

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ООО «ЭНЕРДЖИ СЕВАСТОПОЛЬ»

В.А. Сафонов, М.А. Низбудный, А.А. Восканян, Н.И. Варминская

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: nvarminska@gmail.com

В статье представлены результаты исследований на солнечной электростанции ООО «Энерджи Севастополь», а именно измерение поверхностной температуры в разных точках фотоэлектрических панелей, модулей по станции в целом по заранее составленной схеме измерений, измерение температуры воздуха между рядами модулей и скорости ветра в этих же точках станции для оценки воздействия воздушного потока на температурное состояние фотоэлектрических панелей и на их КПД, а также электрическую мощность.

Ключевые слова: солнечная электростанция, фотоэлектрический элемент, фотоэлектрическая панель, температура, освещенность, мощность.

Введение. Солнечная электростанция (СЭС) – инженерное сооружение, преобразующее солнечную радиацию в электрическую энергию. Способы преобразования солнечной радиации различны и зависят от конструкции электростанции [1].

Рассмотрим особенности СЭС, использующие фотоэлектрические модули. СЭС этого типа в настоящее время очень распространены. В общем случае СЭС состоит из большого числа отдельных модулей (фотоэлектрических панелей) различной мощности и выходных параметров. Данные СЭС широко применяются для энергообеспечения как малых, так и крупных объектов (частные коттеджи, пансионаты, санатории, промышленные здания и т.д.). Устанавливаться фотоэлектрические панели могут практически везде, начиная от кровли и фасада здания и заканчивая специально выделенными территориями. Установленные мощности тоже колеблются в широком диапазоне, начиная от снабжения отдельных насосов и заканчивая электроснабжением городов. Фотоэлектрическая панель – это несколько объединённых фотоэлементов; фотоэлемент – полупроводниковое устройство, прямо преобразующее солнечную энергию в постоянный электрический ток. В настоящее время из всех типов солнечных панелей наибольшее распространение получили: монокристаллические и поликристаллические.

Эффективная работа фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в процессе эксплуатации – одна из актуальнейших задач. Во время работы ФЭП под воздействием солнечного излучения их температура достигает высоких значений, из-за чего существенно снижается эффективность выработки электрической энергии.

В связи с огромным потенциалом, которым обладает солнечная энергия, учитывая оптимистичные прогнозы развития и наблюдаемые темпы снижения стоимости ФЭП, важно сегодня развивать исследования в области солнечной энергетики, чтобы в будущем не возникало зависимости от импортных производителей.

Особенности строения фотоэлементов (р-п переходов) вызывают снижение мощности панелей с ростом температуры. Типичный температурный коэффициент для кристаллических модулей составляет 0,45%/К, т.е. при повышении температуры модуля на каждый градус его выработка уменьшается на 0,45% [2].

Модули будут выдавать проектную мощность только тогда, когда они холодные, в идеальном состоянии и при ярком солнце. Обычно таких условий не бывает в реальности, поэтому панели должны иметь запас для работы при пониженной освещенности, под пылью и нагретыми на солнце. Солнечные панели работают лучше в холодную погоду. В нормальных условиях, когда солнечная

панель нагревается до 40 – 45°C, ее мощность снижается на 15 – 17% [2].

Мощность солнечной панели изменяется в зависимости от освещенности практически прямо пропорционально. А частичное затемнение панели вызывает падение мощности за счёт потерь в неосвещённом элементе, который начинает выступать в роли «паразитной» нагрузки.

Фотоэлектрическая станция ООО «Энерджи Севастополь». Объект расположен в г. Севастополь, ул. Богданова, 74а (рис. 1). Станция на фотоэлектрических элементах имеет номинальную расчетную мощность 2,35 МВт, расположена на земельном участке площадью 5,3 га с наибольшей шириной 275 м и наибольшей длиной 205 м. Проектная мощность 3,026 МВт не достигнута из-за того, что часть станции не достроена.

