

УДК 621.311.68

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ  
ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в локальных системах электроснабжения. Предложен критерий выбора оптимального сочетания ВИЭ – эксплуатационный риск электроснабжения потребителей (ЭРЭП), учитывающий случайный характер изменения погодных условий. Разработаны методика расчета ЭРЭП, основанная на применении теории портфельного анализа, и методика выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом ЭРЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госконтракт № 16.516.11.6114 от 25.08.2011).

*Ключевые слова:* возобновляемые источники энергии, эксплуатационный риск электроснабжения потребителей, теория портфельного анализа, портфель ВИЭ.

Развитие малой распределенной энергетики (МРЭ) является одним из приоритетных направлений энергетической стратегии России на период до 2030 года [1]. Технической единицей МРЭ являются локальные энергосистемы – изолированные системы электроснабжения с генерирующими установками, расположенными в непосредственной близости от потребителя. В качестве генерирующих установок целесообразно и наиболее эффективно использовать энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Как правило, основными критериями выбора ВИЭ являются: развиваемая мощность, стоимость вырабатываемой электроэнергии, размеры и стоимость применяемых энергоустановок, доля замещения углеводородного топлива, расстояние от ВИЭ до сетей централизованного электроснабжения.

Однако перечисленные критерии не учитывают основной недостаток возобновляемой энергии – ее непостоянство. Выработка электроэнергии солнечными и ветроэнергетическими установками сильно зависит от погодных условий, изменение которых имеет случайный характер. Поэтому в локальных энергосистемах с ВИЭ присутствуют риски электроснабжения потребителей, связанные с непостоянством энергоносителя. Последствия от данных рисков заключаются в высокой вероятности нарушения электроснабжения потребителей.

Таким образом, объектом исследований являются локальные системы электроснабжения с ВИЭ. Цель исследований заключается в разработке новой методики выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом случайного характера изменения погодных условий.

В процессе исследований решаются следующие задачи:

- 1) анализ рисков в системах электроснабжения с ВИЭ;
- 2) разработка методики расчета эксплуатационного риска электроснабжения;
- 3) разработка методики выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом эксплуатационного риска электроснабжения потребителей.

Необходимость создания такой методики заключается в том, что при одинаковой суммарной установленной мощности и стоимости различные сочетания энергоустановок на основе ВИЭ могут иметь различный эксплуатационный риск электроснабжения. Методики расчета эксплуатационного риска электроснабжения при использовании ВИЭ отсутствуют.

### Анализ рисков в системах электроснабжения с ВИЭ

Проведен анализ рисков, характерных для локальных систем электроснабжения с ВИЭ. В результате выделены две группы: систематические риски и несистематические риски. Систематическому риску в равной степени подвержены все системы электроснабжения. Его нельзя исключить. Примерами систематических рисков являются: законодательные, финансовые, политические риски и др. Несистематический риск является собственным для каждой конкретной системы электроснабжения. К несистематическим рискам относятся: риски непостоянства энергоносителя, риски наличия потребителей, риски спроса и предложения. Величину несистематических рисков можно уменьшить при проектировании системы электроснабжения путем выбора оптимального сочетания ВИЭ.

Наиболее опасным для потребителей является риск непостоянства энергоносителей. Зависимость выработки электроэнергии ВИЭ от случайного характера изменения погодных условий может привести к дополнительным затратам на углеводородное топливо; остановке технологического процесса; потере информации; финансовому ущербу.

Для учета непостоянства возобновляемой энергии авторами предлагается ввести новый критерий – *эксплуатационный риск электроснабжения потребителей (ЭРЭП)*. ЭРЭП определяет вероятность неполучения потребителями требуемой мощности вследствие случайного характера изменения погодных условий. При выборе оптимального сочетания ВИЭ в локальной энергосистеме, необходим расчет как основных критериев, так и ЭРЭП.

### Разработка методики расчета ЭРЭП

Эксплуатационный риск электроснабжения при использовании ВИЭ по основным признакам тождественен экономическому риску доходности ценных бумаг. В экономике для снижения риска доходности используется теория портфельного анализа Марковица [2]. Математическая модель формирования оптимального портфеля ценных бумаг основана на положениях теории вероятности и математической статистики. Наряду с простотой и наглядностью, портфельный анализ решает задачу минимизации риска при заданных условиях. Поэтому для расчета ЭРЭП предлагается использовать методы теории портфельного анализа. Применение аппарата портфельного анализа для расчета ЭРЭП в системе электроснабжения с ВИЭ представлено на рис. 1.

