

# Оценка энергетического потенциала крышной солнечной микроэлектростанции с фотоэлектрическим модулем ВСТ 10–12 для сельскохозяйственных потребителей

Л.П. Андрианова, д.т.н., профессор, М.Ф. Туктаров, к.т.н., доцент, А.Е. Усманова, ассистент, В.Г. Байназаров, аспирант, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ

В рамках технологической платформы «Перспективные технологии возобновляемой энергетики» в России в настоящее время решаются задачи вовлечения в хозяйственный оборот возобновляемых энергетических ресурсов (далее – ВЭР) [1–4]. На период развития до 2040 г. основная доля выработки электроэнергии солнечными энергоустановками смещается в сегмент крышных установок частных домов и крыш промышленных зданий и сооружений. Учитывая вышесказанное, была дана оценка энергоэффективности оригинальной солнечной микроэлектростанции (далее – СМ) с фотоэлектрическим модулем ВС 10–12.

Микроэлектростанция содержит модуль фотоэлектрический ВС 10–12, вырабатывающий расчётную солнечную электрическую энергию заданного напряжения постоянного тока, и вал вертикальный с электроприводом, снабжённым часовым механизмом с электроконтактной системой в виде часовой стрелки циферблата часового механизма, который подаёт почасовой сигнал привода вертикального вала азимутального слежения за солнцем. Зенитальное слежение за солнцем выполнено в виде наклона вертикального вала в северную сторону.

**Цель исследования** – определение энергоэффективности крышной солнечной микроэлектростанции с фотоэлектрическим модулем ВСТ 10–12.

**Материалы и методы исследования.** Солнечная микроэлектростанция с азимутальным и зенитальным слежением за солнцем включает в себя основание 1, на котором с южной и северной стороны на шарнирах 2 установлена площадка горизонтальная 3 [5, 6]. С южной стороны площадка 3 снабжена домкратом винтовым 4. На площадке горизонтальной 3 установлен вал вертикальный 5, на котором закреплён модуль фотоэлектрический 6. Вал вертикальный 5 центрируется крестовиной 7, закреплённой на площадке 3. На крестовине 7 закреплён диск 8 микровыключателей (на рисунке не показан), а на валу 5 ползуна установлены кольца контактные 9. Снизу вал 5 снабжён колесом зубчатым 10 с валом червячным 11, который связан с валом электропривода 12.

Оценка технического потенциала крышной СМ [2, 3] проведена с использованием лабораторной установки, представленной на рисунке 2.

Фотоэлектрический модуль ВСТ 10–12 содержит 72 прямоугольных элемента из мо-

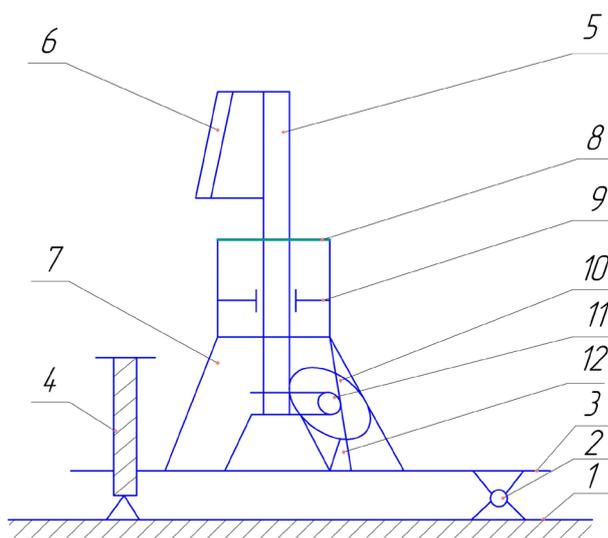


Рис. 1 – Общий вид солнечной микроэлектростанции с азимутальным слежением за солнцем: 1 – основание; 2 – шарниры; 3 – площадка горизонтальная; 4 – домкрат винтовой; 5 – вал вертикальный; 6 – модуль фотоэлектрический; 7 – крестовина; 8 – диск микровыключателей; 9 – кольца контактные; 10 – колесо зубчатое; 11 – вал червячный; 12 – электропривод

