). При этом резервный генератор будет включаться изредка и кратковременно, но на полную мощность. В таком режиме ресурс моточасов бензинового генератора и топливо будут использованы наиболее рационально.

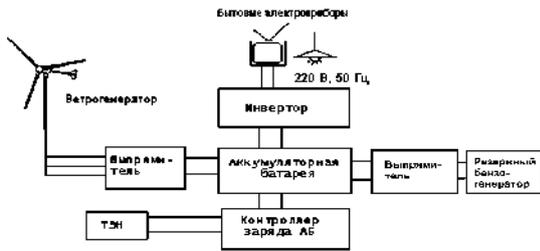


Рис. 3. Структурная схема энергетической установки

Количественно изменчивость ветра характеризуется графиками плотности распределения скорости (рис. 4) и автокорреляционной функции (рис. 5). Имеется ввиду среднечасовая скорость.

Плотность распределения описывает частоты повторяемости различных скоростей. Для ветра характерна сильная несимметрия распределения скорости. Подходящей теоретической моделью считается распределение Вейбулла [1]. На рис. 4 приведено требуемое теоретическое распределение Вейбулла. Параметр α , определяющий несимметрию, принят равным 1,5. Параметр β , определяющий среднее значение, принят равным 7 м/с. Это типичные для крымских ветров значения.

Автокорреляционная функция (рис. 5) отражает относительную стабильность скорости ветра на коротких временных интервалах (если в данный момент штиль, то велика вероятность, что через час тоже будет штиль). Типичное характерное время автокорреляции скорости ветра около 10 часов. На более длинных интервалах взаимозависимость резко ослабляется.



Рис. 4. Плотность распределения скорости ветра

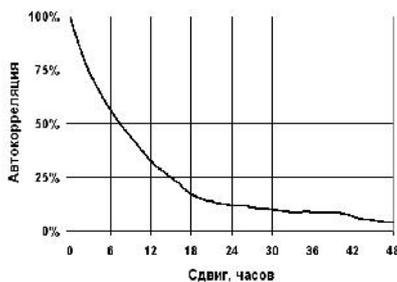


Рис. 5. Автокорреляционная функция скорости ветра

На рис. 6 приведена статистическая модель всей ветроэнергетической установки (включая аккумулятор и резервный бензиновый генератор) в среде программного средства VisSim. Такт моделирования 1 с соответствует 1 часу в реальном времени. Внутренняя структура модели спрятана внутри блока Power Installation Model. Выведены осциллограммы основных переменных модели:

Generator capacity – потенциальная мощность генератора (кВт). Такую мощность генератор может выдавать, если потребитель может ее всю принять. В противном случае реально генерируемая мощность будет меньше.

Power generation – реально генерируемая мощность (кВт). Она расходуется на зарядку аккумулятора и питание потребителя.

Power demand – требуемая потребителем мощность (кВт). Благодаря наличию аккумулятора и резервного генератора, потребность удовлетворяется на 100%, то есть требуемая мощность всегда совпадает с реально потребляемой мощностью. Но потребляемая мощность не совпадает с генерируемой мощностью, так как аккумулятор то заряжается за счет избытка генерируемой мощности, то разряжается для покрытия избыточной потребности.

Charge – заряд аккумулятора (кВт·час). Меняется в пределах от 0 до 20 кВт·час (это предельная емкость аккумулятора).

Power reserve – мощность резервного бензинового генератора (2,5 кВт). Изредка кратковременно включается при слабом ветре, когда заряд аккумулятора приближается к нулю и его нужно подзарядить.

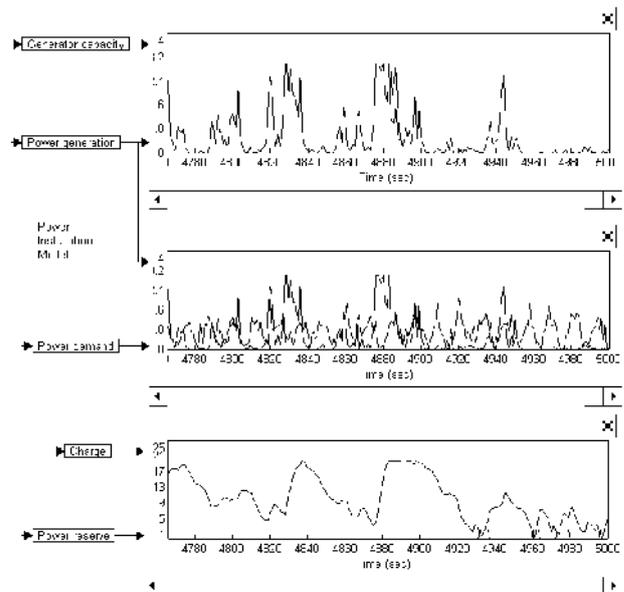


Рис. 6. Статистическое моделирование энергоустановки

Регулировочная характеристика включения резервного генератора приведена на рис. 7. Резервный генератор включается, если заряд аккумулятора падает ниже 2 кВт·час, и выключается, когда заряд аккумулятора доходит до 7 кВт·час.

