

А. Д. Никитин, И. Одинаев, С. Е. Щеклеин

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ТАДЖИКИСТАНА

Целью данного исследования является анализ структуры фотоэлектрической станции (ФЭС) и стоимости вырабатываемой энергии применительно к Таджикистану. Рассмотрены три варианта использования ФЭС: автономная, резервирующая центральную сеть, и совмещенная с дизельным генератором. Предложена методика оптимизации структуры оборудования ФЭС, совмещенной с дизельным генератором.

Ключевые слова: *фотоэлектрическая станция, автономная ФЭС, гибридная ФЭС, резервная ФЭС.*

The aim of this study is to analyze the structure of the photovoltaic power station (PVS) and the cost of the energy produced in relation to Tajikistan. Are considering three variants of the use of PVS: autonomous, reserves the central power grid, and combined with a diesel generator. Proposes a methodology to optimize the structure of PVS equipment, combined with diesel generator.

Keywords: *photovoltaic power station, independent PVS, hybrid PVS, PVS reserve.*

До 2010 г. существовала объединенная энергосистема (ОЭС), включающая Таджикистан, Узбекистан, Казахстан, Киргизию и Туркменистан. Таджикистан присоединился к ОЭС через Узбекистан и, после выхода Узбекистана из системы, также отсоединился от ОЭС, в результате чего возник дефицит электроэнергии. Электричество в северных и южных частях Таджикистана стали подавать по времени. С ноября по апрель электроснабжение от центральной энергосистемы осуществляется только в утренние часы с 6:00 до 10:00 и в вечерние — с 18:00 до 22:00. В отдаленных регионах, например в Дашти-Джум, центральное электроснабжение отсутствует.

Вместе с этим, приход солнечной радиации на территории Таджикистана является высоким: более 7 кВт·ч/(м²·сут) в течение летних месяцев и 4,64 кВт·ч/(м²·сут) среднегодовой. Поэтому в Таджикистане возможно широкое применение фотоэлектрических станций (ФЭС) для электроснабжения.

Целью данного исследования является технико-экономический анализ структуры ФЭС, спроектированной для применения в Таджикистане. Также рассматриваются варианты оптимизации структуры ФЭС.

Рассчитывается ФЭС мощностью $N = 1$ кВт с суточной выработкой электроэнергии $W = 8$ кВт·ч, что соответствует энергопотреблению частного дома [1], для применения в Душанбе (Таджикистан, 38,6° с. ш.).

Принципиальная схема автономной ФЭС изображена на рис. 1.

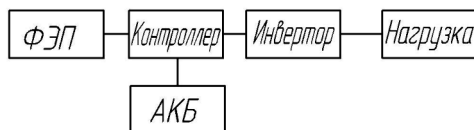


Рис. 1. Принципиальная схема ФЭС

На рис. 2 изображен годовой график прихода солнечной радиации для Душанбе на горизонтальную поверхность и на поверхность, расположенную в каждом месяце под оптимальным углом наклона.

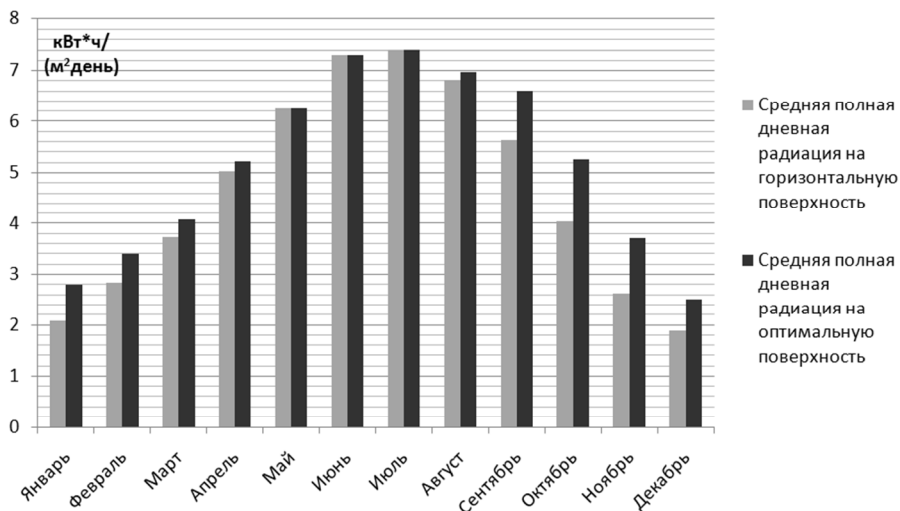


Рис. 2. Приход солнечной радиации на горизонтальную и оптимальную поверхности для Душанбе