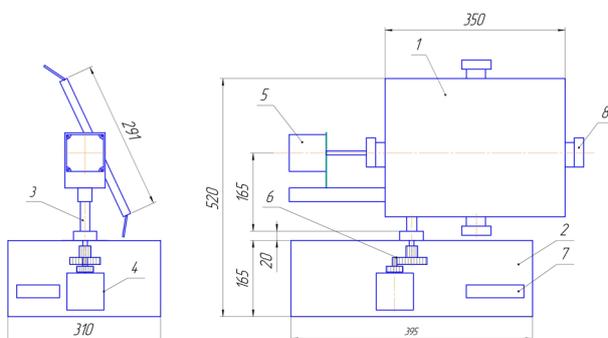


Рис. 2 – Общий вид лабораторной установки для исследования работы СМ:

1 – модуль фотоэлектрический; 2 – корпус; 3 – балка крепежная; 4 – электропривод азимутального слежения; 5 – электропривод зенитального слежения; 6 – редуктор главного электропривода; 7 – блок управления слежения за солнцем; 8 – солнечная панель вспомогательная

нокристаллического кремния, расположенных на прямоугольном основании с размерами  $351 \times 291 \times 17$  мм и коэффициентом заполнения  $K_{\text{зап}} = 0,953$ . Элементы закрыты специальным стеклом с коэффициентом пропускания  $\gamma = 92\%$ . Вольтамперная характеристика фотоэлектрического модуля для атмосферной массы AM1,5 приведена в таблице 1. Интенсивность солнечной радиации

равна  $e_0=1000$  Вт/м<sup>2</sup> с учётом потерь мощности в СМ при токе короткого замыкания  $I_{кз}=0,68$  А, напряжении холостого хода  $U_{хх}=21,6$  В и номинальной температуре  $\theta = +25^\circ\text{C}$ .

1. Вольтамперная характеристика фотоэлектрического модуля

Показатель	Полученные значения						
$I, \text{A}$	0	0,15	0,29	0,41	0,46	0,59	0,69
$U, \text{B}$	21,6	19,6	17,6	15,6	14,7	11,7	7,7

Расчёты подлежат:

- рабочие характеристики СМ –  $\eta(N)$  и  $\eta(I)$ ;
- характеристики потерь мощности в модуле –  $\Delta N(I)$  и  $\Delta N(N)$ ;
- нагрузочная характеристика  $-N(I)$ ;
- максимальная полезная мощность модуля –  $N_{\text{max}}$ .

При проведении расчёта использовались основные расчётные соотношения:

$$N = U \cdot I; \eta = N(I) / N_{\text{под}}; N_{\text{под}} = e_0 \cdot F_{\text{см}}; F_{\text{см}} = F_{\text{общ}} \cdot K_{\text{зап}},$$

$$\Delta N = N_{\text{под}} - N,$$

где  $F_{\text{общ}}$  – площадь основания модуля с фотоэлементами заданной формы, м<sup>2</sup>;

$N_{\text{под}}$  – мощность падающей радиации, Вт.

Для рассматриваемого фотоэлектрического модуля использовались:

$$F_{\text{см}} = 0,351 \cdot 0,291 \cdot 0,953 = 0,097 \text{ м}^2;$$

$$N_{\text{под}} = 1000 \cdot 0,097 = 97 \text{ Вт} = \text{const.}$$

Результаты расчёта основных энергетических характеристик фотоэлектрического модуля ВСТ 10–12 для тока в диапазоне 0–0,69 А и  $N_{\text{под}} = 97$  Вт представлены в таблице 2.

2. Расчёт основных энергетических характеристик модуля ВСТ 10–12

Показатель	Полученные значения						
$I, \text{A}$	0	0,15	0,29	0,41	0,46	0,59	0,69
$U, \text{B}$	21,6	19,6	17,6	15,6	14,7	11,7	7,7
$N, \text{Вт}$	0	2,94	5,10	6,40	6,76	6,90	5,31
$\Delta N, \text{Вт}$	97	94,06	91,9	90,6	90,24	90,1	91,69
$\eta, \%$	0	3,03	5,26	6,59	6,97	7,12	5,48

Получены следующие результаты:

- при холостом ходе:  $I=0$  и  $U=U_{хх} = 21,6$  В;  $\eta = 0$ ;  $N=0$ ;  $\Delta N=N_{\text{под}} = 97$  Вт;
- точка максимума  $N(I)$ : при  $I=0,59$  А;  $U=11,7$  В;  $\eta = 7,12$ ;  $N=6,9$  Вт;  $\Delta N=90,1$  Вт.

