

Разработка математической модели общей стоимости комбинированной установки на основе возобновляемых источников энергии

Д.В. Гринько, аспирант, Оренбургский ГАУ

Высокая стоимость оборудования является основным препятствием использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что обуславливает необходимость поиска оптимальной конфигурации системы с максимальной производительностью при минимальных затратах. Нами была поставлена цель – разработать новый подход, позволяющий обеспечить высокое качество решения задачи нахождения общей стоимости комбинированных установок малой и средней мощности на основе ВИЭ, с последующей оптимизацией за счёт многовариантного анализа полученных результатов.

Общая годовая стоимость компонентов комбинированной установки на основе ВИЭ рассчитывается следующим образом [1]:

$$C_{ann,tot,c} = \sum_{c=1}^{Nc} (C_{acap,c} + C_{arep,c} + C_{aop,c} + C_{emissions}), \quad (1)$$

где $C_{acap,c}$ – годовая стоимость капитальных вложений;

$C_{arep,c}$ – годовая стоимость замены компонентов;

$C_{aop,c}$ – годовая стоимость эксплуатации.

Из уравнения 1, используя аддитивный закон суммирования затрат, автором выведена математическая модель расчёта общей годовой стоимости комбинированной установки на основе ВИЭ, состоящей из ветротурбины, солнечной батареи, дизельного генератора, аккумуляторной батареи, централизованной электрической сети, следующим образом:

$$C_{com} = \sum_{w=1}^{Nw} (C_{1,w} + C_{2,w} + C_{3,w}) + \sum_{s=1}^{Ns} (C_{1,s} + C_{2,s} + C_{3,s}) + \sum_{g=1}^{Ng} (C_{1,g} + C_{2,g} + C_{3,g} + C_{4,g}) + \sum_{b=1}^{Nb} (C_{1,b} + C_{2,b} + C_{3,b}) + (C_f + C_{st}) + C_d + C_n + (C_{1,gr} + C_{2,gr} + C_{3,gr} + C_{4,gr}) - C_{5,gr}, \quad (2)$$

где N_w – количество ветротурбин (шт.);

$C_{1,w}$ – вложения в покупку ветротурбин (\$/год);

$C_{2,w}$ – стоимость замены ветротурбин (\$/год);

$C_{3,w}$ – стоимость эксплуатации ветротурбин (\$/год);

N_s – количество солнечных батарей (шт.);

$C_{1,s}$ – вложения в покупку солнечных батарей (\$/год);

$C_{2,s}$ – стоимость замены солнечных батарей (\$/год);

$C_{3,s}$ – стоимость эксплуатации солнечных батарей (\$/год);

N_g – количество дизельных генераторов (шт.);

$C_{1,g}$ – вложения в покупку дизельного генератора (\$/год);

$C_{2,g}$ – стоимость замены дизельного генератора (\$/год);

$C_{3,g}$ – стоимость эксплуатации дизельного генератора (\$/год);

$C_{4,g}$ – стоимость топлива для дизельного генератора (\$/год);

N_b – количество аккумуляторных батарей (шт.);

$C_{1,b}$ – вложения в покупку аккумуляторных батарей (\$/год);

$C_{2,b}$ – стоимость замены аккумуляторных батарей (\$/год);

$C_{3,b}$ – стоимость эксплуатации аккумуляторных батарей (\$/год);

C_f – стоимость доставки (завоза) топлива (\$/год);

C_{st} – стоимость хранения топлива (в нашем случае коэффициент обнуляется из-за отсутствия необходимости хранения топлива) (\$/год);

C_d – стоимость доставки оборудования (\$/год);

C_n – суммарный налог на выбросы вредных веществ (плата за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС) для Оренбургской области) (\$/год);

$C_{1,gr}$ – капитальные вложения в строительство линии электропередач (ЛЭП) за 1 км. (\$/км/год);

$C_{2,gr}$ – стоимость эксплуатации ЛЭП (\$/км/год);

$C_{3,gr}$ – стоимость подключения к сети в случае наличия ЛЭП (\$/год);

$C_{4,gr}$ – стоимость потребляемой энергии от ЛЭП (\$/кВт·ч/год);

$C_{5,gr}$ – стоимость продажи электроэнергии, выработанной от ВИЭ в сеть (в случае принятия в РФ соответствующих законов), (\$/кВт·ч/год).