Солнечные элементы собираются в солнечных панелях, которые объединены в модули, содержащие 18 панелей. Солнечные панели производятся из псевдоквадратных монокремниевых или квадратных поликремниевых фотоэлектрических преобразователей, покрытых



Рис. 1. Фрагмент станции ООО «Энерджи Севастополь»

защитным прозрачным покрытием, например, кремниевые фотоэлектрические панели мощностью 240 – 260 Вт. Такая солнечная панель имеет размер 1,62 м². Солнечные панели соединены между собой в солнечные модули для того, чтобы получить большую мощность (например, 18 панелей по 260 Вт, соединенных вместе, эквивалентны модулю мощностью 4680 Вт). Характеристики фотоэлектрических панелей, установленных на станции, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики фотоэлектрических панелей (освещенность = 1000 Вт/м²; спектр = АМ 1,5; температура = 25°C)

	KV260M	KV245VAc	KV245VAI	KV240P
Мощность, Вт	260	245	245	240
Напряжение холостого хода, В	37,6	37,1	37,0	36,9
Ток короткого замыкания, А	8,9	8,74	8,6	8,67
Напряжение при макс. мощности, В	30,9	29,7	30,4	29,6
Ток при макс. мощности, А	8,41	8,25	8,06	8,11
Размер панели, мм	1635x989x40	1635x989x40	1635x989x40	1635x989x40
Количество фотоэлементов, шт	60	60	60	60
Размер фотоэлемента, мм	156 x 156	156 x 156	156 x 156	156 x 156
Тип фотоэлемента	Монокристаллический	Поликристаллический	Поликристаллический	Поликристаллический

В настоящее время станция имеет 15 рядов фотоэлектрических панелей. Каждый ряд представляет собой определенное количество модулей, расположенных вдоль одной линии (табл. 2). Модули состоят из панелей, установленных в одной плоскости, причем более короткая

грань корпуса панелей располагается горизонтально. В ширину расположено 6 панелей (5,96 м), в высоту – 3 панели (4,92 м). Всего 18 панелей в одном модуле (5,96 м x 4,92 м). Эта конструкция смонтирована на оцинкованных стальных опорах. Лицевая (освещаемая солн-

цем) сторона наклонена к горизонту под углом 27°. Всего на станции установлено 523 модуля, т.е. 9414 панелей.

Таблица 2. Количество модулей в рядах

Номер ряда	Модули, шт.
1	19
2	37
3	41
4	40
5	39
6	38
7	37
8	37
9	37
10	37
11	36
12	35
13	35
14	28
15	22
16 – 20	0

Электрически модули соединяются между собой и подключаются через клеммные коробки к электрощитам постоянного тока. Каждому щиту соответствует инвертор, имеющий номинальную мощность 100 кВт. На станции находятся 25 инверторов.

Используемые измерительные приборы. Для проведения измерений использованы следующие приборы:

- 1) лазерный пирометр RGK PL-8 – для измерения температуры поверхности модулей;
- 2) люксметр Ю116 – для измерения освещенности на поверхности панелей;
- 3) анемометр-термометр ADA AeroTemp – для измерения скорости ветра и температуры воздуха;
- 4) цифровой термометр – для определения температуры воздуха.

Методика измерений. Измерения производятся согласно ГОСТ Р МЭК 61853-1-2013 [3]. Указанный ГОСТ устанавливает порядок испытаний для определения влияния на рабочие характеристики панели угла падения света; определения зависимости температуры модуля от энергетической освещенности, температуры воздуха и скорости ветра, а также зависимости генерируемой энергии от спектральных характеристик.

На каждый день исследований составлен протокол измерений, в который занесены следующие данные:

- 1) дата и время проведения измерений;
- 2) температура воздуха вблизи станции ООО «Энерджи Севастополь»;
- 3) направление и скорость ветра вблизи станции;
- 4) температура фотоэлектрических панелей, измеренная по заранее составленной схеме измерений;
- 5) освещенность лицевой стороны модулей на момент измерения их температуры и снятия показаний с инвертора;
- 6) показания инверторов (электрическая мощность, напряжение, сила тока, выработка за день, частота переменного тока, температура инвертора).

