

УДК 621.31.658.3

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Докт. экон. наук, проф. ПАДАЛКО Л. П., асп. ХАССАН ЕИД

Белорусская государственная политехническая академия

В настоящее время практическое применение нашли два метода преобразования солнечной энергии в электрическую: термодинамический и фотоэлектрический [1–3].

При термодинамическом способе с помощью зеркал концентрируют солнечную энергию на устройство, в котором рабочая жидкость нагревается до температуры, достаточной для получения электроэнергии на базе термодинамического цикла.

Фотоэлектрические системы – это солнечные батареи, сконструированные из полупроводников, в которых фотоны солнечного спектра продвигают электроны и обеспечивают при этом разность электрических потенциалов вдоль запирающей зоны полупроводников.

Фотоэлектрическое преобразование энергии имеет достоинства: отсутствие движущихся частей, продолжительность работы может достигать 100 и более лет; обслуживание фотоэлектрических установок не требует высокой квалификации; они могут работать на базе как прямой, так и рассеянной солнечной радиации. Однако термодинамические электростанции получили более широкое применение благодаря лучшим стоимостным характеристикам. В настоящее время стоимость кремниевых устройств составляет от 6 до 10 тысяч долларов за 1 кВт при среднем КПД 8–10 %. Удельная стоимость термодинамических электростанций составляет 2000–4000 долларов за 1 кВт [1–3], а средний КПД – 15–20 %.

Определение величины установленной мощности, объема вырабатываемой электроэнергии и режима использования солнечной электростанции. Энергетическая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую для термодинамической СЭС характеризуется коэффициентом полезного действия, определяемым по формуле

$$\eta_{\text{СЭС}} = R_3 \eta_3 \eta_k \eta_{\text{ТД}} \epsilon, \quad (1)$$

где R_3 – коэффициент зеркальной поверхности;

η_3 – средний коэффициент использования площади зеркал;

η_k – КПД котла;

$\eta_{тд}$ – КПД термодинамического цикла;

ϵ – степень черноты поверхности нагрева котла.

По данным [1], коэффициенты могут принимать следующие значения: $R_3 = 0,8$; $\eta_3 = 0,82$; $\eta_k = 0,83$; $\eta_{тд} = 0,35$; $\epsilon = 0,85$. Тогда $\eta_{сэс} \approx 16-17\%$.

Электрическая мощность станции равна

$$P(t) = S(t)\eta_{сэс}A, \quad (2)$$

где $S(t)$ – энергетический потенциал прямой солнечной радиации, поступающей в t -й момент времени на единицу поверхности зеркал, кВт/м²;

A – суммарная зеркальная площадь, м².

В течение дневного времени интенсивность солнечной радиации изменяется, достигая максимального значения в середине дня (примерно в 12 часов) и минимального значения в ранние утренние и вечерние часы. Величина суточной выработки электроэнергии будет равна

$$\mathcal{E}_{сут} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 – пределы интегрирования, соответствующие утренним и вечерним часам суток.

Как известно, режим энергопотребления того или иного потребителя может не совпадать с режимом поступления солнечной радиации в дневное время суток. Кроме того, режим выдачи мощности от СЭС существенно зависит от погодных условий, которые могут изменяться в течение дневного времени суток.

Если СЭС сооружается для энергообеспечения изолированного потребителя, не связанного электрической сетью с централизованной системой электроснабжения, то необходима установка какого-либо аккумулирующего устройства (если данный потребитель не должен полностью обесточиваться на ночное время или на время плохих погодных условий).

В качестве аккумулирующих устройств могут рассматриваться: аккумуляторная батарея, гидроаккумулирующая электростанция, устройство, использующее сжатый воздух, тепловое аккумулирующее устройство.