Учёт коэффициента C_f особенно актуален при завозе топлива в отдалённые районы Севера, что значительно влияет на общую стоимость комбинированных установок, он рассчитывается в виде:

$$C_f = C_p \cdot V, \quad (3)$$

где C_p – цена перевозки одной единицы объёма от поставщика к потребителю (\$);

V – объём перевозки (куб. ед.).

Коэффициент C_d применяется при доставке оборудования в отдалённые районы либо при доставке отсутствующего оборудования из других стран или регионов. В данном случае необходима доставка ветротурбины из Китая, всё остальное оборудование имеется в локальной доступности

и данный коэффициент по отношению к нему не учитывается. Коэффициент C_d рассчитывается следующим образом:

$$C_d = (D_c + D_r) \cdot M, \quad (4)$$

где D_c – цена доставки одной единицы массы по Китаю (\$);

D_r – цена доставки одной единицы массы по России (\$);

M – масса перевозки (ед.).

Недостатком централизованного электроснабжения с экологической точки зрения является наличие вредных выбросов при сжигании условного топлива в месте генерации электроэнергии. Поскольку одной из целей статьи является моделирование децентрализованной, экологически чистой комбинированной установки с практически 100-процентной выработкой энергии от ВИЭ, интеграция с сетью не рассматривается и все коэффициенты, связанные с ней, обнуляются.

Группа учёных под руководством Д.С. Стребкова проанализировала технико-экономические параметры комбинированной солнечно-ветробензиновой установки с использованием программного обеспечения (ПО) «HOMER» для условий Египта. Результаты показали, что себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, выработанной комбинированной установкой, равна \$0,189, выработка электроэнергии от ВИЭ составляла 18 и 81% от бензогенератора [2].

Нами смоделирована комбинированная система электроснабжения части жилого комплекса «Экодолье», расположенного в районе с. Ивановка Оренбургской обл. Концепция создания посёлка, базирующаяся на принципах экономичности,

экологичности и энергоэффективности, делает его идеально подходящим для дальнейшего исследования.

Электрическая нагрузка оказывает самое большое влияние на стоимость и размер узлов установки. Рассматриваемая часть жилого комплекса состоит из 10 домов, предполагаемое потребление электроэнергии приведено в таблице 1.

На основе определённых почасовых значений энергопотребления за 24 часа программное обеспечение «HOMER 2», версия 2.81 [3], сгенерировало суточный профиль нагрузки, представленный на рисунке 1. Симулируя изменчивость нагрузки, чтобы график для каждого дня был уникален, добавлена хаотичность в виде 10% ежедневной и почасовой изменчивости нагрузки.

Определена средняя допускающая задержку нагрузка (требование, которое может быть удовлетворено в определённый период времени, при этом точная синхронизация не важна и существует гибкий график, типичный пример – водяной насос при наполненном резервуаре воды и заряженные аккумуляторные батареи). Как показано на рисунке 2, предполагается, что объём энергопотребления возрастёт с июня по август из-за полива в летний период.

Характер ВИЭ воздействует на режим и экономику энергосистем, так как ресурсы определяют объёмы и синхронизацию выработки энергии. Поэтому детальное и точное моделирование возобновляемых ресурсов является важным элементом проектирования устройства.