Схема измерений. Согласно ГОСТ Р МЭК 61853-1-2013 определение температуры панелей KVAZAR осуществляется в 9 точках на ее поверхности с тыльной стороны, не освещаемой солнцем (каждая точка измерения должна находиться непосредственно за солнечным элементом, рис. 2).

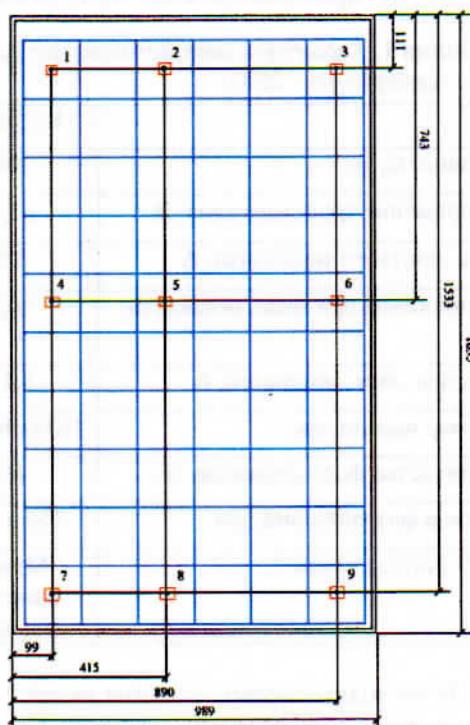


Рис. 2. Схема измерения температуры панели (вид лицевой стороны)

В модуле 18 панелей, и необходимо измерение температуры в 162 точках

(рис. 3). Например, для первого модуля ряда I проводились измерения в 18 панелях в 162 точках по горизонтальным (А – Г) и вертикальным (1 – 18) осям, а графики распределения по высоте температуры, измеренной с тыльной стороны по осям 3, 8, 9, 12, 18 представлены на рис. 4 (аналогичные графики для остальных осей здесь не приведены).

Фактическое измерение температуры в 162 точках модуля означает измерение

температуры в 162 фотоэлементах данного модуля. Неодинаковость значений температуры в отдельных фотоэлементах приводит к неодинаковости значений выдаваемой ими мощности. Такой массив измерений температуры фотоэлементов свидетельствует о необходимости учета различий в значениях выдаваемой фотоэлементами мощности при проектировании системы управления и коммутации.