Для обеспечения аккумулирования необходимо, чтобы мощность СЭС превышала величину нагрузки присоединенного к ней потребителя. Тогда избыток мощности может использоваться для зарядки аккумуляторного устройства. Обозначим через $N(t)$ мощность, развиваемую солнечной электростанцией в период от t_1 до t_2 , а через $P(t)$ нагрузку потребителя. Тогда величина электроэнергии, которая может быть использована для зарядки АУ, будет равна

$$\mathcal{E}_{зар} = \int_{t_1}^{t_2} (N(t) - P(t))dt. \quad (4)$$

Если через η_{ay} обозначим КПД аккумулирующего устройства, то выдаваемая им электроэнергия составит $\eta_{\text{ay}}\Theta_{\text{зар}}$. Она будет покрывать потребность потребителя в периоды $0 - t_1$ и $t_2 - 24$. Общая величина выдаваемой электроэнергии составит

$$\Theta_{\text{выд}} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt + \Theta_{\text{зар}}\eta_{\text{ay}}.$$

Это выражение является основой для выбора установленной мощности СЭС, предназначенной для обеспечения энергией вместе с аккумулирующим устройством отдельного потребителя. Если заданную суточную потребность в энергии обозначить через $\Theta_{\text{потр}}$, то можно составить уравнение

$$\Theta_{\text{потр}} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt + \eta_{\text{ay}} \int_{t_1}^{t_2} (N(t) - P(t))dt.$$

Установленной мощности соответствует наименьшее суточное значение $N(t)$, которое имеет место в середине дня (примерно в 12 часов) во время максимальной интенсивности солнечной радиации. Если предположить постоянство величины солнечной радиации в течение $t_1 - t_2$, то можно записать

$$\Theta_{\text{потр}} = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt + \eta_{\text{ay}}N(t_2 + t_1) - \eta_{\text{СЭС}} \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt,$$

отсюда

$$\Theta_{\text{потр}} - \int_{t_1}^{t_2} (P(t) - \eta_{\text{ay}}P(t))dt = \Theta_{\text{потр}} - (1 - \eta_{\text{ay}}) \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt = \eta_{\text{ay}}N(t_2 - t_1).$$

Тогда установленная мощность СЭС будет равна

$$N = \frac{\Theta_{\text{потр}} - (1 - \eta_{\text{ay}}) \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt}{\eta_{\text{ay}}(t_2 - t_1)}.$$

При выводе данного уравнения мы пренебрегали возможностью появления облачных дней, что характерно прежде всего для горных районов.

Если СЭС обеспечивает энергией потребителя, связанного с централизованной системой электроснабжения, то надо учитывать возможность выдачи мощности от СЭС в период избытка этой мощности в

сеть системы. Сооружение АУ при этом не требуется, и величина установленной мощности определяется на базе чисто экономических соображений, обусловленных выгодностью замещения электроэнергии, вырабатываемой на традиционных электростанциях, солнечной.

Зная необходимую установленную мощность СЭС, нетрудно определить суммарную зеркальную площадь из уравнения (2) как

$$A = \frac{N}{S\eta_{\text{СЭС}}}. \quad (5)$$

Экономическая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Следует иметь в виду два аспекта постановки рассматриваемой задачи: сравнительную и общую эффективность [4]. Первая задача возникает тогда, когда требуется выбрать оптимальный тип энергисточника при заданной потребности в мощности и энергии, вторая – при определении экономической целесообразности привлечения инвестиций для строительства электростанции вообще, без обязательного учета ее конкретного типа.

Для оценки сравнительной эффективности могут быть использованы приведенные затраты. Если сравнивать солнечную электростанцию с тепловой, то приведенные затраты для них запишутся в виде:

$$Z_{\text{СЭС}} = (P_{\text{ам}} + P_{\text{об}} + E_{\text{н}})K_{\text{СЭС}}; \quad (6)$$

$$Z_{\text{ТЭС}} = (P_{\text{ам}} + P_{\text{об}} + E_{\text{н}})K_{\text{ТЭС}} + \Pi_{\text{т}}b_{\text{у}}\Delta, \quad (7)$$

где $P_{\text{ам}}$, $P_{\text{об}}$, $E_{\text{н}}$ – коэффициенты ежегодных отчислений на амортизацию, обслуживание и коэффициент эффективности;

$K_{\text{СЭС}}$, $K_{\text{ТЭС}}$ – стоимость соответственно солнечной и тепловой электростанции;

$\Pi_{\text{т}}$ – цена топлива;

$b_{\text{у}}$ – удельный расход топлива;

Δ – отпуск электроэнергии станцией.

