

## Обработка результатов исследования характеристик солнечных фотоэлектрических станций и определение рациональных режимов работы при изменении угла наклона и спектрального состава облучения фотоэлектрических модулей

*А.С. Дебрин, аспирант, А.В. Бастрон, к.т.н., А.Ф. Семёнов, к.т.н., Т.П. Пашкевич, соискатель, ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ*

Масштаб использования солнечной энергии растёт с каждым годом. Технологии использования фотоэлектрических солнечных электростанций (ФСЭС) неуклонно совершенствуются и становятся всё более конкурентоспособными и привлекательными [1, 2].

**Материал и методы исследования.** Оценка современного состояния устройств показывает, что исследователями решаются задачи мобильности, надёжности, удобства эксплуатации, транспортировки, ремонта, выполнения ФСЭС с возможностью их круглосуточной работы в различных климатически сложных и не-

благоприятных эксплуатационных и погодных условиях, а также в горной местности, для автономного энергообеспечения объектов сельскохозяйственной, лесозаготовительной, рыбозаготовительной и промысловых отраслей, а также охотоведческих угодьях Красноярского края [3].

Выработка электрической энергии от ФСЭС за расчётный период определяется по методике, изложенной в ряде работ [3, 4].

Результаты теоретических расчётов выработки электрической энергии от одного фотоэлектрического модуля (ФЭМ) и от ФСЭС по месяцам в течение года, а также минимально необходимое энергопотребление автономных объектов были опубликованы ранее [4, 5] и сведены в таблицу 1.

1. Результаты теоретических расчётов выработки электрической энергии ФЭС в г. Красноярске

Месяц	Количество дней	Средняя продолжительность солнечного сияния	Количество пиковых солнечных часов		Кол-во произведённой электроэнергии одним модулем		Количество произведённой электроэнергии ФЭС за месяц
		$t_{ср.д}$ , ч	$T_{сол.сут}$ , ч	$T_{сол.мес}$ , ч	$W_{сут}$ , Вт·ч	$W_{мес}$ , Вт·ч	
Январь	31	58	1,87	58	130,97	4060	40,60
Февраль	28	90	3,21	90	225,00	6300	63,00
Март	31	162	5,23	162	365,81	11340	113,40
Апрель	30	202	6,73	202	471,33	14140	141,40
Май	31	224	7,23	224	505,81	15680	156,80
Июнь	30	278	9,27	278	648,67	19460	194,60
Июль	31	270	8,71	270	609,68	18900	189,00
Август	31	217	7,00	217	490,00	15190	151,90
Сентябрь	30	154	5,13	154	359,33	10780	107,80
Октябрь	31	96	3,10	96	216,77	6720	67,20
Ноябрь	30	49	1,63	49	114,33	3430	34,30
Декабрь	31	33	1,06	33	74,52	2310	23,10
Год	365	1833	5,02	1833	4212,22	128310	1283,1

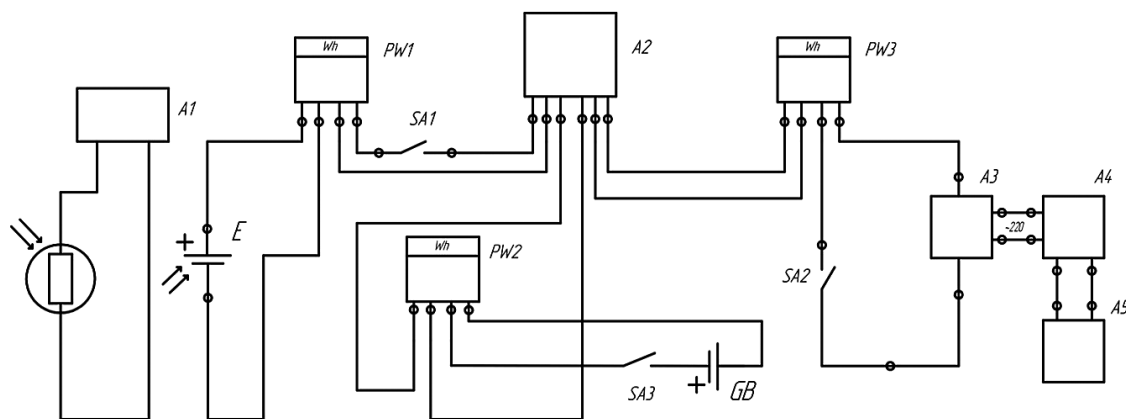


Рис. 1 – Принципиальная схема экспериментальной ФЭС:  
 A1 – пиранометр; A2 – контроллер заряда аккумулятора; A3 – инвертор; E – солнечный модуль; GB – аккумулятор;  
 PW1, PW2, PW3 – мультиметр; SA1, SA2 – выключатель

Для проверки результатов теоретического расчёта проведён эксперимент по исследованию характеристик ФЭС (рис. 1) [3].