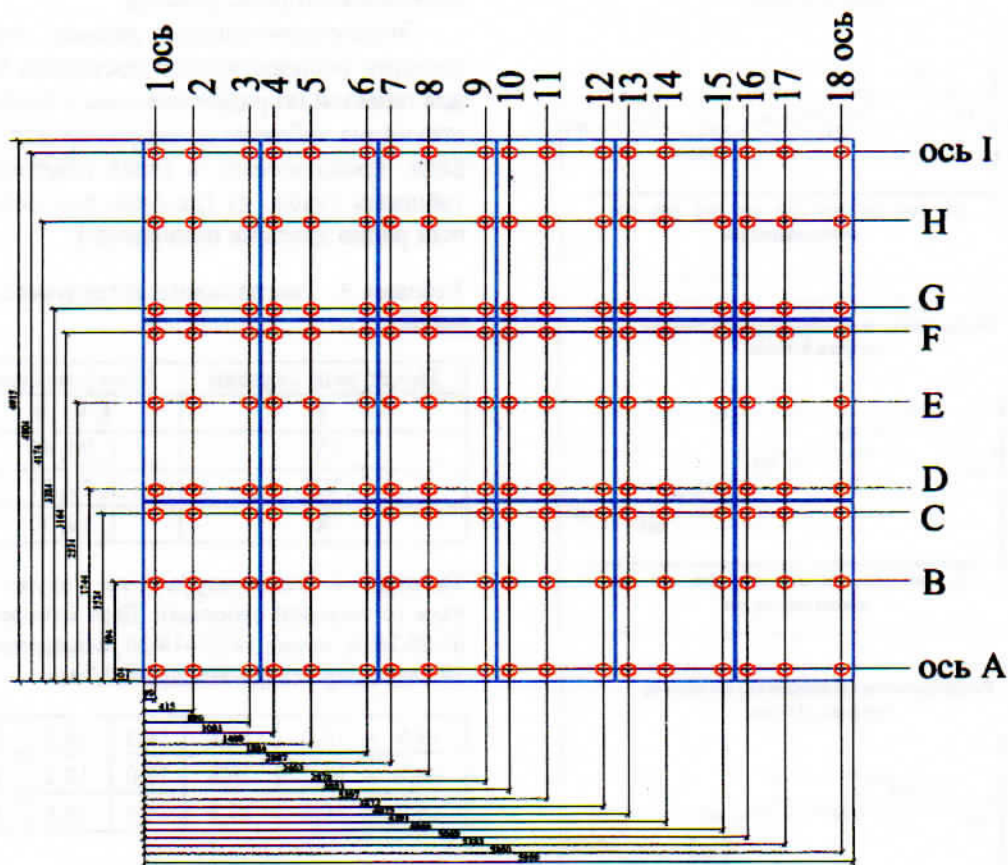


Рис. 3. Схема измерения температуры 1-го модуля I-го ряда (с тыльной стороны)

Из графиков (рис. 4) видно, что температура вверху модуля ниже, чем температура внизу и посередине.

Графики распределения температуры по ширине первого модуля ряда I, измеренной с тыльной стороны для осей А, С и D, представлены на рис. 5 (графики распределения температуры для остальных осей В, Е, F, G, Н, I здесь не приведены).

Из графиков (рис. 4, 5) следует неравномерность распределения температуры по высоте и ширине отдельных фотоэлектрических панелей и модулей. Это влияет на мощность отдельных панелей

и их выработку и, следовательно, выработку станции в целом.

Обобщая проведенные детальные измерения температуры по высоте и ширине модуля, можно перейти к измерению температуры только в 18 точках (вместо 162 точек) модуля, расположенных в центре каждой панели, так как для каждой панели сохраняется закономерность распределения температур: левее центральной точки температура элементов панели ниже, и соответственно, правее – температура выше; ниже центральной точки температура больше и выше этой точки – панель холоднее.

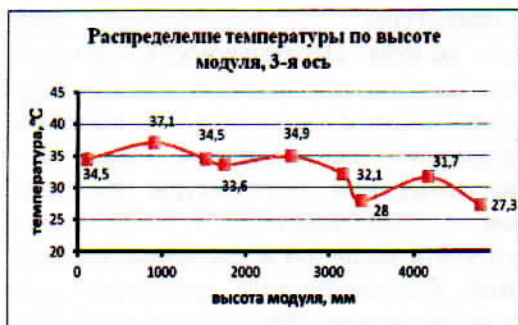


Рис. 4. Графики распределения температуры по высоте 1-го модуля I-го ряда

Итак, для фиксации температуры модуля выполняется замер в 18 точках (по одной точке на панель, рис. 6).

Такие замеры делаются для трех модулей из одного ряда станции. Исследованию подлежат не все ряды, а лишь те, которые занесены в табл. 3. При этом, номер ряда станции – порядковый номер ряда модулей, отсчитанный от северной стороны участка; номер модуля – порядковый номер модуля, отсчитанный от восточной стороны участка.

Экспериментальные данные исследования температурного состояния СЭС для панелей по рядам внесены в соответствующие таблицы и, например для 1-го ряда, представлены в ниже следующих таблицах (табл. 4) (данные для остальных рядов здесь не приведены).