Определяя стоимость электростанций через их установленную мощность, обозначая $P_{\text{ам}} + P_{\text{об}} + E_{\text{н}} = P$, условие выгодности применения СЭС можно записать в виде

$$\frac{PK_{\text{у}}^{\text{СЭС}}}{h_{\text{у}}^{\text{СЭС}}} < \frac{PK_{\text{у}}^{\text{ТЭС}}}{h_{\text{у}}^{\text{ТЭС}}} + \Pi_{\text{т}}b_{\text{у}}. \quad (8)$$

В левой и правой частях неравенства стоят удельные приведенные затраты.

Принимая режим работы обеих электростанций одинаковым и удельную стоимость СЭС выше удельной стоимости ТЭС, получаем

$$\frac{P\Delta K}{h_{\text{у}}^{\text{СЭС}}} - \Pi_{\text{т}}b_{\text{у}} < 0, \quad (9)$$

где

$$\Delta K = K_{\text{у}}^{\text{СЭС}} - K_{\text{у}}^{\text{ТЭС}}.$$

Выражая удельный расход топлива через КПД, это условие можно записать в виде

$$\frac{P\Delta K}{h_y^{СЭС}} - \frac{0,123}{\eta_{ТЭС}} \cdot 10^{-1} \Pi_T < 0. \quad (10)$$

Если принять величину $\eta_{ТЭС}$ постоянной, то выгодность СЭС зависит от трех факторов: ΔK , $h_y^{СЭС}$, Π_T ($\varphi(\Delta K, h_y^{СЭС}, \Pi_T) < 0$).

Выведем условие выгодности от Π_T , варьируя значения ΔK и $h_y^{СЭС}$. Анализируя эту зависимость, мы видим, что с повышением числа часов использования мощности СЭС область их эффективного применения расширяется. Одновременно расширяется зона экономического применения при данной величине ΔK .

Так как число часов использования $h^{СЭС}$ зависит от продолжительности солнечного времени в году, а оно для того или иного региона является величиной, заданной в узких пределах, то наиболее варьируемыми факторами являются Π_T и ΔK .

Сравнивая выше СЭС и ТЭС, мы, соблюдая требования энергетической сопоставимости вариантов, принимали условие равенства выработки электроэнергии по вариантам. Однако при одинаковой мощности выработка на ТЭС будет больше, чем выработка на СЭС, поскольку ТЭС может работать круглосуточно, в то время как СЭС — только ту часть суток, когда имеется эффективная солнечная радиация. Чтобы обеспечить равенство по выработке, СЭС следует выбрать более мощной, чем ТЭС. Однако и в этом случае СЭС и ТЭС будут несопоставимы, прежде всего по режиму их использования. Поэтому для того чтобы объективно сравнить данные варианты, соблюдая равенство их энергетического эффекта, необходимо эти варианты привести к сопоставимому виду по эффекту. Этот эффект должен выражаться одинаковой способностью СЭС и ТЭС покрывать заданный график электрической нагрузки, и в частности, их сопоставимость по электрической нагрузке и выработке электроэнергии. Для этого требуется солнечную электроэнергию дополнить генерирующей установкой либо аккумулирующим устройством.

Рассмотрим случай, когда СЭС имеет аккумулирующее устройство (аккумуляторная батарея, гидроаккумулирующая электростанция и др.).