Для создания ФЭС выбрано следующее оборудование [2]:

- фотоэлектрический модуль Exmork ФСМ 300М, номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 24$ В, рабочий ток $I_p = 8,33$ А, КПД $\eta_{\text{фэл}} = 16$ %, стоимость — 330 \$;
- аккумуляторная батарея Vatbear 190 А/ч 6СТ-190, емкость $C_{\text{ак}} = 190$ А·ч, номинальное напряжение $U_{\text{акб}} = 12$ В, стоимость — 145 \$;
- инвертор Exmork 1200 Вт, DC/AC 24/220 В, модифицированный синус, стоимость — 89 \$;
- контроллер SM60 60 А 12V/24V auto switch, максимальный ток $I_k = 60$ А, стоимость — 172 \$.

При расчете капитальных вложений в ФЭС стоимость опор для ФЭП рассчитывалась как 10 % от стоимости ФЭП. Стоимость монтажа ФЭС принималась равной 10 % стоимости ФЭП.

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой ФЭС, рассчитывается следующим образом. Издержки на амортизацию ФЭС рассчитываются с учетом срока службы каждого элемента ФЭС. Срок службы фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) принимается $T_{\text{фэл}} = 25$ лет, срок службы АКБ $T_{\text{акб}} = 5$ лет, срок службы

контроллера $T_{\text{контр}} = 10$ лет, срок службы инвертора $T_{\text{инв}} = 10$ лет. Амортизационные издержки рассчитываются по формуле

$$I_a = \frac{n_{\text{фэп}} \cdot \Pi_{\text{фэп}}}{T_{\text{фэп}}} + \frac{n_{\text{акб}} \cdot \Pi_{\text{акб}}}{T_{\text{акб}}} + \frac{n_{\text{контр}} \cdot \Pi_{\text{контр}}}{T_{\text{контр}}} + \frac{n_{\text{инв}} \cdot \Pi_{\text{инв}}}{T_{\text{инв}}}, \quad (1)$$

где n_i — количество i -того оборудования, Π_i — стоимость единицы i -того оборудования.

Издержки на ремонт ФЭС: $I_{\text{рем}} = 0,1 \cdot I_a$.

Издержки при использовании ФЭС: $I_{\text{ФЭС}} = I_a + I_{\text{рем}}$.

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой на ФЭС: $C_{\text{ФЭС}} = \frac{I_{\text{ФЭС}}}{365 \cdot W}$.

Удельные капиталовложения для ФЭС составят $K_{\text{уд}} = \frac{K_{\text{сум}}}{n_{\text{фэп}} \cdot P_{\text{фэп}}}$, где $K_{\text{сум}}$ —

суммарные капитальные вложения в ФЭС, $P_{\text{фэп}}$ — мощность одного фотоэлектрического преобразователя.

Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ФЭС:

$$\text{КИУМ}_{\text{ФЭС}} = \frac{W}{24 \cdot n_{\text{фэп}} \cdot P_{\text{фэп}}}.$$

В табл. 1 представлены результаты расчетов для автономной ФЭС, оптимизированной для каждого из четырех времен года (т. е. вырабатывающей заданное количество энергии во время года, определяющее состав оборудования ФЭС, в другие времена года вырабатываемое количество энергии отличается от заданного).

Таблица 1

Результаты расчетов для автономной ФЭС

Время года, определяющее структуру ФЭС	Зима	Весна	Лето	Осень
Количество ФЭП, шт.	20	12	7	15
Количество АКБ, шт.	102	74	40	92
Количество контроллеров, шт.	4	2	2	3
Количество инверторов, шт.	1	1	1	1
Капитальные вложения в ФЭС, \$	22 167	15 123	8543	18 895
Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	1,15	0,82	0,45	1,02
Удельные капитальные вложения в ФЭС, \$/кВт	3 695	4 201	4 068	4 199
КИУМ _{ФЭС} , %	5,55	9,25	15,86	7,40
Доля АКБ в стоимости ФЭС, %	67	71	68	71

Как видно из табл. 1, стоимость электроэнергии, вырабатываемой ФЭС, является высокой. Стоимость электроэнергии в Таджикистане равняется 0,023 \$/кВт·ч [3]. Таким образом, электроэнергия, вырабатываемая ФЭС, в 20...50 раз дороже электроэнергии, получаемой из сети. Удельные капитальные вложения в ФЭС в 2 раза выше вложений в установки традиционной энергетики,

которые составляют около 2 тыс. \$/кВт. Низкий КИУМ ФЭС объясняется большой установленной мощностью ФЭП.