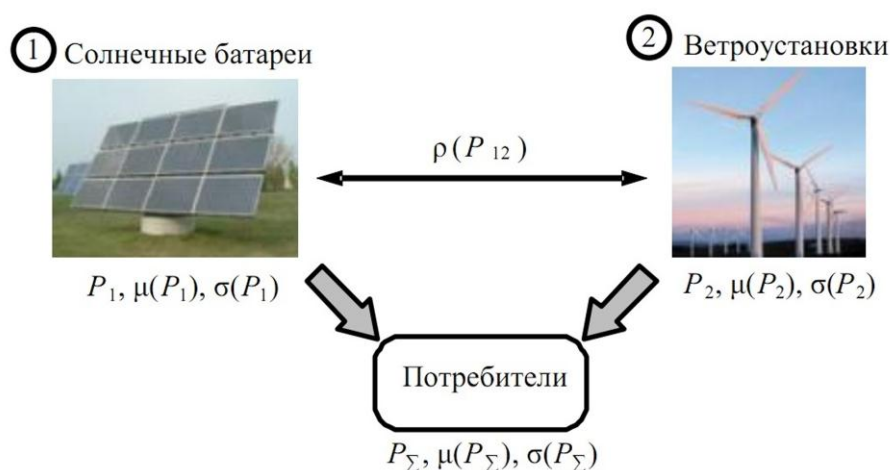


Рис. 1. Применение аппарата портфельного анализа для расчета ЭРЭП

Основные положения теории портфельного анализа для расчета ЭРЭП заключаются в следующем:

1. Портфелем ВИЭ является сочетание возобновляемых источников энергии, приме-

няемых в системе электроснабжения. Портфель может состоять из установок одного вида, например, – только ветроустановки или солнечные батареи. Также в одном портфеле ВИЭ могут применяться разнородные ВИЭ – сочетание ветроустановок и солнечных батарей.

2. Основным показателем портфеля ВИЭ является вырабатываемая мощность  $P_i$  ВИЭ. В силу зависимости от погодных условий,  $P_i$  можно считать случайной величиной.

3. Статистические свойства портфеля ВИЭ определяются математическим ожиданием  $\mu(P_i)$  и стандартным отклонением  $\sigma(P_i)$  вырабатываемой мощности.  $\mu(P_i)$  определяет прогнозируемое значение вырабатываемой мощности, а  $\sigma(P_i)$  является мерой разброса значений вырабатываемой мощности.

4. При расчете ЭРЭП допускается гипотеза, что распределение вырабатываемой мощности каждого источника энергии соответствует нормальному закону [3]. Функция нормального закона распределения вырабатываемой мощности ВИЭ представлена на рис. 2.

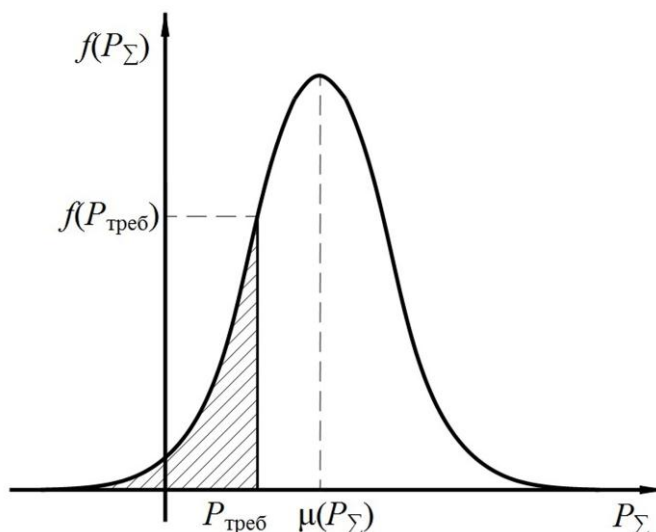


Рис. 2. Нормальный закон распределения вырабатываемой мощности ВИЭ

5. ЭРЭП определяется как вероятность того, что суммарная мощность портфеля ВИЭ окажется меньше требуемой мощности потребителей:

$$R = P_{\Sigma} \leq P_{\text{треб}},$$

где  $R$  – эксплуатационный риск электроснабжения потребителей;  $P_{\Sigma}$  – суммарная вырабатываемая мощность портфеля ВИЭ;  $P_{\text{треб}}$  – требуемая мощность потребителей.

На рис. 2 эксплуатационный риск равен площади заштрихованной области.

6. При расчете ЭРЭП необходимо учитывать взаимосвязь между вырабатываемыми мощностями разнородных ВИЭ (например, ветроустановка – солнечная батарея) с помощью коэффициента корреляции  $\rho(P_{ij})$ , где  $P_i$  – вырабатываемая мощность ветроустановки;  $P_j$  – вырабатываемая мощность солнечной батареи.

$\rho(P_{ij})$  между ВИЭ одного вида (например, ветроустановка – ветроустановка) равен 1. Если коэффициент корреляции равен 0, значит вырабатываемые мощности установок ВИЭ не связаны между собой. Отрицательный коэффициент корреляции означает, что вырабатываемые мощности установок ВИЭ изменяются в противофазе.