Солнечный ресурс. ПО «HOMER 2» генерирует синтезированные почасовые данные солнечного излучения на основе входных данных о ежемесячных

1. Предполагаемое среднесуточное потребление электроэнергии

| Наименование | Мощность, Вт | Время работы (усреднённое), час. | Энергия (из расчёта на 10 домов), Вт·ч/сут |
|---------------------------------------|--------------|----------------------------------|--|
| Энергосберегающая лампа 10 Вт, 10 шт. | 100 | 5 | 5000 |
| Телевизор | 100 | 1 | 1000 |
| Компьютер | 400 | 1 | 4000 |
| Глубинный электронасос | 1500 | 2 | 30000 |
| Холодильник | 150 | 24 | 36000 |
| Итого | 2250 | – | 76000 |

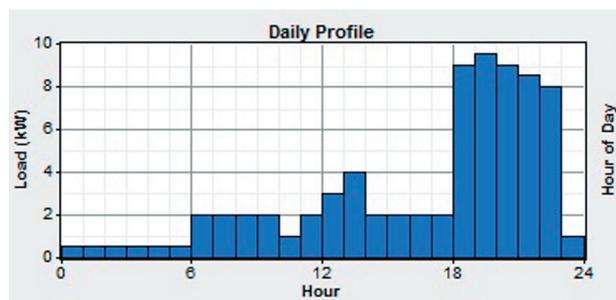


Рис. 1 – Среднесуточный профиль нагрузки, сгенерированный «HOMER 2»

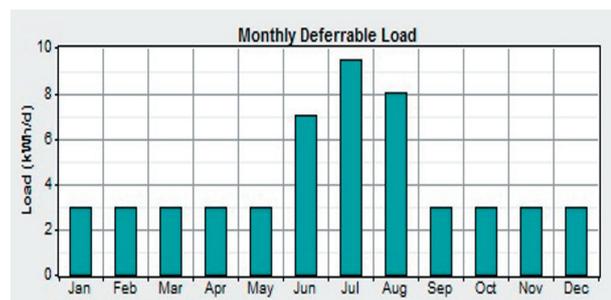


Рис. 2 – Профиль среднегодовой допускающей задержку нагрузки, сгенерированный программным обеспечением «HOMER 2»

солнечных ресурсах с использованием алгоритма Грэхема [4]. Суммы ежемесячной солнечной радиации на горизонтальную поверхность (кВт·ч/м²/сут) внесены из базы данных NASA SSE [5]. Индекс яркости определён ПО «HOMER 2» на основе указанного излучения, часового пояса (+5 GMT), координат (51.71 с.ш.; 55,21 в.д.), результаты приведены в таблице 2. Выходные данные – на основе значений ПО «HOMER 2» строит 8760-часовую базу данных солнечных излучений со статистическими характеристиками, подобными результатам реальных измерений с учётом изменчивости и автокорреляции.

Ветровой ресурс. Среднемесячная скорость ветра на высоте 10 м была взята из характеристики природных условий района изысканий [6]. Если измерение скорости ветра не было произведено на высоте втулки воздушной турбины (в нашем случае 25 м), необходимо установить зависимость скорости ветра от высоты втулки. Это может быть сделано с использованием логарифмического (Eurocode 1, EN 1991-1-4, ДБН В.1.2-2 2006 Нагрузки и воздействия) или степенного закона (СНиП 2.01.07-85, СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия):

$$v(z) = v_{анем} \left(\frac{z}{z_{анем}} \right)^\alpha, \quad (5)$$

где $v_{анем}$ – скорость ветра на уровне расположения анемометра ($z_{анем}$);

α – показатель степени зависит от шероховатости подстилающей поверхности и от самой скорости ветра.

В СНиП 2.01.07-85 используется следующая классификация поверхностей: А – открытые побережья морей, озёр и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра; В – городские территории, лесные массивы и др. местности, равномерно покрытые препятствиями высотой до 10 м; С – городские районы с застройкой зданиями высотой свыше 25 м. Показатели степени для указанных выше типов местности равны: $\alpha_A = 0,16$; $\alpha_B = 0,22$ и $\alpha_C = 0,33$. С использованием уравнения 5 определена скорость ветра на высоте 25 м, результаты представлены в таблице 3.

Для обеспечения электроснабжения согласно расчётным нагрузкам, охарактеризованным выше, предлагается использовать комбинированную электростанцию, которая состоит из компонентов, представленных в таблице 4.

Схема моделируемого комбинированного устройства, сгенерированная при помощи программного обеспечения «HOMER 2» (v2.81), показана на рисунке 3. Результаты моделирования комбинаций узлов устройства представлены в таблице 5.