**Результаты исследования.** Рассмотрим расчёт энергетического потенциала фотоэлектрического модуля  $\mathcal{E}_{\text{техн}}$  для  $j$ -го месяца года при условии использования солнечной радиации с помощью модуля ВСТ 10–12, установленного под углом  $b_0$  с азимутом  $g$  в данный  $j$ -й месяц. Известны

значение валового удельного прихода солнечной радиации на рассматриваемую площадку  $\mathcal{E}_{\text{вал}}$ , площадь модуля  $F_{\text{см}}$ , количество СМ  $m$ ; технические характеристики модуля.

Полезная выработка  $m$  солнечных модулей общей площадью  $F_{\text{м}}=F_{\text{см}}$  за  $j$ -й месяц  $\mathcal{E}_{\text{техн } j}$  определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{техн } j} = \mathcal{E}_{\text{вал } j} \cdot F_{\text{см}} \cdot m \cdot \gamma \cdot \eta_{\text{смo}} \cdot K_{\text{зап}} \cdot K_{\text{т}} \cdot \eta_{\Delta N} \cdot \eta_{\Delta \mathcal{E}}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент светопропускания защитного покрытия фотоэлектрического модуля, о.е., с учётом поглощения стекла  $\gamma = 0,8 - 0,92$  о.е.;  $\eta_{\text{смo}}$  – номинальное КПД модуля для расчётных условий, о.е. В качестве указанных обычно принимается АМ1,5 с  $e_0=1000$  Вт/м<sup>2</sup> при  $\theta = +25^\circ\text{C}$ ;  $K_{\text{зап}}$ , о.е. – коэффициент заполнения солнечными элементами всей площади фотоэлектрического модуля:

для круглых элементов  $K_{\text{зап}} = 0,85$ ;

для квадратных и прямоугольных от 0,95 до 0,99;

$K_{\theta}$ , о.е. – коэффициент, учитывающий влияние температуры фотоэлектрического модуля на его КПД и рассчитываемый по формуле для заданной  $\theta$ :

$$K_{\theta} = 1 - a \cdot (T - T_0), \quad (2)$$

где  $a$ , о.е. – градиент изменения КПД модуля от температуры:

для кремниевых солнечных элементов  $a = \eta_{\text{смo}} / 120$ ;

для солнечного модуля на основе арсенида галлия

$$a = \eta_{\text{смo}} / 20; B(43)T = 273 + \theta; a \cdot T_0 = 273 + \theta;$$

$\eta_{\Delta N}$ , о.е. – потери мощности при последовательном соединении модуля, обычно  $\eta_{\Delta N} = 0,95 - 0,99$ ;

$\eta_{\Delta \mathcal{E}}$ , о.е. – потери энергии фотоэлектрического модуля при передаче её потребителю (потери в инверторе, зарядном устройстве, кабеле),  $\eta_{\Delta \mathcal{E}} = 0,9$ .

Далее рассмотрим точку с координатами  $j^0=54^\circ$  северной широты;  $y^0=55^\circ$  восточной долготы для г. Уфа Республики Башкортостан, в которой установлен один солнечный модуль с параметрами, постоянными в течение года  $b^0=j^0=\text{const}$ . Известны значения  $\mathcal{E}_{\text{бвал}}$  (табл. 3) и среднемесячная температура  $\theta$  (табл. 4) для каждого месяца  $j = 1 - 12$  (табл. 3).

Расчёт энергетического потенциала солнечной микроэлектростанции проведен для июля при  $\mathcal{E}_{\text{бвал}} = 169,57$  кВт·ч/м<sup>2</sup> и среднемесячной температуре июля  $\theta = +20^\circ$  (табл. 4).

Основные допущения, принятые при расчёте технического потенциала СМ:

- при расчёте среднемесячных показателей фотоэлектрического модуля температура окружающей среды принята равной температуре модуля, т.е.  $\theta = +20^\circ$ ;

3. Сумма солнечной радиации на горизонтальную поверхность за 22-летний период (широта–54, долгота–55) (метеоданные <https://data.nasa.gov>)

Месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Солнечная радиация	43,09	67,76	120,28	147,0	163,99	160,5	169,57	132,06	100,2	63,24	48,6	43,4

4. Среднемесячная температура (широта–54, долгота–55) (метеоданные <https://data.nasa.gov>)

Месяц	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Температура, °С	12,1	11,5	4,3	+5,9	+13,5	+17,7	+20	+18,2	+11,9	+4,6	2,9	10

–  $\eta_{\text{сэо}}$  соответствует среднемесячному КПД солнечного модуля  $\eta_{\text{см}}$  и принимается равным его максимальному значению по таблице 2, равным  $\eta_{\text{сэо}} = 7,12\%$ .

