

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ
СЕТЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ¹

© 2022 г. С. Е. Фрид^а, *, Н. В. Лисицкая^а

^аОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, корп. 2, Москва, 125412 Россия

*e-mail: s_frid@oivtran.ru

Поступила в редакцию 16.10.2021 г.

После доработки 12.11.2021 г.

Принята к публикации 24.11.2021 г.

Для всей территории России выполнена оценка влияния на значение коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) солнечных электростанций (СЭС) двух способов увеличения поступления солнечного излучения на поверхность фотоэлектрических модулей (ФЭМ): использования систем слежения за Солнцем (трекеров) и двусторонних ФЭМ. Расчет КИУМ проведен для фотоэлектрических модулей нескольких типов в климатических условиях России путем динамического моделирования в системе TRNSYS. Используются актинометрические и климатические данные базы многолетних спутниковых наблюдений NASA POWER с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе. Фотоэлектрические модули описывались пятипараметрической моделью, параметры которой определялись по приводимым изготовителями паспортным данным модулей. Проведено сравнение выработки электроэнергии и КИУМ для СЭС с вертикально- и наклонно-осевыми трекерами и СЭС с неподвижными фотоэлектрическими модулями южной ориентации с различными углами наклона к горизонту. Установлено, что максимальный эффект от использовании трекеров может быть достигнут в Заполярной зоне России, где выработка электроэнергии на СЭС может быть увеличена на 70–80%. В некоторых южных районах страны увеличение выработки при использовании трекеров может достигать 55%. Показано, что наиболее эффективно использование неподвижных двусторонних модулей и двусторонних ФЭМ с наклонно-осевыми трекерами (прирост КИУМ до 4% абс.). Вертикальная ориентация двусторонних модулей позволяет несколько увеличить КИУМ в высоких широтах. При перемещении в сторону меньших широт выигрыш в КИУМ от использования тыльной стороны модулей уменьшается до тех пор, пока полностью не компенсируется проигрышем из-за их неоптимальной ориентации.

Ключевые слова: фотоэлектрическая солнечная электростанция, коэффициент использования установленной мощности, система слежения за Солнцем, трекер, двусторонний фотоэлектрический модуль

DOI: 10.1134/S0040363622060030

Как и во многих других странах, развитие солнечной электроэнергетики в России поддерживается государством [1], однако механизм стимулирования отличается от принятого за рубежом, где покупка сетью энергии от возобновляемых источников осуществляется по повышенному тарифу [2]. Затраты инвестора на строительство электростанций компенсируются при соблюдении некоторых условий, которые недавно изменились. Для солнечных электростанций, отобранных по результатам проведенных до 1 января 2021 г. конкурсов инвестиционных проектов, одним из ключевых критериев отбора, наряду с удельными ка-

питальными затратами, был КИУМ, минимальное значение которого устанавливалась на уровне 14%. При более поздних конкурсных отборах ключевым параметром стала стоимость электроэнергии, отдаваемой в сеть, которая во многом определяется эффективностью использования установленной мощности СЭС.

Коэффициент использования установленной мощности представляет собой отношение выработки электроэнергии электростанцией за некоторый период времени (обычно за год) к выработке, которую она могла бы обеспечить при работе на полной (установленной) мощности в течение этого периода. Значение КИУМ определяется типом генерирующих мощностей и областью графика нагрузки, в котором работает электростан-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № 075-01056-22-00).

