



УДК 620.91

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ВЫРАБОТКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МАЛОМОЩНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Ф.Ф.Содиқов

Энергетика вазирлиги ҳузуридаги Қайта тикланувчи энергия манбалари миллий илмий-тадқиқот институти

Аннотация. Разработка методологии рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения маломощных потребителей в производствах агропромышленного комплекса для снижения затрат на потребляемую энергию (для оценки эффекта от совместного использования возобновляемых источников энергии разных типов в автономной системе электроснабжения) определяется технологическими процессами.

Ключевые слова: Электроснабжение, фотоэлектрический преобразователь, нагрузка, система освещения, расчёт, показатели, экономическая эффективность.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ.

В фотоэлектрических установках используются элементы на основе кремния трёх видов: монокристаллические, поликристаллические и аморфные. Различие заключается в организации атомов в кристаллической структуре [1-3].

Использование гибридных методов привело к созданию элементов, которые имеют как кристаллический переход, так и тонкий полупрозрачный аморфный, расположенный над кристаллическим переходом. Поскольку кристаллы и аморфный кремний эффективно преобразуют спектр света частично и они различны, применение подобных элементов позволяет повысить общий КПД солнечного элемента. В настоящее время их коэффициент полезного действия может превышать 40 процентов, в лабораторных условиях.

Фотоэлектрические панели (ФЭП) состоят из кремниевых элементов. Поскольку отдельный кремниевый элемент не способен произвести потребного количества электроэнергии, необходимая их часть собирается в панели, для обеспечения потребных параметров.

Панель представляет собой фотоэлектрический генератор, состоящий из стеклянной плиты, с тыльной стороны которой, между двумя слоями герметизирующей плёнки, размещены солнечные элементы, электрически соединённые между собой токопроводящими шинами. Нижний слой



герметизирующей плёнки защищён от внешних воздействий защитным слоем. К внутренней стороне корпуса панели прикреплен блок электрических контактов для подключения, расположенный под герметичной крышкой.

ФЭП имеют огромное количество различных типоразмеров. Самыми распространёнными являются кремниевые солнечные панели мощностью 40-260 Вт. Их коэффициент полезного действия варьируется от 5 до 20 процентов. ФЭП работают при любой комбинации напряжения и тока. Определяющая рабочая точка панели зависит от параметров подключенной к панели сети. На практике ФЭП работают при комбинации значений тока и напряжения, обеспечивающих выработку достаточной мощности. Оптимальная точка работы ФЭП называется точкой максимальной мощности. Именно для этой точки определяются номинальная мощность и КПД солнечной панели.

Прямое включение ФЭП к аккумуляторам электрической энергии, приводит к условиям, когда они будут работать на напряжении, равном напряжению заряда батарей на момент включения. В связи с этим ФЭП должны иметь запас по выдаваемому напряжению [3-5].

Мощность ФЭП прямо пропорционально зависит от поступающей солнечной радиации. При определённых значениях ФЭП может прекратить выработку. Например, для кристаллических панелей это, примерно, 150-200 Вт на м.кв., а для аморфных – около 100 Вт на м.кв. ФЭП вырабатывает помимо электроэнергии ещё и тепловую энергию. Для ФЭП работающей в ТММ характерна выработка только 15 процентов электрической энергии, остальная энергия приводит к нагреву [3,4].

Расчёт электропотребителей малой мощности от ФЭП.

В системе электроснабжения, предлагается изменить централизованное питание осветительных приборов (на примере насосной станции) на питание от фотоэлектрических преобразователей. Поскольку в системе 4 цепи освещения, расчёт будем проводить для каждой из них по известной методике. Общую нагрузку определим исходя из мощности осветительных приборов и времени их работы:

$$Q_{нотр} = \sum_{n=1}^m (P_n \cdot \tau_n) \quad (1)$$

где $Q_{нотр}$ – потребная электрическая энергия, кВт*ч;

P_n – нагрузка n-ого электрического осветительного прибора, кВт (таблица 1);

τ_n – время работы электрического осветительного прибора, ч.

$$Q_{нотр1} = 0,576 \cdot 10 = 5,76 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad .$$

Таблица 1. Нагрузки системы освещения.