Таблица 3. Расположение исследуемых панелей

Номер ряда станции	Номер модуля
I	1, 9, 19
IV	1, 20, 40
VII	1, 19, 37
X	1, 19, 37

Таблица 4. Температура 1-го модуля I-го ряда (с тыльной стороны). Дата измерения: 05.05.2016, время 14:25–14:30, освещенность 39 клк, ветер северо-западный 2,7 м/с

13,5	15,0	15,1	14,3	15,2	16,0
16,2	16,7	16,8	17,0	18,2	17,9
15,9	15,3	15,7	16,0	16,5	16,7

Температура 9-го модуля I-го ряда (с тыльной стороны). Дата измерения: 05.05.2016, время 14:30–14:37, освещенность 36 клк, ветер северо-западный 2,7 м/с

13,7	14,3	14,6	13,4	14,5	14,5
14,0	14,7	14,7	13,8	14,6	15,0
13,3	13,9	14,4	13,2	14,1	14,2

Температура 19-го модуля I-го ряда (с тыльной стороны). Дата измерения: 05.05.2016, время 14:42–14:48, освещенность 36 клк, ветер северо-западный 2,7 м/с

15,8	15,7	16,5	18,0	18,4	18,5
16,1	16,0	16,9	17,8	18,9	19,0
15,7	16,1	17,1	17,7	18,5	18,6

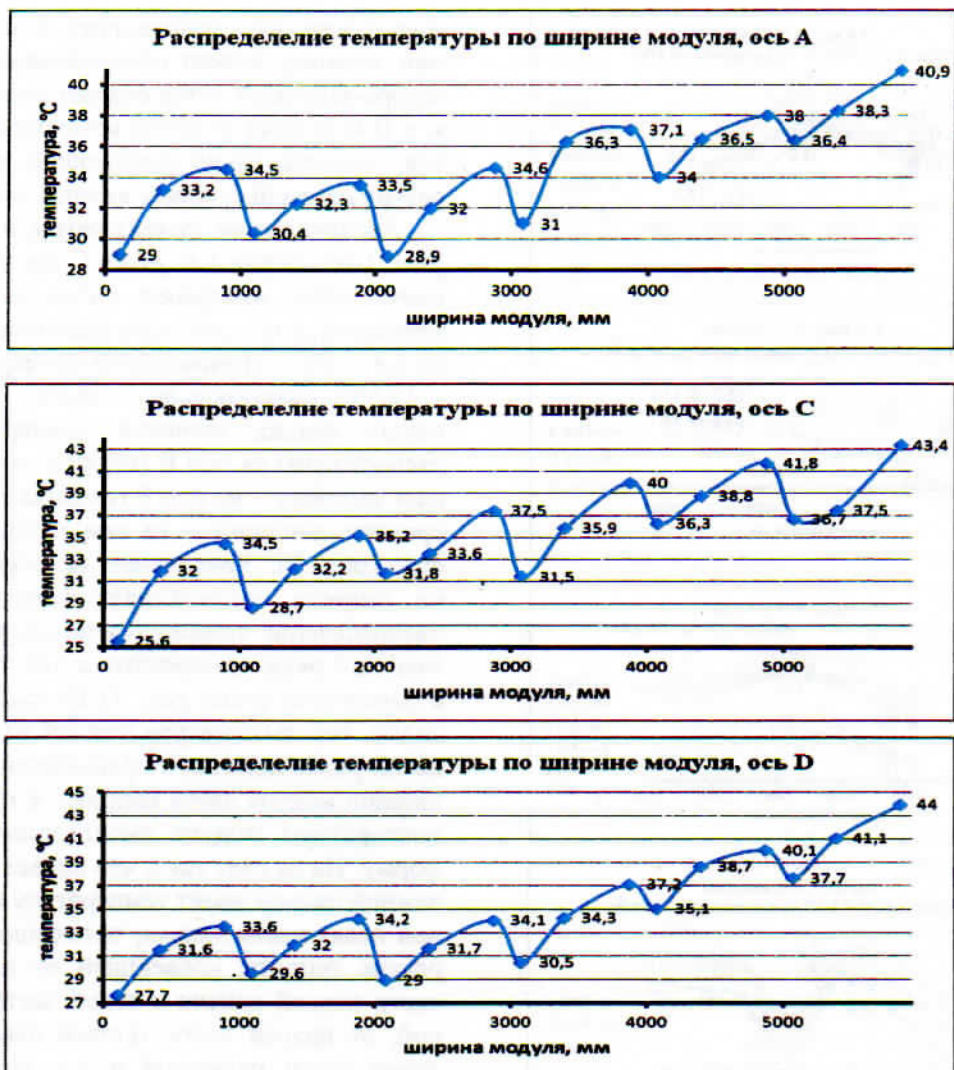


Рис. 5. Распределение температуры по ширине 1 модуля, 1 ряда с тыльной стороны, оси А, С и D