Оценка исследуемой области показала значительный потенциал ВИЭ. Поскольку для 3-й категории надёжности допустимое число часов отключения в год составляет 72 час. [7], а в си-

2. Среднегодовое солнечное излучение

| Показатель | Месяц | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| | Янв. | Февр. | Март | Апр. | Май | Июнь | Июль | Авг. | Сент. | Окт. | Нояб. | Дек. | Ср.-год. |
| Индекс яркости | 0,448 | 0,514 | 0,569 | 0,545 | 0,565 | 0,559 | 0,563 | 0,559 | 0,555 | 0,494 | 0,467 | 0,443 | 0,545 |
| Излучение, кВт·ч/м ² /сут | 0,990 | 1,880 | 3,390 | 4,660 | 5,990 | 6,440 | 6,220 | 5,200 | 3,790 | 2,140 | 1,180 | 0,800 | 3,565 |

3. Среднемесячная скорость ветра, м/сек

| Показатель | Месяц | | | | | | | | | | | | |
|------------|-------|-------|------|------|-----|------|------|------|-------|------|-------|------|----------|
| | Янв. | Февр. | Март | Апр. | Май | Июнь | Июль | Авг. | Сент. | Окт. | Нояб. | Дек. | Ср.-год. |
| 10 м | 4,5 | 4,6 | 4,2 | 4,3 | 4,3 | 3,7 | 3,4 | 3,4 | 3,7 | 4,0 | 4,0 | 4,1 | 4,0 |
| 25 м | 5,2 | 5,3 | 4,9 | 5,0 | 5,0 | 4,2 | 4,0 | 4,0 | 4,2 | 4,6 | 4,6 | 4,7 | 4,6 |

4. Компоненты комбинированной электростанции

| Наименование | Модель | Мощность, кВт | Цена, \$ | Комментарий |
|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------|---|
| Ветрогенератор | Windelectric-Europe 5000 | 5 кВт | 4765 | Генерирует переменный ток, стартовая скорость ветра 2,0 м/сек, мачта 25 м |
| Солнечная фотоэлектрическая батарея | На основе аморфного кремния | 5–22 кВт | 4600 за 1 кВт | С учётом тенденции снижения цены стоимость замены берётся в количестве 80% от начальных капитальных затрат |
| Инвертор | HYUNDAI | 15 кВт | 1600 | Эффективность инвертора принимается равной 90% |
| | HYUNDAI | 22 кВт | 1800 | |
| Группа аккумуляторных батарей | SURRETTE 6CS25P | 6V, 1156 Ah, 6,94 kWh | 950 | Выбор основан на ключевых материальных свойствах – номинальное напряжение, ёмкость, срок службы, минимальный заряд и эффективность зарядки-разрядки |
| Дизельный генератор | «Азимут» АД 15-T400 | 15 кВт | 5250 | Для исследования рассматривают дизельное топливо с ценами: 0.8, 0.9 и 1 доллар США за литр. Текущая цена составляет 0.9 долл. за л |

5. Возможные комбинации узлов устройства

| Выработка от ВИЭ, % | Ветрогурбина, кВт | Солнечная батарея, кВт | Дизельный генератор, кВт | Аккумуляторная батарея, шт. | Инвертор, кВт | Начальные вложения, \$ | Вложения за 25 лет, включая замену и обслуживание оборудования, стоимость топлива, \$/цену выработанной энергии, \$/кВт·ч \$ | Стоимость доставки оборудования, \$ | Стоимость заезда топлива, \$/год | Итоговые вложения за 25 лет, с учётом платы за НВОС, доставки оборудования и топлива, \$ | Итог. цена выработанной энергии включая Cd, Cf, Cp, \$/кВт·ч | Расход дизтоплива, л/год | Время работы дизельного генератора, час./год |
|---------------------|-------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------|------------------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|--|--|--------------------------|--|
| 52 | 5 | 5 | 15 | 7 | 15 | 41,265 | 144,207/0.408 | 515 | 90,4 | 174,432 | 0,469 | 6779 | 2142 |
| 90 | 2×5 | 10 | 15 | 30 | 15 | 90,880 | 146,142/0.413 | 1030 | 20,6 | 153,937 | 0,424 | 1547 | 451 |
| 100 | 2×5 | 22 | 15 | 43 | 22 | 158,630 | 212,038/0.599 | 1030 | 0,9 | 213,365 | 0,601 | 69,5 | 16 |