Приведенные затраты для СЭС и АУ рассчитываются по формуле

$$Z_{СЭС} = P(K_y^{СЭС} N_y^{СЭС} + K_y^{АУ} N_y^{АУ}), \quad (11)$$

а для ТЭС —

$$Z_{ТЭС} = PK_y^{ТЭС} P_m + \frac{0,123}{\eta_{ТЭС}} \cdot 10^{-1} \Pi_T P_m h_m. \quad (12)$$

Условие экономической равноценности можно представить в развернутом виде

$$P(K_y^{СЭС} N_y^{СЭС} + K_y^{АУ} N_y^{АУ} - K_y^{ТЭС} P_m) = \frac{0,123}{\eta_{ТЭС}} \cdot 10^{-1} \cdot \Psi_T P_m h_m. \quad (13)$$

Мощность СЭС выбирается исходя из того, чтобы, во-первых, обеспечить покрытие нагрузки потребителя в период, когда имеется солнечная радиация, во-вторых, обеспечить аккумуляцию энергии в необходимом количестве для обеспечения потребителя энергией в несветовое время.

Формула для определения мощности СЭС может быть представлена в виде

$$N_y^{СЭС} = \frac{1}{\eta_{АУ}(b-a)} \left(\eta_{АУ} \sum_a^b P(t) + \sum_0^a P(t) + \sum_b^{24} P(t) \right), \quad (14)$$

где $\eta_{АУ}$ – КПД аккумулирующей установки;

$b - a$ – интервал суточного времени, когда работает АУ;

$P(t)$ – нагрузка в t -й час суток.

Зная конфигурацию суточного графика электрической нагрузки, длительность светового дня, в течение которого может работать СЭС, можно определить необходимую установленную мощность СЭС и АУ.

Рассмотрим случай приведения СЭС к сопоставимому виду при установке дополнительной генерирующей мощности. Тогда приведенные затраты для СЭС с дополнительной установкой рассчитываем по формуле

$$Z_{СЭС} = P(K_y^{СЭС} N_y^{СЭС} + K_y^{ТЭС} N_y^{дТЭС}) + \frac{0,123}{\eta_{ТЭС}} \cdot 10^{-1} \cdot \Psi_T K_d P_{мд}^д h_{мд}^д, \quad (15)$$

где K_1 – доля электрической нагрузки от максимума, покрываемая дополнительной ТЭС;

$h_{мд}^д$ – число часов использования дополнительной генерирующей установки;

$N_y^{дТЭС}$ – установленная мощность дополнительной ТЭС.

Запишем условие равновыгодности СЭС с дополнительной установкой и ТЭС

$$\begin{aligned} P(K_y^{СЭС} N_y^{СЭС} + K_y^{ТЭС} N_y^{дТЭС} - K_y^{ТЭС} N_y^{ТЭС}) = \\ = \frac{0,123}{\eta_{ТЭС}} \cdot 10^{-1} \cdot \Psi_T (P_m h_m - K_1 P_{мд} h_{мд}). \end{aligned} \quad (16)$$

Выбирая мощность СЭС, достаточную для покрытия максимума нагрузки в течение светового времени суток, мощность дополнительной ТЭС определим из соотношения

$$\int_0^{24} P(t) dt - \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_0^{t_1} P(t) dt + \int_{t_2}^{24} P(t) dt. \quad (17)$$

Представим первый интеграл, соответствующий суточному потреблению энергии, в виде $P_M h_M$. Если максимальная нагрузка приходится на световое время, то максимальная нагрузка СЭС также будет равна P_M , а число часов ее использования обозначим через h_M . Максимальную мощность дополнительной установки обозначим через P_M^d , а число часов ее использования через h_M^d . Тогда можно записать

$$P_M h_M - P_M^1 h_M^1 = P_M^2 h_M^2,$$

отсюда

$$h_M^d = \frac{P_M (h_M - h_M^1)}{P_M^d}. \quad (18)$$

Таким образом, выбирая мощность P_M^d , достаточную для покрытия нагрузки в несветовое время, можно легко определить число часов ее использования и выработку электроэнергии. Если же максимум суточной нагрузки приходится на несветовое время, то соотношение между мощностями СЭС и дополнительной установки окажется иным.

Выше мы рассматривали оценку сравнительной эффективности, предполагая, что СЭС строится для обеспечения энергией некоторого изолированного потребителя. Между тем, она может строиться в районе уже существующих потребителей, присоединенных к централизованной системе электроснабжения. В этом случае назначение СЭС будет иным - обеспечение экономии топлива, затрачиваемого на выработку электроэнергии, т. е. сооружение СЭС будет рассматриваться как энергосберегающее мероприятие.