Например, для многих территорий в противофазе находятся солнечное излучение и скорость ветра. При сильном ветре, как правило, отсутствует солнце, а в солнечный день часто бывает слабый ветер. Совместное использование разнородных ВИЭ (ветроустановка – солнечная батарея), как правило, позволяет снизить вероятность нарушения электроснабжения потребителей.  $\rho(P_{ij})$  в методике расчета ЭРЭП учитывает совместное использование ветроустановок и солнечных батарей.

Разработана методика расчета ЭРЭП [4]. Алгоритм расчета ЭРЭП:

1. Чтобы определить значение  $R$ , необходимо рассчитать  $\mu(P_i)$ ,  $\sigma(P_i)$  и  $\rho(P_{ij})$ . Поэтому на первом этапе для каждого ВИЭ по начальным данным рассчитываются значения вырабатываемой мощности за год. Начальными данными являются:

- технические характеристики энергоустановок на основе ВИЭ;
- среднесуточная скорость ветра и среднесуточное солнечное излучение для исследуемой местности. Информацию о скорости ветра и солнечном излучении можно взять из архивов метеостанций.

2. Для каждого ВИЭ определяются математическое ожидание и стандартное отклонение вырабатываемой мощности:

$$\mu(P_i) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n}; \quad (1)$$

$$\sigma(P_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \mu(P_i))^2}, \quad (2)$$

где  $n$  – число наблюдений в течение года.

$\mu(P_i)$  и  $\sigma(P_i)$  необходимы для расчета математического ожидания и стандартного отклонения вырабатываемой мощности портфеля ВИЭ.

3. Рассчитываются математическое ожидание и стандартное отклонение мощности портфеля ВИЭ:

$$\mu(P_\Sigma) = \sum_{i=1}^N \mu(P_i); \quad (3)$$

$$\sigma(P_\Sigma) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma(P_i) \sigma(P_j) \rho(P_{ij})}, \quad (4)$$

где  $N$  – число возобновляемых источников энергии.

От величины  $\mu(P_\Sigma)$  и  $\sigma(P_\Sigma)$  зависит величина ЭРЭП.

4. Для расчета ЭРЭП необходимо решить интегральную функцию нормального распределения:

$$R = \int_{-\infty}^A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(P_{\text{порт}})} e^{-\frac{(P_i - \mu(P_{\text{порт}}))^2}{2\sigma(P_{\text{порт}})^2}} dx. \quad (5)$$

Для упрощения расчетов можно перейти к нормированной нормально распределенной случайной величине -  $y$ . Для нормированной нормально распределенной случайной величины:  $\mu = 0$  и  $\sigma = 1$  [5]:

$$y = \frac{P_{\text{треб}} - \mu(P_{\text{порт}})}{\sigma(P_{\text{порт}})}. \quad (6)$$

После расчета  $y$  с помощью специальных таблиц можно перейти к  $R$ .

Конечным результатом (формула (6)) является эксплуатационный риск электроснабжения потребителей, учитывающий случайный характер изменения погодных условий.

### Методика выбора оптимального сочетания возобновляемых источников энергии с учетом ЭРЭП

Разработана методика выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом ЭРЭП [4], заключающаяся в следующем.

1. С учетом требований потребителя (площадь солнечных батарей, высота ветроустановки) определяется перечень энергоустановок ВИЭ, перспективных для использования в

системе электроснабжения. На основе выбранных установок формируются все возможные сочетания ВИЭ (портфели ВИЭ). Примеры возможных сочетаний ВИЭ: ветроустановка – ветроустановка, солнечная батарея – солнечная батарея, ветроустановка – солнечная батарея.

2. Для каждого портфеля ВИЭ определяется вырабатываемая мощность ( $P_{\Sigma}$ ).  $P_{\Sigma}$  сравнивается с  $P_{\text{треб}}$ . Из совокупности портфелей отбираются портфели, выполняющие условие:

$$P_{\Sigma} \geq P_{\text{треб}}$$

3. Задается минимальная стоимость сочетания ВИЭ, которая удовлетворяет потребителя. Из пункта 2 отбираются портфели ВИЭ, стоимость которых не превышает минимального заданного значения.

4. Из портфелей пункта 3 выбирается портфель с наименьшим значением ЭРЭП. Выбранное сочетание ВИЭ является оптимальным для использования в системе электроснабжения.