Цепь	P, кВт	τ, ч	Q _{потр} , кВт*ч	Q _{потр} , МДж
1	0,576	10	5,76	20,74
2	1,799	10	17,99	64,76
3	1,213	24	29,11	104,8
4	1,955	10	19,55	70,38

Потребная энергия системы освещения определяется как сумма потребных энергий каждой из цепи по выражению:

$$Q_{\text{потр}} = Q_{\text{потр}1} + Q_{\text{потр}2} + Q_{\text{потр}3} + Q_{\text{потр}4} \quad (2)$$

$$Q_{\text{потр}} = 20,74 + 64,76 + 104,80 + 70,38 = 260,68 \text{ МДж} \quad .$$

Определение потребной площади фотоэлектрических преобразователей

Определим дневную удельную производительность системы электроснабжения с ФЭП в зависимости, от угла наклона. Расчёт проведём для каждого месяца. Результаты расчёта сведём в таблицу 2. Для расчёта используем выражение:

$$Q_{\text{в.уд.}i}^{\text{ДН}} = H_T \cdot \eta_{\text{ФЭП}} \cdot \eta_{\text{ИНВ}} \cdot \eta_{\text{АК}} \quad (3)$$

где $\eta_{\text{ФЭП}}$ – КПД ФЭП, примем равным 0,18;

$\eta_{\text{ИНВ}}$ – КПД инвертора, примем равным 0,9;

$\eta_{\text{АК}}$ – КПД процесса аккумуляции электрической энергии, примем 0,95.

Потребная площадь ФЭП в каждом месяце определим по выражению:

$$A_i = Q_{\text{ни}}^{\text{СУТ}} / Q_{\text{в.уд.}i}^{\text{ДН}} \quad (4)$$

Результаты расчёта сведём в таблицу 3.

В системе электроснабжения с использованием ФЭП, в случае нехватки энергии возможно использовать централизованное электроснабжение. Дублирование необходимо в любом варианте, так как возможны дни, когда интенсивность солнечной радиации окажется недостаточной для достаточного заряда аккумуляторов.

Исходя из расчёта, минимальная потребная площадь составляет 76,5 квадратных метра при 50 градусах наклона.

При изменении угла наклона меняется и расчетная потребная площадь. Это можно проследить и по средней величине потребной площади за год. Минимальная площадь ожидается при 30-70 градусах угла.

Таблица 2. Дневная удельная производительность фотоэлектрической системы с различными углами наклона.



Ф, (град)/ Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	1,50	2,15	3,05	3,81	4,42	4,61	4,43	3,96	3,23	2,38	1,72	1,29
10	1,46	2,19	3,31	4,31	5,13	5,41	5,17	4,52	3,59	2,49	1,70	1,24
20	1,78	2,54	3,60	4,31	4,78	4,88	4,74	4,39	3,78	2,84	2,05	1,54
30	2,13	2,87	3,82	4,24	4,42	4,39	4,32	4,20	3,90	3,14	2,41	1,88
40	2,48	3,15	3,96	4,10	4,05	3,94	3,91	3,97	3,93	3,39	2,77	2,24
50	2,81	3,37	4,01	3,91	3,68	3,51	3,52	3,71	3,88	3,56	3,08	2,59
60	3,08	3,51	3,96	3,66	3,32	3,12	3,14	3,42	3,76	3,63	3,33	2,91
70	3,25	3,53	3,83	3,37	2,96	2,74	2,78	3,10	3,56	3,61	3,46	3,13
80	3,28	3,44	3,60	3,05	2,61	2,40	2,44	2,77	3,30	3,47	3,45	3,20
90	3,14	3,23	3,29	2,69	2,27	2,09	2,12	2,43	2,98	3,23	3,28	3,09

Таблица 3. Потребные площади ФЭП.