Условие экономической выгоды сооружения СЭС для этого случая может быть записано в виде

$$T_{\text{эз}} \text{Э} - PK_y^{\text{СЭС}} N_y^{\text{СЭС}} > 0, \quad (19)$$

где $T_{\text{эз}}$ - тариф на электроэнергию;

Э - объем электроэнергии, вырабатываемой солнечной электростанцией.

Смысл данного условия: сооружение СЭС экономически выгодно, если годовая экономия от снижения затрат на покупку электроэнергии превышает годовые приведенные затраты по СЭС. Обозначая выработку электроэнергии как $N_y^{\text{СЭС}} h_y^{\text{СЭС}}$, это выражение можно записать в виде

$$T_{\text{эз}} h_y^{\text{СЭС}} - PK_y^{\text{СЭС}} > 0. \quad (20)$$

Величина удельной стоимости, соответствующая выгоды вариантов, будет равна

$$K_y^{\text{СЭС}} = \frac{T_{\text{эз}} h_y^{\text{СЭС}}}{P}. \quad (21)$$

Рассчитаем значение $K_y^{\text{СЭС}}$ при различных значениях $h_y^{\text{СЭС}}$, приняв $T_{\text{эз}} = 4$ цента/(кВт·ч) и $P = 0,2$.

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Таблица 1

$h_y^{СЭС}$, ч	1000	1500	2000	2500	3000
$K_y^{СЭС}$, дол./кВт	200	300	400	500	600

Отсюда следует, что с ростом объема отпускаемой энергии повышается эффективность сооружения СЭС. Значения $K_y^{СЭС}$ показывают предельную величину удельной стоимости, при которой выгодно применение СЭС при данном значении $h_y^{СЭС}$. Для условий Сирии, где солнечная радиация сможет обеспечить не менее 3000 ч, предельная стоимость СЭС не должна превышать 600 дол./кВт (при $T_{ЭЭ} = 4$ цента/(кВт·ч)). Если тариф за 1 кВт·ч будет выше в 2 раза, то соответственно в 2 раза увеличивается предельная удельная стоимость СЭС.

Помимо оценки сравнительной эффективности СЭС, важное значение имеет оценка ее общей эффективности, которая характеризует экономическую целесообразность сооружения электростанции с точки зрения инвестора. Постановка данной задачи характерна для условий рыночной экономики.

Соответствующий экономический критерий, называемый чистой дисконтированной стоимостью, записывается в виде

$$\sum_{t=1}^T (V_t - C_t)(1 + E)^{-t} - K_0 + K_L(1 + E)^{-T}, \quad (22)$$

где T — расчетный период, продолжительность которого принимается равной сроку службы;

V_t — годовая денежная выручка от реализации энергии;

C_t — годовые эксплуатационные расходы (без амортизации);

E — процентная ставка на капитал;

K_0 — стоимость объекта;

K_L — ликвидная стоимость объекта (по истечении срока службы).

Если значение данного выражения оказывается больше нуля, то проект считается экономически эффективным. В этом случае сумма дисконтированных прибылей превышает величину вложенных инвестиций.

Однако данный показатель не характеризует уровень эффективности. В таком качестве выступают коэффициент внутренней рентабельности и период окупаемости. Первый определяется как результат решения уравнения, образованного приравниванием приведенного выше выражения к нулю, относительно E . Период окупаемости находится решением данного уравнения относительно T при заданном E .

Уровень внутренней рентабельности (ВНР) связан с величиной чистой дисконтированной стоимости (ЧДС) следующим образом. При ЧДС, равной нулю, величина ВНР равна E . Поэтому проект считается эффективным при ЧДС > 0 , так как при этом его рентабельность оказывается выше величины процентной ставки.