Одной из причин высокой стоимости электроэнергии, вырабатываемой автономной ФЭС, является наличие большого количества АКБ, которые имеют высокую стоимость и ограниченный ресурс использования, приводящий к частой замене АКБ, что увеличивает стоимость электроэнергии.

Т. к. в Таджикистане существует дефицит электроэнергии, то целесообразно использовать ФЭС для электроснабжения при отключениях центральной сети. В этом случае необходима такая емкость АКБ, которая обеспечит суточные потребности в энергии. Расчет ФЭС, резервирующей центральную сеть, представлен в табл. 2.

Таблица 2

Расчет ФЭС, работающей при отключениях центральной сети

Время года, определяющее структуру ФЭС	Зима	Весна	Лето	Осень
Количество ФЭП, шт.	20	12	7	15
Количество АКБ, шт.	4	4	4	4
Количество контроллеров, шт.	4	2	2	3
Количество инверторов, шт.	1	1	1	1
Капитальные вложения в ФЭС, \$	7957	4973	3323	6135
Удельные капитальные вложения в ФЭС, \$/кВт	1326	1381	1582	1363
Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч	0,18	0,12	0,09	0,14

Как видно из табл. 2, стоимость электроэнергии в данном случае значительно снизилась по сравнению с автономной ФЭС и стала в 4...8 раз дороже электроэнергии из сети. Удельные капитальные вложения стали меньше вложений в установки традиционной энергетики.

Снизить стоимость вырабатываемой автономной ФЭС электроэнергии можно при использовании дополнительного источника энергии вместо АКБ большой емкости. Выработка электроэнергии с помощью дизельного генератора (ДГ) при недостатке солнечной радиации дешевле, чем хранение энергии в АКБ. В свою очередь, в расходах на ДГ значительную часть занимает стоимость топлива. ФЭС топлива не потребляет, и, при достаточном приходе солнечной радиации, вырабатываемая ФЭС электроэнергия будет дешевле энергии, производимой ДГ. Таким образом, использование ФЭС совместно с ДГ позволяет создать гибридную электростанцию, для которой стоимость производимой электроэнергии будет ниже стоимости энергии, производимой только за счет Солнца на ФЭС или только за счет сжигания топлива на ДГ. Кроме этого, использование АКБ для выравнивания графика потребляемой мощности позволит ДГ работать в стационарном режиме, в результате чего увеличатся эффективность и ресурс ДГ. Принципиальная схема гибридной станции изображена на рис. 2.



Рис. 2. Схема гибридной станции (ФЭС совместно с ДГ)

В составе ФЭС целесообразно иметь АКБ такой емкости, которая позволит сгладить неравномерность между суточным приходом солнечной радиации и потреблением электроэнергии. Для определения емкости АКБ необходимо сопоставить график нагрузки, для которой проектируется гибридная станция, и суточный график выработки электроэнергии ФЭС. На рис. 3 изображены типичный график нагрузки и типичные суточные графики прихода солнечной радиации в летний и зимний дни для широты Душанбе. Все значения нормированы по отношению к графику нагрузки (т. е. площадь под кривой всех графиков совпадает).

Количество энергии, которое необходимо запасти в АКБ, равняется разности между количеством вырабатываемой и количеством потребляемой энергии, на графике это площадь между кривой выработки мощности ФЭС и кривой потребления мощности нагрузкой. Отношение количества энергии, запасаемого в АКБ, к суммарному суточному потреблению энергии можно назвать коэффициентом неравномерности потребления энергии. Для графика, изображенного на рис. 3, коэффициент неравномерности для летнего периода $k_{\text{неравн.л}} = 0,3$; для зимнего периода $k_{\text{неравн.з}} = 0,6$. Для весеннего и осеннего периодов можно принять среднее значение $k_{\text{неравн.в}} = k_{\text{неравн.о}} = 0,45$.