Показатели	Месяц												За сезон	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
Q _{потр} , МДж	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	261	95265
Угол	0	174,2	121,5	85,7	68,6	59,1	56,6	58,9	66,0	80,8	109,6	152,1	202,3	102,9
	10	178,6	119,0	78,8	60,6	50,9	48,3	50,4	57,7	72,8	104,8	153,8	210,5	98,8
	20	146,4	102,8	72,4	60,5	54,6	53,4	55,1	59,5	69,0	92,0	127,4	169,0	88,5
	30	122,7	91,1	68,3	61,6	59,1	59,4	60,5	62,1	67,0	83,1	108,2	138,8	81,8
	40	105,4	82,8	65,9	63,6	64,4	66,3	66,8	65,7	66,4	77,0	94,4	116,6	77,9
	50	93,0	77,4	65,1	66,8	70,8	74,3	74,2	70,4	67,2	73,4	84,7	100,6	76,5
	60	84,8	74,4	65,9	71,3	78,6	83,8	83,1	76,4	69,4	71,8	78,4	89,7	77,3
	70	80,3	73,8	68,2	77,3	88,2	95,1	93,8	84,2	73,2	72,4	75,4	83,4	80,5
	80	79,6	75,8	72,5	85,6	100,2	108,7	106,9	94,2	79,1	75,3	75,6	81,5	86,3
	90	83,0	80,8	79,2	96,9	115,2	124,7	122,8	107,5	87,7	80,9	79,5	84,4	95,2

Оптимальную площадь ФЭП определяем по упрощённой методике по выражению:

$$A_{opt} = -\ln \left(\frac{I_2 \cdot \gamma_2 \cdot K_{уд}^{\text{ФЭП}} \cdot A_c}{k_f \cdot p(S) \cdot C_{mp} \cdot Q_n} \right) \cdot A_c, \quad (5)$$

где A_{opt} – оптимальная площадь, обеспечивающая минимальные затраты на потребляемую электроэнергию от ФЭП, м.кв.;

I_2 – амортизационные отчисления на реновацию и затраты на текущий ремонт установки, 0,05;

$K_{уд}^{\text{ФЭП}}$ – удельные капиталовложения ФЭП, 10500 руб/м.кв.;

k_f – поправочный коэффициент, 1,4;

$p(S)$ – вероятность солнечного свечения (средняя за расчётный период);



Q_n – потребная энергия, МДж;

A_c – минимальная расчётная площадь, 76,5 кв.м.

Вероятность солнечного сияния $p_i(S)$ определим используя представленные ранее зависимости. Полученные данные отобразим в таблице 4 и рассчитываем среднее значение.

Таблица 4. Среднее значение вероятности солнечного свечения.

Ме-сяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее значение
$p(S)$	0,74	0,79	0,84	0,93	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,83	0,71	0,90

$$A_{\text{онм}} = -\ln\left(\frac{0,05 \cdot 1,25 \cdot 10500 \cdot 76,5}{1,4 \cdot 0,9 \cdot 0,97 \cdot 95265}\right) \cdot 76,5 = 64,26 \text{ кв.м.}$$

Для оценки обеспеченности энергией рассчитаем возможную выработку при выбранной оптимальной площади ФЭП в зависимости от угла наклона. Результат расчёта сведём в таблицу 5.

Определим коэффициент обеспеченности и использования от фотоэлектрических преобразователей по выражениям из [3-5].

Результаты расчёта сведём в таблицы 6 и 7.

Таблица 5. Выработка ФЭП с оптимальной площадью в зависимости от угла наклона солнечных коллекторов, МДж/м.кв.

Угол	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	96,3	138	196	245	284	296	285	254	208	153	110	82,9
10	93,9	141	213	277	330	348	332	291	230	160	109	79,7
20	115	163	232	277	307	314	305	282	243	182	132	99,2
30	137	184	246	272	284	282	277	270	250	202	155	121
40	159	202	254	264	260	253	251	255	253	218	178	144
50	180	217	258	251	237	226	226	238	250	229	198	167
60	198	225	255	235	213	200	202	219	242	234	214	187
70	209	227	246	217	190	176	179	199	229	232	222	201
80	211	221	231	196	167	154	157	178	212	223	222	206
90	202	208	212	173	146	135	137	156	191	207	211	199

Принимаем угол установки ФЭП 40 градусов.