**Результаты исследования.** Следующий этап обработки полученных результатов проводился путём построения моделей кривых и поверхностей с использованием регрессии, интерполяции и сглаживания [6–9].

По полученным результатам проведённых экспериментов прироста мощности в пасмурную и солнечную погоду можно сделать вывод, что

режим работы ФЭС во многом зависит от спектрального состава света, облучающего ФЭМ, так как солнечный свет в пасмурную погоду, проходя через тучи, изменяет свой спектральный состав в связи с поглощением и рассеиванием коротковолновой части спектра излучения (рис. 2, 3).

Для проведения опытного эксперимента по выявлению зависимости вырабатываемой мощности ФЭС от длины волны света, облучающего ФЭМ, представлена структурная схема экспериментальной установки (рис. 4, табл. 2).

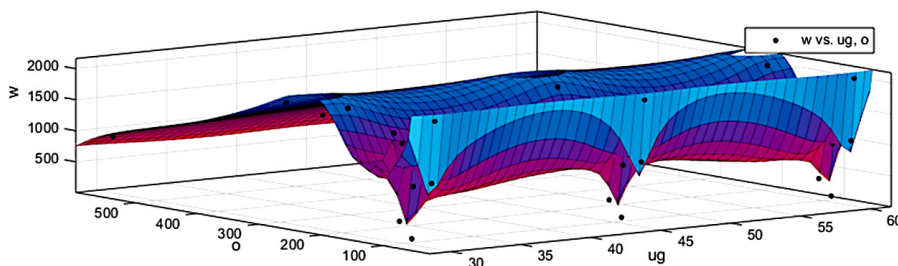


Рис. 2 – Результаты обработанных данных натуральных испытаний. Зависимость мощности от облучённости и угла наклона ФЭМ

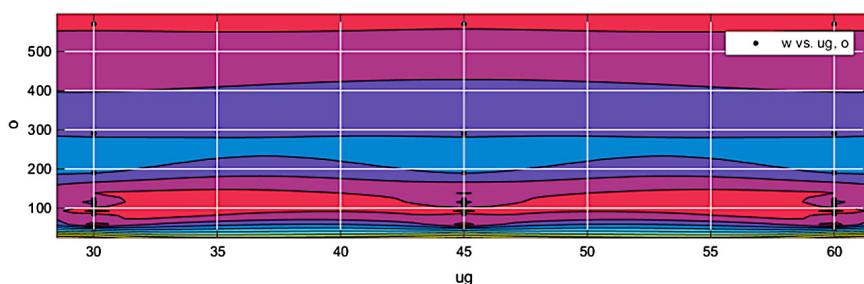


Рис. 3 – Преобразование трёхмерной плоскости в контурное изображение зависимости мощности от облучённости и угла наклона ФЭМ

**Фрагмент программного кода**

```
function [fitresult, gof] = createFit (ug, o, w)
%CREATEFIT(UG,O,W)
% Create a fit.
[xData, yData, zData] = prepare Surface Data( ug, o, w );
% Set up fitype and options.
ft = 'biharmonicinterp';
% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft,
% Make contour plot.
subplot( 2, 1, 2 )
```

**Результаты**

Бигармонического сплайн-интерполятора:  $\Phi(X,Y) =$  бигармонической поверхности, вычисленное из  $p$ , где  $x$  нормализуется средним значением 45 и  $std$  12.42 и где  $Y$  – нормированные по среднему 157.3 и  $STD$  140.9.  
 Коэффициенты:  $p =$  коэффициент структуры.  
 Критерий согласия:  $SSE: 2.626e-17$   
 $R$ -квадрат: 1.  
 Скорректированный  $R$ -квадрат: *Not-a-Number*  
 СКО: *Not-a-Number*