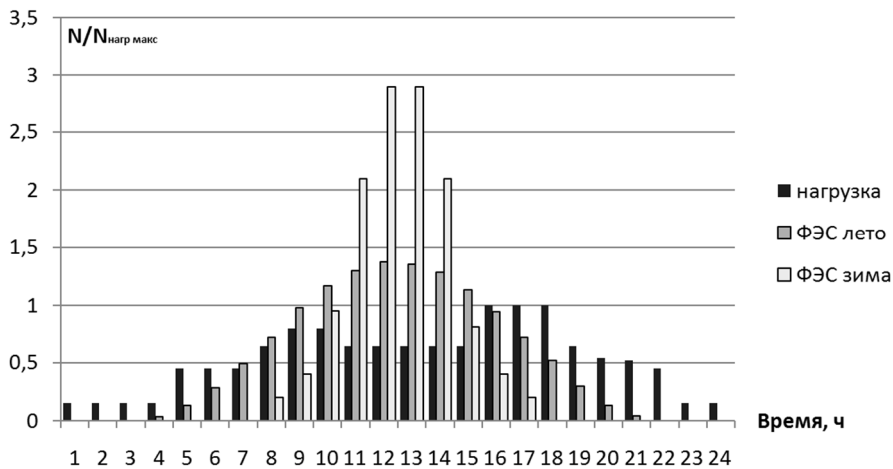


Рис. 3. Суточные графики потребления и выработки мощности

Таким образом, при заданном энергопотреблении нагрузки W емкость АКБ

вычисляется по формуле $C_{\text{акб}} = \frac{W \cdot k_{\text{неравн}}}{\eta_{\text{инв}} \cdot k_{\text{разр}} \cdot U_{\text{акб}}}$, где $\eta_{\text{инв}}$ — коэффициент полезного

действия (КПД) инвертора, $k_{разр}$ — степень разряда АКБ (в дальнейших расчетах принимается равной 50 %), $U_{акб}$ — напряжение АКБ.

Число АКБ вычисляется по формуле $n_{акб} = \frac{U_{ФЭС} \cdot C_{акб}}{U_{акб} \cdot C_{ак}}$, где $U_{ФЭС}$ — напряжение

ФЭС, $C_{ак}$ — емкость одного аккумулятора.

Число ФЭП определяется следующим образом:

$$n_{фэп} = \frac{W}{J_i \cdot \eta_{фэп} \cdot \eta_{инв} \cdot S_{фэп} \cdot (1 - k_{пот.акб} \cdot k_{неравн})},$$

где J_i — среднесуточный приход солнечной радиации в i -тый месяц, $S_{фэп}$ — площадь ФЭП, $\eta_{фэп}$ — КПД ФЭП, $k_{пот.акб}$ — коэффициент, учитывающий потери в АКБ (в расчетах принимается равным 10 %).

Число контроллеров для ФЭС рассчитывается по формуле: $n_k = \frac{n_{фэп} \cdot I_p}{I_k}$,

где I_p — рабочий ток ФЭП, I_k — допустимый ток через контроллер.

Результаты расчетов структуры оборудования ФЭС для гибридной станции для Душанбе представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчет вариантов ФЭС для гибридной станции

Вариант	Расчетный месяц	$k_{неравн}$	$n_{фэп}$	$n_{акб}$	n_k	$n_{инв}$	Стоимость ФЭС, \$	Стоимость электроэнергии ФЭС, \$/кВт·ч
1	Январь	0,6	10	4	1	1	4801	0,10
2	Февраль	0,6	8	4	1	1	4009	0,09
3	Март	0,5	7	2	1	1	3323	0,07
4	Апрель	0,45	4	2	1	1	2135	0,05
5	Май	0,4	4	2	1	1	2135	0,05
6	Июнь	0,3	4	2	1	1	2135	0,05
7	Июль	0,3	4	2	1	1	2135	0,05
8	Август	0,3	4	2	1	1	2135	0,05
9	Сентябрь	0,4	5	2	1	1	2531	0,06
10	Октябрь	0,45	6	2	1	1	2927	0,06
11	Ноябрь	0,5	8	2	1	1	3719	0,07
12	Декабрь	0,6	11	4	2	1	5369	0,11

Сравним ФЭС с дизельным генератором. Стоимость дизельного генератора «Кірог KDE 2200X» мощностью 2 кВт составляет 730 \$ [4]. Примем стоимость установки генератора, покупки и установки топливной емкости равной 70 % от стоимости генератора. Стоимость дизельного топлива (стоимость покупки в Таджикистане [5] и транспортировки) примем $C_{топ} = 0,91$ \$/л.