Для каждого из месяцев определим коэффициент, рассчитывая его с учётом вероятности поступления солнечного свечения используя выражение по [3-5].

Выбор ФЭП и дополнительного оборудования.

После результатов расчёта к установке предлагаются фотоэлектрические преобразователи SM 50-12 P (рис. 1). К установке предлагается 170 панелей с суммарной площадью 64,6 м.кв.



Фотоэлектрические панели серии SM выполнены из особо эффективных элементов с индексом «Grade A». ФЭП выполнены из закалённого стекла и алюминиевого профиля с анодированием, что обеспечивает высокую прочность конструкции. Технология выполнения элементов – поликристаллическая, с толщиной ячейки 220 мкм и общим количеством 36 элементов. Основные характеристики представлены в [3-5]. Результаты расчёта сведём в таблицу 8.

Таблица 6. Коэффициент обеспечения.

Угол	Месяц												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
0	0,37	0,53	0,75	0,94	1,00	1,00	1,00	0,97	0,80	0,59	0,42	0,32	0,72
10	0,36	0,54	0,82	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,88	0,61	0,42	0,31	0,74
20	0,44	0,63	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93	0,70	0,50	0,38	0,79
30	0,52	0,71	0,94	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,77	0,59	0,46	0,83
40	0,61	0,78	0,97	1,00	1,00	0,97	0,96	0,98	0,97	0,83	0,68	0,55	0,86
50	0,69	0,83	0,99	0,96	0,91	0,86	0,87	0,91	0,96	0,88	0,76	0,64	0,85
60	0,76	0,86	0,98	0,90	0,82	0,77	0,77	0,84	0,93	0,89	0,82	0,72	0,84
70	0,80	0,87	0,94	0,83	0,73	0,68	0,68	0,76	0,88	0,89	0,85	0,77	0,81
80	0,81	0,85	0,89	0,75	0,64	0,59	0,60	0,68	0,81	0,85	0,85	0,79	0,76
90	0,77	0,80	0,81	0,66	0,56	0,52	0,52	0,60	0,73	0,79	0,81	0,76	0,69

Таблица 7. Коэффициент использования.

Угол	Месяц												Среднее за год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,88	0,92	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
10	1,00	1,00	1,00	0,94	0,79	0,75	0,79	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	0,93
20	1,00	1,00	1,00	0,94	0,85	0,83	0,86	0,93	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95
30	1,00	1,00	1,00	0,96	0,92	0,92	0,94	0,97	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
40	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



Таблица 8. Доля замещаемой энергии от ФЭП.

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее значение
f	0,45	0,61	0,82	0,93	0,98	0,97	0,96	0,97	0,96	0,81	0,57	0,39	0,79

Пиковая мощность модуля составляет 50 Вт. Номинальное напряжение 12 В, при напряжении в точке максимальной мощности 18,4 В. При этом ток в точке максимальной мощности составляет 2,72 А. КПД составляет 16,3%.

Так же к установке предлагается 43 аккумуляторных батареи с напряжением 12 В и ёмкостью 100 А*ч.

Для заряда аккумуляторов предлагается к использованию 4 контролера с током заряда 60А. Для установки предлагаются контроллер серии МРРТ4860 (рис. 2) [3-5]. Контроллер оснащен технологией многопикового слежения и отслеживания точки максимальной мощности. Благодаря этому контроллер повышает эффективность использования ФЭП до 20% по сравнению с ШИМ методом. Алгоритм слежения контроллера позволяет точно отслеживать оптимальную точку работы на вольтамперной характеристике практически мгновенно. Контроллер позволяет получить точность слежения МРРТ до 99%. Технологии, применённые в контроллере, позволяют осуществлять заряд различных типов батарей. При превышении мощности солнечного модуля определённого уровня и превышении зарядного тока, контроллер снижает мощность заряда и зарядного тока до номинального значения.