6. Количество вредных выбросов и стоимость НВОС

| Выработка от ВИЭ, % | Выбросы вредных веществ (кг/год) | | | | | | НВОС (\$/год) |
|---------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------|--------------|-------------|---------------|
| | двуокись углерода | окись углерода | несгоревшие углеводороды | дисперсные частицы | диоксид серы | оксид азота | |
| 52 | 17,851 | 44,1 | 4,88 | 3,32 | 35,8 | 393 | 1098 |
| 90 | 4,073 | 10,1 | 1,11 | 0,758 | 8,18 | 89,7 | 250 |
| 100 | 183 | 0,452 | 0,05 | 0,034 | 0,367 | 4,03 | 11 |

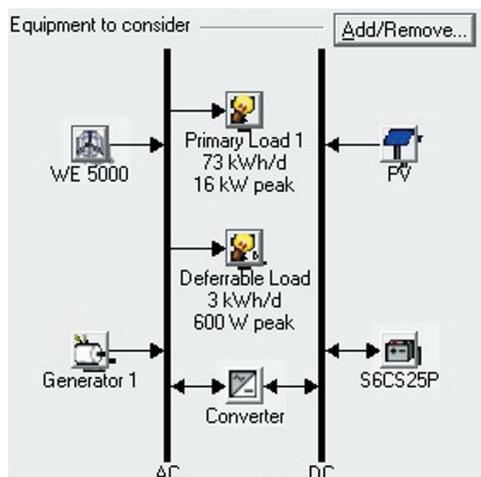


Рис. 3 – Схема моделируемого устройства

стеме с практически 100-процентной (выработка от дизельного генератора 0,153%) выработкой от ВИЭ резервный дизельный генератор используется 16 час. в год, возможно его полное исключение из системы, что удешевит стоимость установки. Количество вредных выбросов и стоимость НВОС, рассчитанная от объёма вредных выбросов, приведены в таблице 6.

Таким образом, на основе разработанной математической модели представлен расчёт общей стоимости комбинированной установки. Достовер-

ность данного метода подтверждается совпадением результатов расчёта с ПО «HOMER 2», решающим аналогичные задачи. Математическая модель отличается близостью к реальным условиям (адекватностью) и простотой, что обеспечивает возможность и удобство использования модели по её прямому назначению. Модель, в отличие от уравнения 1 и аппарата ПО «HOMER 2», является более точной за счёт учёта ряда новых коэффициентов суммарной стоимости. Данная математическая модель может быть взята за основу написания ПО для расчёта стоимости комбинированных электроустановок.

Литература

1. М. Bailey, М. Eastwood, Т Grieser, L. Borovick, V. Turner, and R.C. Gray, «Special Study: Data Center of the Future», New York, NY: IDC 06C4799, April 2007.
2. Стребков Д.С., Сокольский А.К., Ахмед Джайлани Т.А. Комбинированные электростанции для автономных сельскохозяйственных потребителей в Египте // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2009. № 3. С. 42–44.
3. HOMER 2. URL: <http://homerenergy.com/software.html>. (Дата обращения 03.06.2012).
4. HOMER, the micropower optimization model. URL: <http://www.nrel.gov/homer>, свободный. (Дата обращения 03.06.2012).
5. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set // 2009. URL: [http:// eosweb.larc.nasa.gov/sse/](http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/).
6. Климатическая характеристика. URL: <http://www.ecoindustry.ru/phorum/viewtopic.html?geo=56&f=14&t=2402>, свободный. (Дата обращения 01.10.2013).
7. Об утверждении Правил функционирования розничных рынков электрической энергии в переходный период реформирования электроэнергетики. Постановление Правительства РФ от 31 августа 2006 г. № 530. П. 113 // СЗ РФ. 2006. № 37. Ст. 3876.