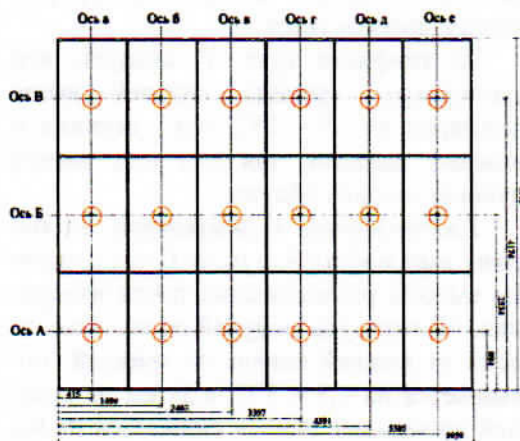


Рис. 6. Схема измерения температуры модуля (вид лицевой стороны)

Графики распределения температуры модулей по высоте и ширине (измеренной с тыльной стороны) представлены на рис. 7.

Распределение температуры по высоте 1-го модуля 1-го ряда. С увеличением высоты расположения точки измерения, температура модулей по всем шести осям от нижней панели до средней повышается на 0,5 – 1,5°C, а затем от средней до верхней панели снижается на 1,5 – 3°C. Минимальная температура – 13,5°C, максимальная – 18,2°C.

Снижение температуры обусловлено тем, что северо-западный ветер сначала охлаждал с тыльной стороны верхние панели, потом, нагревшись и снизив скорость движения, охлаждал средние и нижние панели с тыльной стороны. Поэтому эффективность отбора теплоты от модуля снижается со снижением высоты (т.к. скорость воздушного потока уменьшилась, а его температура увеличилась). Но при этом нижние панели

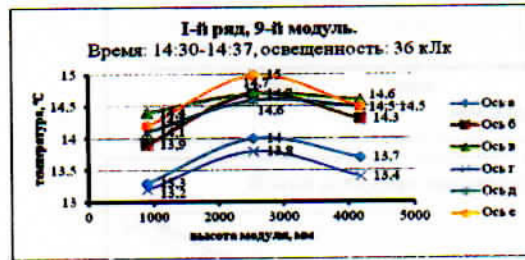
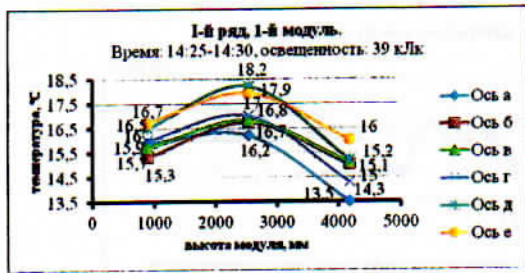


Рис. 7. Распределение температуры модулей I-го ряда по высоте и ширине

имеют меньшую температуру, чем средние, поэтому можно предположить, что северо-западный ветер создает между I-м и II-м рядами модулей воздушный поток, дополнительно снижающий температуру лицевой стороны нижней панели.

Распределение температуры по ширине 1-го модуля 1-го ряда. С продвижением точки измерения слева направо температура по трем осям увеличивается на 0,8 – 2°C. Минимальная температура – 13,5°C, максимальная – 18,2°C. Точки самых низких значений температуры расположены на оси В (верхняя ось), самых высоких – на оси Б (средняя ось), а средних значений – на оси А (нижняя ось) (рис. 7). Увеличение температуры по ширине подтверждает полученное распределение температур по ширине 1 модуля I ряда, измеренных в 162 точках с тыльной стороны (рис. 5). На графиках видно, что температура каждой из 6 панелей увеличивается с продвижением по ширине модуля слева направо, и график температуры модуля имеет волнистую форму. Но за счет того, что правая часть каждой панели имеет температуру выше, чем левая часть панели, происходит передача теплоты конвекцией от правой части первой панели к левой части второй, от правой части третьей панели к левой части четвертой и т.д. Причем, чем правее расположена панель в модуле, тем выше ее температура во всех точках, поэтому волнистый график «поднимается» вверх.