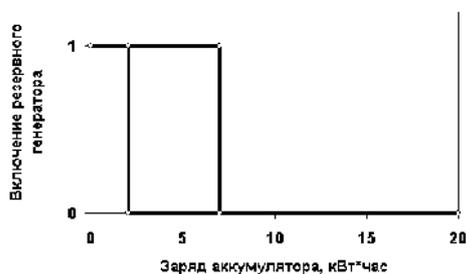


Рис. 7 Регулировочная характеристика включения резервного генератора

Изготовитель ветрогенератора рекомендует использовать аккумулятор с энергетической емкостью 20 кВт·час (суточный запас энергии). Представляет интерес для исследования следующий вопрос. Можно ли обойтись без резервного бензинового генератора, увеличив емкость аккумулятора? На первый взгляд это представляется возможным, ведь средняя потенциальная мощность ветрогенератора превышает среднюю потребность. На рис. 8 приведена зависимость продолжительности включений (ПВ) резервного генератора от емкости аккумулятора (по результатам статистического моделирования). Из графика видно, что ПВ действительно уменьшается с увеличением емкости аккумулятора. Но даже при четырехкратном увеличении емкости до 80 кВт·час (аккумулятор тогда будет весить 2 тонны!) не удастся довести ПВ до нуля. Таким образом, избавиться от резервного бензинового генератора за счет увеличения емкости аккумулятора практически нереально.

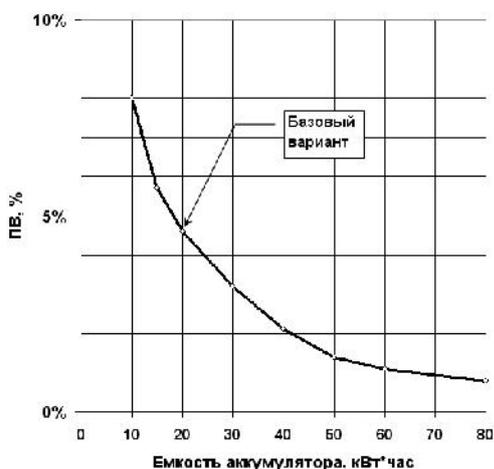


Рис. 8. Зависимость продолжительности включений (ПВ) резервного бензогенератора от емкости аккумулятора

На рис. 9 приведен баланс средних мощностей ветрогенератора по результатам моделирования. Средняя мощность ветрового потока достаточно велика и составляет 12 кВт. Однако текущая мощность ветра изменяется в очень широком динамическом диапазоне, от нуля до сотни киловатт. Практически невозможно создать ветрогенератор, эффективно работающий во всем этом диапазоне мощностей. Поэтому в среднем эффективность использования мощности ветра невысокая. Так, установленная мощность генератора в 4 раза меньше, что составляет всего 3 кВт. Такую максимальную электрическую мощность можно получить при стабильной скорости ветра 11 м/с и согласованной нагрузке. Излишек мощности при больших скоростях ветра просто пропадает. Если учесть нестабильность ветра, то средняя потенциальная электрическая мощность составит 1 кВт (и это при условии, что нагрузка отбирает всю генерируемую мощность). Если учесть еще несогласованность нагрузки (максимумы потребления не соответствуют максимумам производительности), то реальная генерируемая мощность будет еще меньше в 1,6 раза, что составит 0,636 кВт (и это несмотря на наличие аккумулятора). Коэффициент использования установленной мощности генератора составляет всего $0,636/3 = 0,212 = 21\%$. В электрическую энергию превращается всего $0,636/12 = 0,053 = 5,3\%$ от первоначальной энергии ветра.

Резервный бензиновый генератор, изредка включающийся при недостаточном ветре (ПВ=4,6%), добавляет в среднем 0,113 кВт. В результате, получаем среднюю генерируемую мощность 0,75 кВт (рис. 10).

Из-за потерь в аккумуляторе и инверторе, реальная мощность, отдаваемая потребителю, будет еще меньше (в 1,4 раза) и составит 0,54 кВт. Это соответствует среднемесячному потреблению $0,54 \cdot 24 \cdot 30 = 390$ кВт·час электроэнергии. Состав бытовых электроприборов и режим их использования должен быть выбран соответственно. Это скромно, но достаточно комфортно для небольшого индивидуального дома.