Разработанная методика выбора ВИЭ использована для исследований энергоэффективности системы электроснабжения базы отдыха, находящейся в сельской местности. В качестве возобновляемых источников энергии рассматривались три модели ветроустановок и две модели солнечных батарей. Информация о скорости ветра и солнечном излучении взята из архивов метеоданных Нижегородской области. Сформированы 62 различных сочетания ВИЭ. Портфели ВИЭ содержат от 2 до 6 установок. По формулам (1)–(6) проведен анализ сочетаний ВИЭ при требуемой мощности потребителей 16 кВт. Для каждого портфеля ВИЭ определены: вырабатываемая мощность (формула (3)), стандартное отклонение (формула (4)) и ЭРЭП (формулы (5), (6)). Расчеты показали, что наиболее оптимальным сочетанием ВИЭ в системе электроснабжения базы отдыха являются четыре ветроустановки и две солнечных батареи.

Основные характеристики оптимального портфеля ВИЭ:

- вырабатываемая мощность – 17,5 кВт;
- стоимость – 3 млн руб.;
- ЭРЭП – 18%.

Для других портфелей со стоимостью не более 3 млн руб. ЭРЭП значительно превышал 18 %.

Также результаты расчета показали, что стоимость ВИЭ и ЭРЭП не зависит друг от друга. Для портфелей ВИЭ с низкой стоимостью могут быть характерны большие значения ЭРЭП. Наименьшее значение ЭРЭП наблюдается у портфелей, состоящих из разнородных ВИЭ (сочетание солнечных батарей и ветроустановок). Таким образом, выбор состава источников по критерию минимальной стоимости не гарантирует высокую надежность электроснабжения потребителей. Для повышения надежности электроснабжения необходимо выбирать сочетание ВИЭ с учетом ЭРЭП.

### Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) проведен анализ рисков в системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии. Для учета влияния случайного характера погодных условий на выработку электроэнергии предложено использовать эксплуатационный риск электроснабжения потребителей (ЭРЭП);

2) разработана методика расчета ЭРЭП. При разработке использованы положения экономической теории портфельного анализа;

3) разработана методика учета ЭРЭП при выборе оптимального сочетания ВИЭ. Учет ЭРЭП позволяет снизить вероятность нарушения электроснабжения потребителей;

4) проведенные расчеты показали, что ЭРЭП снижается при комплексном использовании разнородных источников энергии.

**Библиографический список**

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ № 1715-р от 13 ноября 2009 г.
2. **Касимов, Ю.Ф.** Основы теории оптимального портфеля ценных бумаг / Ю.Ф. Касимов. – М.: Филинь, 1998.
3. **Митяков, С.Н.** Снижение эксплуатационного риска электроснабжения потребителей при одновременном использовании источников энергии разного типа / С.Н. Митяков, Е.Н. Соснина // Арзамас-Н.Новгород: Прогрессивные технологии в технике, экономике, естествознании и образовании: межвузов. сб. статей / НГТУ. Н. Новгород, 2008.
4. **Лоскутов, А.Б.** Разработка технологии эффективного использования возобновляемых источников энергии в локальной системе электроснабжения потребителей. Этап 3: Экспериментальные исследования комплексного использования разнородных источников энергии. - Промежуточный отчет о НИР (ГК от 25.08.2011 №16.516.11.6114) / А.Б. Лоскутов [и др.] / НГТУ. Н. Новгород. 2012. – 301 с.
5. **Хан, Г.** Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969.

*Дата поступления  
в редакцию 10.08.2012*

**E. Sosnina, A. Shalukho**

**TECHNIQUE OF A CHOICE THE OPTIMAL COMBINATION  
OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE LOCAL POWER SUPPLY SYSTEM**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

**Purpose:** Development of a new technique of a choice of an optimum combination of renewable energy sources taking into account the random nature of the change in weather conditions for local power supply systems of consumers.

**Design/methodology/approach:** For the accounting of inconstancy of renewable energy it is offered to introduce a new criterion - the operational risk of consumers electricity (ORCE). The operational risk of consumers electricity is an additional new criterion in selecting the optimal combination of renewable energy sources. For calculation of ORCE it is offered to use methods of the theory of the portfolio analysis.

**Findings:** Risk analysis in power supply systems with renewable energy sources is carried out. ORCE design procedure and the technique of the accounting of ORCE at a choice of an optimum combination of renewable energy sources is developed. Calculations which showed that the operational risk of consumer's electricity decreases at complex use of diverse power sources are carried out.

**Research limitations/implications:** The developed technique of the accounting of ORCE at a choice of an optimum combination of renewable energy sources can be used for design of power effective systems of power supply of various objects.

**Originality/value:** At identical cost various combinations of renewable energy sources can allow various the operational risk of consumers electricity. The accounting of the operational risk of consumer's electricity allows to reduce probability of violation of consumer's power supply. Work is executed with financial support of the Ministry of Education and Science of Russia (the state contract No. 16.516.11.6114 from 25.08.2011).

*Key words:* renewable energy sources, the operational risk of consumer's electricity, the portfolio analysis theory, the renewable energy source portfolio.