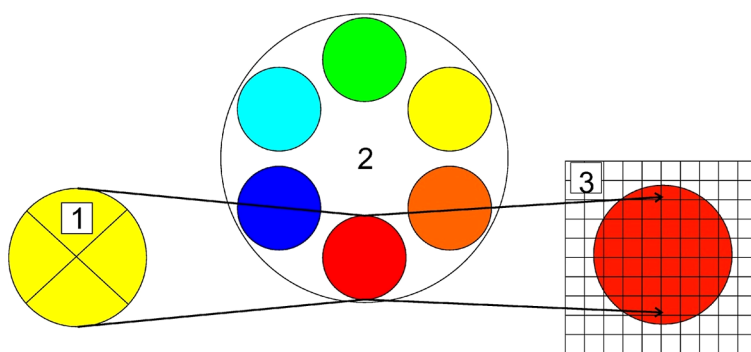


Рис. 4 – Структурная схема экспериментальной установки:  
 1 – источник света; 2 – набор концентрирующих светофильтров; 3 – фотоэлектрический модуль

2. Результаты эксперимента по выявлению зависимости вырабатываемой мощности ФЭС от длины волны света, облучающего ФЭМ

Цвет/длина волны, нм	Красный 625 – 740	Оранжевый 590 – 625	Жёлтый 565 – 590	Зелёный 500 – 565	Синий 440 – 485	Фиолетовый 380 – 440
Освещённость, Лк	90	100	97	96	44	13
Мощность, $W$	3,85	4,03	3,75	3,88	3,90	3,55

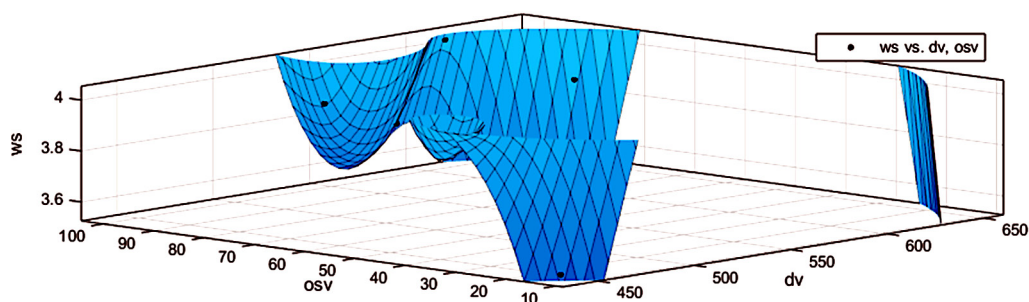


Рис. 5 – Графоаналитическая обработка эксперимента по выявлению зависимости вырабатываемой мощности ФЭС от длины волны света, облучающего ФЭМ

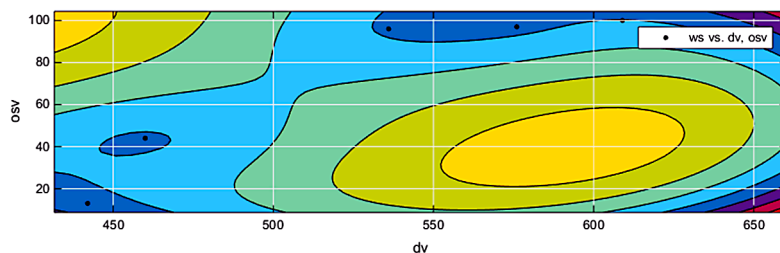


Рис. 6 – Контурная проекция плоскости изменения мощности, получаемой ФЭМ от облучения разным спектральным составом

**Фрагмент программного кода**

```
function [fitresult, gof] = createFit (dv, osv, ws)
%CREATEFIT(DV,OSV,WS)
% Create a fit.
% Data for 'untitled fit 1' fit:
[xData, yData, zData] = prepareSurfaceData( dv, osv, ws );
% Set up fitype and options.
ft = 'biharmonicinterp';
% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( [xData, yData], zData, ft, 'Normalize',
'on' );
xlabel( 'dv' );
ylabel( 'osv' );
grid on
```

Из-за небольшого количества данных с разной размерностью трехмерная плоскость не замкнутая, но наблюдается повышение значения мощности с увеличением длины волны (рис. 5). Для более детального изучения изменения мощности, получаемой от ФЭМ, построили контурную проекцию плоскости (рис. 6).

**Выводы.** Расчёты натуральных испытаний ФЭС по определению зависимости вырабатываемой мощности от облучённости и угла наклона солнечного модуля показали, что суммарная солнечная радиация за относительно пасмурный день составила 2064 Вт·ч/м<sup>2</sup>. Коэффициент преобразования солнечной энергии в электрическую составил 4,9 %. Генерируемое солнечным фотоэлектрическим модулем напряжение (следовательно, и энергия) в зависимости от его пространственного расположения может снижаться на 70 %.