Если ликвидную стоимость представить в долях от первоначальной стоимости ($K_L = \alpha K_0$), то величина инвестиций, при которой выгодно сооружение СЭС, определяется как

$$K_0 = \frac{\sum_{t=1}^T (V_t - C_t)(1 + E)^{-t}}{1 + \alpha(1 + E)^{-T}}. \quad (23)$$

При инвестициях, превышающих данную величину, СЭС экономически неэффективна.

Рассчитаем величину инвестиций, принимая следующие исходные данные: $T = 20$ лет; $E = 0,1$; $\alpha = 0,05$. Для определения величин V_t и C_t надо задаться мощностью СЭС. Принимаем ее равной $N_y = 1000$ кВт. Задаемся также числом часов использования $h = 3000$ ч, удельной стоимостью $K_y = 1000$ дол./кВт, ценой на электроэнергию $T_{\text{ЭЭ}} = 4$ цента/(кВт·ч) и коэффициентом отчислений на эксплуатацию $P = 0,1$. Тогда имеем:

$$V_t = T_{\text{ЭЭ}} N_y h = 4 \cdot 1000 \cdot 3000 = 120000 \quad \text{дол.};$$

$$C_t = P K_y N_y = 0,05 \cdot 1000 \cdot 1000 = 50000 \quad \text{дол.}$$

Предполагая, что СЭС строится сразу на проектную мощность и работает с неизменной по годам нагрузкой, можно V_t и C_t принять неизменными по годам. Тогда

$$K_0 = \frac{(V - C) \sum_{t=1}^T (1 + E)^{-t}}{1 + \alpha (1 + E)^{-T}} = \frac{(V - C) (1 - (1 + E)^{-T})}{E (1 + \alpha (1 + E)^{-T})}. \quad (24)$$

Если ликвидная стоимость принимается равной нулю ($\alpha = 0$), то получим

$$K_0 = \frac{(V - C) (1 + (1 + E)^{-T})}{E} = \frac{(V - C) [(1 + E)^T - 1]}{E (1 + E)^T}. \quad (25)$$

При очень большом значении T получим

$$K_0 \approx \frac{V - C}{E}. \quad (26)$$

Подставляя в последнее выражение исходные данные, получим $K_0 = 700000$ дол. Таким образом, сооружение СЭС экономически выгодно, если удельная стоимость не превышает 700 дол./кВт.

В условиях рыночной экономики представляется важным знание не столько экономической, сколько финансовой эффективности проектов, так как инвестирование осуществляется за счет собственных средств предприятий либо за счет средств, привлекаемых извне с помощью кредитов, акционирования и лизинга. Предприятию после ввода объекта в эксплуатацию необходимо выплачивать налоги из прибыли. Поэтому не вся прибыль, а только часть ее может быть использована для погашения кредита, выплаты дивидендов или лизинговых платежей. Поэтому эф-

фект, называемый финансовым, будет выражаться величиной $V - C - H$, где H – налог на прибыль. Принимая $H = 30\%$ и подставляя в (26), получаем $K_0 = 490000$ дол., что соответствует удельной стоимости 490 дол./кВт. Таким образом, ориентация на финансовую эффективность требует существенного снижения удельной стоимости СЭС.

ВЫВОД

Экономическая выгодность применения солнечной электростанции зависит от ее удельной стоимости, цены и удельного расхода на ТЭС замещаемого топлива, продолжительности и интенсивности солнечной радиации. Методика расчета эффективности зависит от принятого варианта постановки задачи. Если СЭС строится в районе с существующей централизованной системой электроснабжения, то ее сооружение может рассматриваться как энергосберегающее мероприятие и его эффективность во многом зависит от цены на электроэнергию. В условиях рыночной экономики должна рассчитываться финансовая эффективность проекта, если законодательством не предусмотрены льготы на прибыль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Т в а й д е л л Д ж., У э й е р А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. У д е л л С. Солнечная энергия и другие альтернативные источники энергии. – М.: Знание, 1990.
3. Д э в и н с Д. С. Энергия. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. П а д а л к о Л. П. Методы технико-экономических расчетов в энергетике в условиях рыночной экономики // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 1–2.

Представлена кафедрой
экономики и организации
энергетики

Поступила 11.11.1999