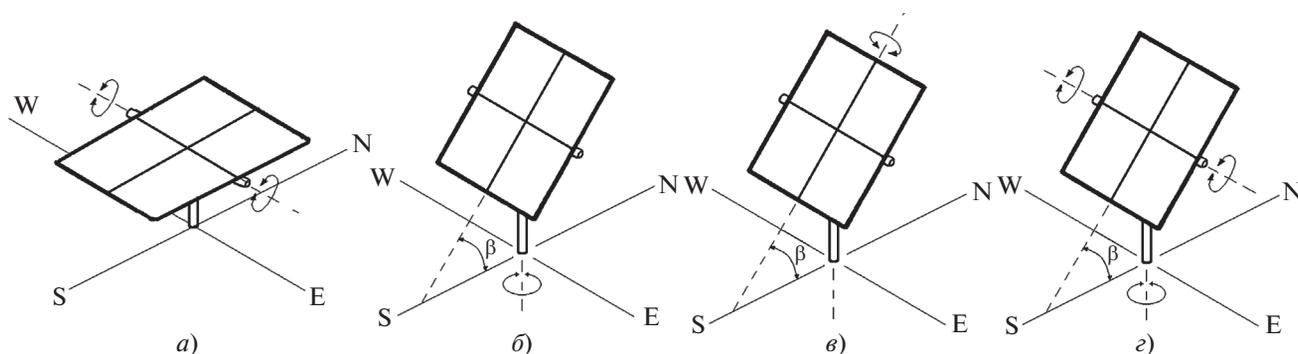


Рис. 1. Трекеры с горизонтальной осью запад – восток (а), вертикальной осью (б), наклонной осью (в), двухосный (г); N, S, W, E – север, юг, запад, восток; β – угол наклона плоскости ФЭМ или оси к горизонту [18]

ция. Так, КИУМ работающих в базовой области графика атомных электростанций составляет в США 87–93% (по данным Управления энергетической информации за 2011–2020 гг. [3]), в России – 78–83% [4–6]. На работающих в полупиковой и пиковой областях графика нагрузки тепловых электростанций и гидроэлектростанций коэффициент использования установленной мощности ниже и по данным Системного оператора Единой энергосистемы России [4–6] составляет 42–47%. Из электростанций, использующих возобновляемые источники энергии, наибольшие значения КИУМ характерны для геотермальных (70–87%) и биотопливных (54–78%) электростанций [3, 7].

Установленная мощность фотоэлектрической солнечной электростанции определяется суммарной мощностью ее фотоэлектрических модулей в условиях их испытаний [8, 9] при плотности потока солнечного излучения на поверхности модуля 1000 Вт/м^2 , что позволяет в первом приближении оценить КИУМ как отношение суммы поступившего на фотоэлектрические модули электростанции солнечного излучения к сумме излучения постоянной плотности 1000 Вт/м^2 за то же время. Для ФЭМ, установленных неподвижно под углом к горизонту, равным широте (что обеспечивает близкий к максимальному годовой приход на ФЭМ солнечного излучения), на территории России с характерными для нее климатическими условиями предельное значение КИУМ составляет 23%, а для следящей за Солнцем поверхности – около 30%.

Реальные значения КИУМ СЭС оказываются меньше указанных. Средний КИУМ действующих в мире фотоэлектрических СЭС мощностью более 1 МВт в период с 2010 по 2019 г. вырос с 14 до 18% [7]. В благоприятных для работы СЭС климатических условиях южных районов США годовой КИУМ составляет 19–26% [3] и, по оценкам, в пределе может достигать 33% [10]. В усло-

виях России в последние четыре года КИУМ эксплуатируемых СЭС был равен 14–15% [4–6], при этом полное возмещение государством капитальных затрат на создание электростанции в соответствии с принятыми правилами осуществлялось лишь при условии достижения КИУМ годового уровня не менее 75% нормативного значения 14% (10.5%) [1], что обуславливало необходимость тщательного отбора инвесторами района строительства СЭС.

Рост КИУМ СЭС можно обеспечить путем увеличения поступления солнечного излучения на поверхность фотоэлектрических модулей при использовании систем слежения за Солнцем (трекеров) [11], а также двусторонних ФЭМ [12–14], преобразующих в электроэнергию излучение, падающее не только на фронтальную, но и на тыльную поверхность ФЭМ. Применение трекеров активно обсуждалось в прошлом, когда их стоимость была в разы ниже стоимости производившихся тогда дорогих ФЭМ. Соотношение стоимостей трекеров и ФЭМ в последние годы изменилось, прежде всего за счет резкого уменьшения стоимости последних, тем не менее, интерес к возможному использованию систем слежения не снижается [15]. Типы и параметры систем слежения регламентируются международным стандартом [16]. На его основе подготовлен и отечественный ГОСТ [17].

Различают одноосные (с горизонтальной, вертикальной и наклонной осью) и двухосные системы слежения. Ось вращения горизонтально-осевого трекера располагается параллельно земной поверхности и может быть ориентирована в любом направлении. Хотя стандарт [16] рекомендует ориентацию север – юг, более распространена ориентация оси запад – восток (рис. 1, а), при которой слежение компенсирует лишь сезонное изменение высоты Солнца. Такой трекер допускает вместо непрерывного слежения изменение положения ФЭМ раз в день или еще реже, что упроща-

ет конструкцию системы слежения и снижает ее стоимость. Вертикально-осевой трекер (рис. 1, б) обеспечивает вращение ФЭМ, установленных под некоторым углом к горизонту, вокруг вертикальной оси при изменении азимута Солнца. Ось наклонно-осевого трекера (рис. 1, в) располагается под углом к горизонту (частный случай – полярная система слежения, у которой ось вращения параллельна оси вращения Земли, угол наклона равен широте), а плоскость ФЭМ параллельна оси.