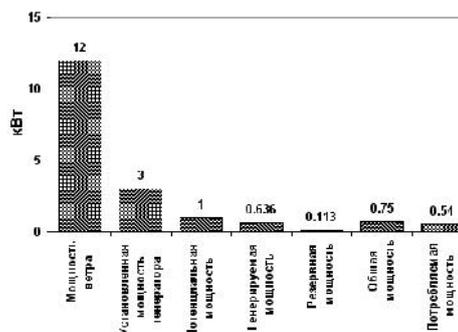


Рис. 9 Баланс средних мощностей

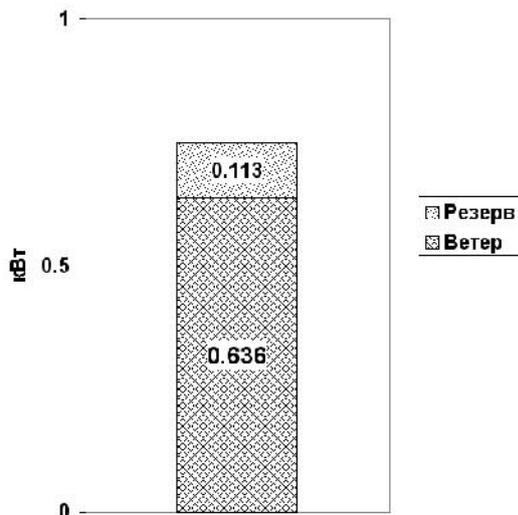


Рис. 10 Средние генерируемые мощности, кВт

Общая месячная плата за электроэнергию 1500 грн складывается из амортизационной платы за установленное оборудование 1080 грн (срок окупаемости принят 10 лет) и платы за бензин для резервного бензогенератора 430 грн (рис. 11).

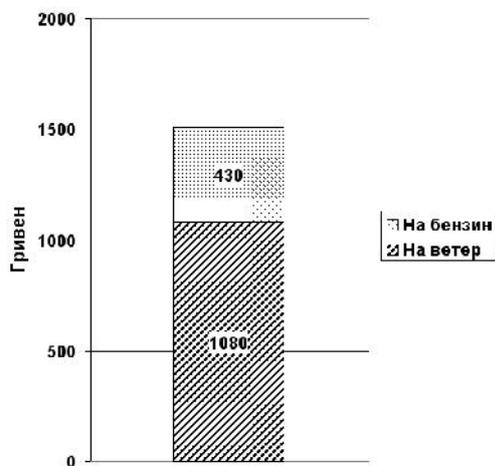


Рис. 11. Месячная плата за электроэнергию, грн

Стоимость одного киловатт-часа электроэнергии будет $1500/389 = 3,88$ грн, что на порядок больше стоимости электроэнергии от сети

Выводы

Энергетическая автономность частного жилья за счет использования автоматизированного ветрогенератора технически достижима, однако плата за автономность оказывается высокой. Стоимость ветро-электро-энергии, даже в условиях Крыма (наилучшие в Украине, средняя скорость ветра до 7 м/с), оказывается на порядок больше, чем при питании от электросети.

Энергетическая эффективность индивидуального ветрогенератора весьма мала. Средняя потребляемая электрическая энергия составляет всего 4.5% от средней мощности ветрового потока, проходящего через ветрогенератор, и 18% от установленной мощности электрогенератора.

Основным фактором, мешающим увеличить энергетическую эффективность ветрогенератора, является случайная изменчивость мощности ветрового потока в большом динамическом диапазоне (на три порядка).

Рекомендуется использовать ветрогенератор с диаметром лопастей 4,5 м, скоростью вращения 500 об/мин, высотой мачты 10 м, безредукторным синхронным многополюсным генератором с постоянными магнитами мощностью 3 кВт, аккумуляторную батарею энергоемкостью 20 кВт·час, массой 500 кг, резервный бензогенератор на 2,5 кВт, инвертор на 4,5 кВт. Такая установка обеспечит среднее потребление электроэнергии 390 кВт·час в месяц по цене 3,88 грн за киловатт·час.

За расчетный срок окупаемости 10 лет придется три раза сменить бензогенератор и один раз аккумуляторную батарею. Работа самого ветрогенератора предполагается безаварийной и не требующей техобслуживания.

Без резервного бензогенератора невозможно обеспечить бесперебойное снабжение электроэнергией даже при четырехкратном увеличении емкости аккумуляторной батареи от рекомендуемой. Следовательно реально достижима лишь автономность от электросети, но не от поставок углеводородного топлива.

Список литературы

1. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
2. Ветроустановка ВЭУ-М, описание, цены. ООО «СТРЕЛА», РФ, Московская область, г. Дубна, проспект Боголюбова, д. 26, Сайт: www.strela.punkt.ru

Статья поступила в редколлегию: 1.12.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.В Мислович, зав. научным отделом Института электродинамики НАН Украины, Киев.