Рисунок 1. Внешний вид ФЭП SM 50-12 P.



Рисунок 2. Внешний вид контроллера серии МРРТ4860.

Контроллер поддерживает мгновенный большой пусковой ток для ёмкостных нагрузок. Так же контроллер распознаёт напряжение аккумулятора.



Контроллер оснащён ЖК экраном, при помощи которого пользователь может контролировать работу устройства и изменять параметры системы. При превышении температуры выше установленное значение, предусмотрено снижение зарядного тока до понижения температуры контроллера.

Экономическая эффективность использования фотоэлектрических преобразователей

Стоимость электроэнергии при заданных затратах определим используя выражение:

$$C_{\text{ФЭП}} = \frac{I_2 \cdot \gamma_2 \cdot K_{\text{уд}}^{\text{ФЭП}} \cdot A_c}{Q_n \cdot f}, \quad (6)$$

где γ_2 – коэффициент отчислений на монтаж, 1,4.

$$C_{\text{ФЭП}} = \frac{0,05 \cdot 1,25 \cdot 10500 \cdot 64,6}{95265 \cdot 0,79} = 0,56 \text{ (руб / МДж)} .$$

Определяем себестоимость совместного использования по выражению:

$$C_{\text{СКЭ}} = C_{\text{ФЭП}} \cdot f_i^{\text{ГУ}} + C_{\text{тр}} \cdot (1 - f_i^{\text{ГУ}}) . \quad (7)$$

$$C_{\text{СКЭ}} = 0,56 \cdot 0,79 + 0,97 \cdot (1 - 0,79) = 0,65 \text{ (руб / МДж)} = 2,36 \text{ (руб / кВт} \cdot \text{ч)} .$$

Определим срок окупаемости, используя выражение:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{уд}}^{\text{ФЭП}} \cdot A_c}{Q_n \cdot (C_{\text{тр}} - C_{\text{СКЭ}})} . \quad (8)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{10500 \cdot 64,6}{95265 \cdot (0,97 - 0,56)} = 17,4 \text{ лет} .$$

Определение стоимости электроэнергии показывает, что система фотоэлектрических преобразователей является выгодной и окупается за срок службы, равный 20 годам.

Определим количество сэкономленного топлива по выражению:

$$\Delta \beta_T = \frac{Q_n \cdot f}{Q_p^n \cdot \eta_{\text{экс}}} . \quad (9)$$

$$\Delta \beta_T = \frac{95265 \cdot 0,79}{29330 \cdot 0,65} = 3,95 \text{ т.у.т.}$$

За счёт использования фотоэлектрических преобразователей ожидается экономия органического топлива, составляющая 3,95 тонн условного топлива.

Суммарная экономия органического топлива, при использовании солнечной энергии в энергосистеме насосной станции составляет 12,18 тонн условного топлива.

Использованная литература

1. Постановление Президента Республики Узбекистан Ш.М.Мирзиёева. «О дополнительных мерах по реализации инвестиционных проектов в области возобновляемых источников энергии». № ПП-3687, от 28.04.2018 г.



2. Постановление Президента Республики Узбекистан Ш.М. Мирзиёева. «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в Республике Узбекистан». № ПП-5063, от 09.04.2021 г.

3. Шерьязов С.К., Пташкина-Гирина О.С. Использование возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве: Учебное пособие. – Челябинск: ЧГАА, 2013. – 280 с.

4. Шерьязов С.К., Юнусов Р.Ф., Юсупов Ш.Б., Доскенов А.Х. Комплексное энергоснабжение с использованием возобновляемых источников энергии маломощных потребителей насосных станций // «Проблемы энерго- и ресурсосбережения» – Журнал. Специальный выпуск – 2021 г. – Т.: ТГТУ, 2021. – С. 323-329.

5. Разработка методики по использованию возобновляемых источников энергии для электропотребителей малой мощности и продлению их срока службы на насосной станции. – Отчёт по НИР. – Т.: ТИИМСХ, 2021. – 196 с. (Х/д № 28/2021). Отв. исполнитель Р.Ф.Юнусов.