Из графиков (рис. 7) следует, что температура средних панелей выше примерно на 1,5 – 2°C, чем у верхних и нижних панелей, так как они имеют лучшие условия обдува.

Распределение температуры по высоте 9-го модуля 1-го ряда. С увеличением высоты расположения точки измерения, температура модулей по всем шести осям от нижней панели до средней повышается на 0,3 – 1°C, а затем от средней до верхней панели снижается на 0,3 – 0,5°C. Минимальная температура – 13,2°C, максимальная – 15°C. Снижение температуры обусловлено тем же, чем и в первом модуле этого же ряда. Температура девятого модуля в целом ниже, чем первого, потому что по середине него имеется просвет, через который

проходит воздушный поток, охлаждающий панели (в случае западного ветра).

Распределение температуры по ширине 9-го модуля I-го ряда. С продвижением точки измерения слева направо температура по трем осям увеличивается до просвета между модулями (до 4-ой точки включительно) на 0,7 – 1,1°C. После просвета температура резко снижается на 0,9 – 1,2°C, а дальше повышается до конца модуля на 0,7 – 1,2°C. Точки самых низких значений температуры расположены на оси А (нижняя ось), самых высоких – на оси В (средняя ось), а средних значений – на оси В (верхняя ось).

Распределение температуры по высоте 19-го модуля I-го ряда. С увеличением высоты расположения точки измерения, температура модулей по всем шести осям от нижней панели до средней повышается на 0,2 – 0,4°C, а затем от средней до верхней панели снижается на 0,3 – 0,5°C. Минимальная температура – 15,7°C, максимальная – 19°C. Снижение температуры обусловлено тем же, чем и в первом модуле этого же ряда.

Распределение температуры по ширине 19-го модуля I-го ряда. С продви-

жением точки измерения слева направо температура по трем осям увеличивается на 2 – 3°C. Точки самых низких значений температуры расположены на оси В (верхняя ось), самых высоких – на оси Б (средняя ось), а средних значений – на оси А (нижняя ось). Такое увеличение температуры связано с тем, что с левой стороны заканчивается ряд, и ветер без препятствий обдувает этот последний модуль.

Технологически, модули, установленные с зазором, имеют более низкие температуры в связи с тем, что интенсивнее обдуваются воздушным потоком. Так, например, 9-й модуль I-го ряда имеет температуру примерно на 4°C ниже, чем соседние модули.

Влияние температуры и освещенности на мощность генерации. Значение мощности генерации электроэнергии отображается на инверторе и зависит от следующих факторов:

- типов модулей, подключенных к инвертору, и их количества;
- типа схемы подключения модулей к инвертору и между собой;
- значения освещенности и температуры поверхности модулей.

Таблица 5. Характеристики инверторов станции

Инвертор № 3			
Дата	Освещенность, клк	Мощность, кВт	Температура, °С
05.05.2016	73	51,79	15,7 – 19,0
07.05.2016	83	70,39	25,8 – 32,9
09.05.2016	85	73,22	31,3 – 40,6
10.05.2016	67	48,77	25,5 – 29,6
12.05.2016	82	69,51	33,9 – 44,6
14.05.2016	71	54,88	43,1 – 46,3
26.06.2016	98	72,48	53,2 – 60,1

Инвертор № 4			
Дата	Освещенность, клк	Мощность, кВт	Температура, °С
05.05.2016	73	48,79	13,2 – 15,0
07.05.2016	84	68,02	32,1 – 35,1
09.05.2016	87	74,73	35,3 – 46,0
10.05.2016	66	45,43	25,1 – 31,4
12.05.2016	82	66,86	30,2 – 44,4
14.05.2016	71	52,92	43,1 – 46,3
26.06.2016	94	68,73	52,6 – 63,7