В реальных условиях следует учитывать изменения КПД от нагрузки потребителя за период  $\Delta t$ , т.е.

$$\eta_{\text{см}} = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\text{под}}} = \frac{N(t)\Delta t}{N_{\text{под}}(t) \cdot \Delta t} \quad (3)$$

При  $\gamma = 0,92$ ;  $K_{\text{зап}} = 0,953$ ;  $\eta_{\Delta\alpha} = 0,9$ ;  $\eta_{\Delta\text{N}} = 0,97$ ;  $F_{\text{см}} = 0,1021 \text{ м}^2$ .

$$a = \eta_{\text{сэо}} / 120 = 7,12 / 120 = 0,0591 / \text{град};$$

$$K_{\theta} = 1 - a \cdot (T - T_0) = 1 - 0,059 \cdot [(273^\circ + 20^\circ\text{C}) - (273^\circ + 25^\circ\text{C})] = 1,295.$$

Тогда удельный энергетический потенциал электроэнергии, вырабатываемый СМ в июле, составит:

$$\mathcal{E}_{\text{техн. j}} = 169,57 \cdot 0,1021 \cdot 0,92 \cdot 0,0712 \cdot 0,953 \cdot 1,295 \cdot 0,97 \cdot 0,9 = 1,22 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2.$$

Таким образом, 7,05% энергетического потенциала солнечной радиации используется полезно в одном фотоэлектрическом модуле ВСТ 10–12 при приведении всех расчётов на 1 м<sup>2</sup> полезной площади модуля.

#### Выводы

1. Удельный энергетический потенциал электроэнергии, вырабатываемой солнечной микроэлектростанцией с фотоэлектрическим модулем ВСТ-10–12 в июле в условиях г. Уфа, составляет 1,22 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

2. Внедрение солнечных микроэлектростанций на базе фотоэлектрических модулей с установкой их на крышах жилых домов и административных зданий целесообразно в различных широтах местности для надёжного электроснабжения децентрализованных потребителей.

3. Создание солнечных микроэлектростанций открывает реальную возможность для решения глобальной проблемы в области электроэнергетики и экологии для изолированных зон.

#### Литература

1. Российские технологические платформы в области энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии. М., 2011.
2. Андрианова Л. П., Рашитов А. Р. Российские перспективные технологии ветровой и солнечной энергетики // Новые задачи технических наук и пути их решения: сб. стат. междунар. науч.-практич. конф. Пермь: НИЦ АЭТЕРНА. № 11. В 3-х частях. Ч. 2. С. 51–53.
3. Андрианова Л. П., Рашитов А. Р. Российские технологические платформы в области энергоэффективности и использования возобновляемых источников энергии // Новые задачи технических наук и пути их решения: сб. ст. междунар. науч.-практич. конф. Пермь: НИЦ АЭТЕРНА. № 11. В 3-х част. Ч. 2. С. 53–56.
4. Андрианова Л. П., Усманова А. Е. Солнечные энергетические установки с повышенной энергетической эффективностью // Актуальные проблемы энергообеспечения предприятий: матер. междунар. науч.-практ. конф., проводимой в рамках XIV Российского энергетического форума. Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. С. 18–23.
5. Андрианова Л. П., Тукбаева А. Е. Повышение эффективности солнечной электростанции // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 3. С. 25–26.
6. Пат. на полезную модель № 94379 Солнечная электростанция / Л. П. Андрианова [и др.]. № 2010103657/22; заявл. 03.02.10; опубл. 20.05.10; Бюл. № 14. 2 с.

## Экспериментальное исследование бесперебойности электроснабжения сельских потребителей с применением альтернативных источников электроэнергии<sup>1</sup>

**В.И. Чиндяскин**, к.т.н., **А.Ф. Абдюкаева**, к.т.н., **Е.Ф. Кислова**, ст. преподаватель, **Е.В. Большаков**, инженер, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ

Бесперебойное электроснабжение крупных животноводческих и свиноводческих комплексов,

птичников и других предприятий АПК должно быть обеспечено в соответствии с «Правилами устройства электроустановок». Однако это не всегда удаётся. Износ линий электропередач, построенных в 70-е годы прошлого века, и соответственно установленного электрооборудования, по статис-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и министерства образования Оренбургской области. Решение бюро совета РФФИ, протокол № 4(216) от 17.04.2019 г.