Издержки для дизельного генератора: $I_{дз} = 1,5 \frac{K}{365 \cdot T_{ст}}$, где 1,5 — коэффициент,

учитывающий издержки на обслуживание ДГ (в данном случае 50 % от аморти-

зационных издержек), K — капитальные вложения для ДГ, T_{cl} — срок службы ДГ в годах.

Затраты на топливо для дизельного генератора за сутки $C_{мон.дг} = W \cdot G \cdot C_{мон}$, где G — удельный расход топлива ДГ.

$$\text{Стоимость электроэнергии, производимой ДГ: } C_{дгс} = \frac{C_{мон.дг} + I_{дг}}{W}.$$

Стоимость электроэнергии, производимой ДГ, составила 0,38 \$/кВт·ч. Т. к. стоимость электроэнергии, вырабатываемой ФЭС, ниже стоимости электроэнергии, получаемой на ДГ, то использование ФЭС совместно с ДГ в Душанбе целесообразно.

Суточные затраты для гибридной станции будут складываться из суточных затрат ФЭС и суточных затрат ДГ. Затраты ФЭС — это издержки ФЭС, они остаются постоянными в течение года. Затраты ДГ зависят от количества электроэнергии, произведенного ДГ в каждом варианте гибридной системы. Это количество равно разности между суточным потреблением электроэнергии и количеством энергии, выработанным на ФЭС. Затраты ДГ вычисляются как произведение количества выработанной энергии на ДГ на стоимость ее производства.

Результаты расчета стоимости производства электроэнергии для гибридной станции приведены в табл. 4.

Таблица 4

Среднегодовая стоимость производства электроэнергии для гибридной станции

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Стоимость, \$/кВт·ч	0,18	0,17	0,16	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,19	0,17	0,15	0,18

Как видно из табл. 4, необходимо использовать структуру гибридной станции для варианта № 11 (расчетный месяц — ноябрь). Среднегодовая стоимость производства электроэнергии составит 0,15 \$/кВт·ч. Капитальные вложения в гибридную станцию составят 4960 \$. Удельные капиталовложения составят 936 \$/кВт, что в 2,1 раза меньше удельных вложений в установки традиционной энергетики. Срок окупаемости гибридной системы по отношению к автономному ДГ составит 5,5 лет.

Необходимо отметить, что стоимость дизельного топлива в Таджикистане относительно высокая. Таким образом, при создании автономной ФЭС для круглогодичного использования оборудование ФЭС используется с низкой эффективностью, капитальные вложения и стоимость вырабатываемой электроэнергии являются чрезвычайно высокими.

При использовании ФЭС для резервирования центральной сети стоимость вырабатываемой энергии значительно снижается по сравнению с автономной ФЭС, но остается выше стоимости электроэнергии из сети. Использование ФЭС для резервирования центральной сети целесообразно, если стоимость энергии от ФЭС ниже стоимости энергии, получаемой от других источников. Для Таджикистана

ФЭС являются одним из наиболее дешевых источников энергии по причине высокого прихода солнечной радиации и могут получить широкое распространение.

При включении в состав автономной ФЭС дополнительного источника для энергоснабжения в периоды с низким приходом солнечной радиации требуется меньшее количество оборудования и достигается значительное снижение капитальных вложений и стоимости вырабатываемой электроэнергии. В Таджикистане, в условиях дефицита электроэнергии, использование ФЭС с дополнительным источником энергии является перспективным направлением.

Литература

1. Велькин В. И., Щеклеин С. Е. Обеспечение минимальных энергетических потребностей удаленного дома за счет солнечных ФЭП // *Альтернативная энергетика и экология*. 2012. № 3. С. 52–54.
2. Солнечные батареи (модули, панели). [Электронный ресурс]. URL: <http://inventory.ru/category/solnechnye-batarei/>.
3. Тарифы на электроэнергию в Таджикистане. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dialog.tj/news/oakhk-barki-tochik-v-tadzhikistane-povysilis-tarify-na-elektroenergiyu>.
4. Дизельный генератор Kipor KDE2200X. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tk-kipor.ru/products/generators/open/0/18/>.
5. Стоимость дизельного топлива в Таджикистане. [Электронный ресурс]. URL: http://ru.globalpetrolprices.com/Tajikistan/diesel_prices/.