Графоаналитическая обработка результатов натурального эксперимента по определению зависимости вырабатываемой мощности от облучённости и угла наклона солнечной панели выявила следующие зависимости режимов работы ФЭС:

- для оптимального режима работы ФЭС по выработке мощности необходимо облучение ФЭМ 300–400 Вт/м<sup>2</sup> и 400–500 Вт/м<sup>2</sup>, независимо от угла наклона, но максимальный пик выработки мощности наблюдается при облучении ФЭМ 300–400 Вт/м<sup>2</sup> и угле наклона 40<sup>0</sup>–55<sup>0</sup> и при облучённости ФЭМ 400–520 Вт/м<sup>2</sup> и углах наклона 30<sup>0</sup>–40<sup>0</sup> и 55<sup>0</sup>–65<sup>0</sup>.

Графоаналитическая обработка результатов натурального эксперимента по оценке прироста

**Результаты**

Biharmonic spline interpolant:  
 $f(x,y) =$  biharmonic surface computed from  $p$   
 where  $x$  is normalized by mean 545.5 and std 82.46  
 and where  $y$  is normalized by mean 73.33 and std 36.23  
 Coefficients:  
 $p =$  coefficient structure  
 Goodness of fit:  
 SSE: 2.169e–30  
 R-square: 1  
 Adjusted R-square: NaN  
 RMSE: NaN

энергии в солнечный и пасмурный день показала, что режим работы ФЭС во многом зависит от спектрального состава света, облучающего ФЭМ.

Графоаналитическая обработка результатов натурального эксперимента по определению режима работы ФЭС при изменении спектрального состава излучения показала, что вырабатываемая мощность наиболее максимальна при облучении ФЭМ длинами волн в диапазоне 520–625 нм.

Отсюда следует, что для рационального режима работы ФЭС необязательно иметь ясную солнечную погоду и высокую облучённость ФЭМ, достаточно установить перед ФЭМ светофильтр зелёного, жёлтого или оранжевого цвета, и даже в пасмурную погоду ФЭС будет работать с высоким показателем вырабатываемой мощности.

**Литература**

1. Дебрин А.С., Бастрон А.В., Урсегов В.Н. Обзор солнечных панелей и фотоэлектрических станций отечественных производителей // Вестник КрасГАУ. 2018. № 6 (141). С. 136–141.
2. Использование солнечной энергии в сельском хозяйстве / А.С. Кириченко, Р.Б. Гольдман, Л.А. Дайбова [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. 2019. №1 (117). С. 73–79.
3. Дубов В.А., Чебодаев А.В. Оценка эффективности использования ФЭС для автономного электроснабжения крестьянско-фермерского хозяйства // Вестник Иркутского государственного аграрного университета. 2015. № 68. С. 89–94.
4. Фотоэлектрическая станция для питания автономного устройства для добычи яда пчел / А.В. Бастрон, А.В. Чебодаев, В.Н. Урсегов [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 5 (20). С. 199–204.
5. Использование солнечных фотоэлектрических станций для автономных систем электроснабжения крестьянско-фермерских хозяйств / А.В. Чебодаев, А.В. Бастрон, В.Н. Урсегов [и др.] // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: матер. XIV междунар. науч.-практич. интернет-конференции. Орёл, 2016. С. 204–210.
6. Графоаналитическая обработка результатов натурального эксперимента по определению зависимости вырабатываемой мощности от облучённости и угла наклона фотоэлектрического модуля /

- А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, А.Ф. Семенов, К.А. Сутугина / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2019610369 от 10.01.2019.
7. Графоаналитическая обработка результатов натурального эксперимента по определению зависимости вольтамперных характеристик фотоэлектрического модуля от облученности и угла его наклона / А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, А.Ф. Семенов, К.А. Сутугина / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2019610980 от 18.01.2019.
  8. Программа по определению зависимости напряжения от облученности и угла наклона фотоэлектрического модуля / А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, А.Ф. Семенов, А.В. Себин / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2019618248 от 27.07.2019.
  9. Программа по определению зависимости силы тока от облученности и угла наклона фотоэлектрического модуля / А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, А.Ф. Семенов, А.В. Себин / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2019618249 от 27.07.2019.