Количество и тип модулей, подключенных к одному инвертору, а также тип схемы подключения постоянны, поэтому эти два фактора не влияют на изменение мощности генерации. В данной работе

рассмотрено влияние только температуры и освещенности на мощность генерации. Точное значение мощности снимается с экрана инвертора. Освещенность измеряется только на одной панели в

каждом модуле, т.к. все остальные панели расположены под тем же углом к солнцу и их освещенность будет приблизительно такой же. Измерение температуры производится для некоторых модулей в ряду (табл. 3), потому что с небольшой погрешностью можно предположить, что температура остальных модулей имеет то же значение.

Сравним численные значения вырабатываемой мощности, освещенности и температуры панелей в разные дни измерений (табл. 5). Например, для инвертора № 3 имеем: 9 мая освещенность составляла 85 клк, а мощность – 73,22 кВт; 26 июня освещенность – 98 клк (т.е. увеличилась на 15,3%), а мощность – 72,48 кВт (т.е. уменьшилась на 1%). Температура модуля 9 мая составляла 31,3 – 40,6°С, а 26 июня – 53,2 – 60,1°С. Отсюда следует, что нагрев модуля снижает мощность выработки электроэнергии. С ростом освещенности панелей и снижением их температуры растет вырабатываемая мощность. Также при большем ветре вырабатываемая мощность возрастает, следовательно, для более эффективной работы станции необходимо воздушное или водяное охлаждение панелей.

Заключение. На фотоэлектрической станции ООО «Энерджи Севастополь» проведен комплекс исследований температуры фотоэлектрических элементов, панелей и модулей в процессе их функционирования в сопоставлении с результатами мониторинга метеорологических параметров и характеристик вырабатываемой электроэнергии, синхронизированных по времени. На основании исследований построены графики распределения температуры по высоте и ширине фотоэлектрических модулей, которое имеет неравномерный характер, зависит от направления ветра и расположения панелей в модуле. Разница температур панелей по высоте модуля достигает 10°С, что влияет на мощность

панелей и их выработку. Кроме того, имеет место неравномерность температуры и в самой панели по ширине, что также влияет на выработку электроэнергии отдельными фотоэлементами. Все изложенное свидетельствует о неравномерности выработки электрической энергии как фотоэлементами, так панелями и модулями. Имеющую место неравномерность температуры, а, следовательно, и мощностей электрической энергии, вырабатываемых фотоэлементами, панелями и модулями, следует учитывать при проектировании фотоэлектрических станций, систем управления и коммутации.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании практически обоснованного подхода к прогнозированию выработки электроэнергии солнечной фотоэлектрической станцией, в обосновании выбора технологических режимов эксплуатации станции в зависимости от различных метеопараметров и температурных состояний фотоэлектрических модулей, а также учтены при реализации дополнительного охлаждения панелей.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при решении вопроса о модернизации солнечной электростанции ООО «Энерджи Севастополь» путем установки концентраторов солнечной энергии и дополнительных ветроустановок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнечная_электростанция (дата обращения: 28.05.2016).
2. <https://www.solarhome.ru/basics/pv/techsolarpanels.htm?print=1> (дата обращения: 30.05.2016).
3. ГОСТ Р МЭК 61853-1-2013. Модули фотоэлектрические. Определение рабочих характеристик и энергетическая оценка.

TEMPERATURE RESEARCH OF THE SOLAR POWER STATION "ENERGYSEVASTOPOL"

V.A. Safonov, M.A. Nizbudny, A.A. Voskanyan, N.I. Varminskaya

Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»
Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article presents the results of research in the solar power station Ltd. "Energy Sevastopol", namely the measurement of the surface temperature of photoelectric panels in different points and modules in the whole station by the pre-prepared measurement scheme, temperature measurement between the rows of photoelectric modules and the wind speeds in the same station points to estimate the influence of wind flow to the temperature state of photoelectric panels and their efficiency, as well as electrical power.

Keywords: solar power station, photoelectric cell, photoelectric panels, temperature, luminosity, power.