Двухосные системы (рис. 1, г) обеспечивают нормальное падение прямого солнечного излучения на ФЭМ. Стандарт [16] различает такие трекеры по ориентации наружной оси. На практике реализуются два варианта: с креплением массива ФЭМ к опоре в одной точке и с опорным кругом, по которому на катках, вращаясь вокруг вертикальной оси, перемещается весь массив. В обоих случаях наружная ось вертикальна.

Интерес к использованию двусторонних фотоэлектрических модулей в целях повышения КИУМ СЭС возник в последние годы вследствие значительного снижения их стоимости. Они применяются как отдельно, так и вместе с трекерами и рассматриваются при сопоставлении вырабатываемой ими энергии с энергией, генерируемой при испытаниях в стандартных условиях (STC) [8, 9], в которых освещается только фронтальная поверхность ФЭМ.

Влияние использования трекеров и двусторонних ФЭМ на выработку электроэнергии СЭС исследовалось для отдельных точек на земной поверхности [13, 19–21]. Выполнялись также оценки увеличения поступления на поверхность ФЭМ солнечного излучения [22] и расчет КИУМ с использованием данных по среднемесячным потокам солнечного излучения и температурам окружающего воздуха [23–25]. Выработку фотоэлектрического модуля в указанных работах, как правило, рассчитывали с учетом коэффициента полезного действия ФЭМ с поправкой на температуру. Значение КИУМ СЭС при этом не вычисляли. Следует также отметить, что, несмотря на весьма глобальный охват оценок эффективности применения трекеров и двусторонних ФЭМ в [14, 15], расчеты в этих работах были проведены по данным наземных метеостанций, причем Россия в этих работах была представлена лишь одной метеостанцией, расположенной за Полярным кругом.

Настоящая работа является продолжением [26], в которой выполнена оценка влияния использования систем слежения и двусторонних ФЭМ на КИУМ СЭС, расположенных лишь в южных регионах России и Республике Узбекистан, и полученные результаты распространены на всю территорию России.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КИУМ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Влияние трекеров и двусторонних модулей на КИУМ оценивали по результатам динамического моделирования работы СЭС в системе TRNSYS [27, 28]. При этом использовали стандартные и сервисные модули TRNSYS, моделирующие работу ФЭМ и вычисляющие потоки прямого и рассеянного солнечного излучения на поверхностях произвольной ориентации [27]. Проведенные тесты позволили выбрать модули TRNSYS, наиболее адекватно учитывающие отраженное от земной поверхности солнечное излучение, и несколько скорректировать результаты ранее проведенных в [26] расчетов.

Реализованная в TRNSYS однодиодная пятипараметрическая модель фотоэлектрического модуля [27, 29, 30] адекватно описывает работу ФЭМ на базе кремниевых фотопреобразователей [31, 32]. Модель имела следующие параметры:

фототок и обратный ток p – n -перехода в стандартных условиях испытаний;

внутреннее и шунтирующее сопротивление;

коэффициент неидеальности вольтамперной характеристики, значение которого изменяется от 1.0 до 2.0.

Эти параметры определялись по имеющимся в документации производителей ФЭМ напряжениям и токам в точках холостого хода, токам короткого замыкания, максимальной мощности модуля, температурным коэффициентам тока короткого замыкания и напряжения холостого хода в стандартных условиях испытаний STC, а также температуре модуля для условий испытаний NOCT [8] путем решения системы нелинейных алгебраических уравнений [30, 33]. Использование этих данных позволяет построить вольтамперную характеристику ФЭМ при заданных плотности потока солнечного излучения на поверхности модуля и температуре окружающего воздуха.

Моделировали работу фотоэлектрических модулей трех типов: монокристаллических Suntech STP300S-20/Wfw [34] (паспортная мощность 300 Вт), мультикристаллических Suntech STP270-20/Wfw [35] (паспортная мощность 270 Вт) и гетероструктурных HVL-310/HJT [36]. Компания Wuxi Suntech Power Co., Ltd является одним из крупнейших в мире производителей ФЭМ [37], что позволило использовать параметры модулей Suntech в качестве типичных.

Источником актинометрических данных для расчетов служила база спутниковых наблюдений NASA POWER [38], включающая в себя дневные суммы суммарного солнечного излучения на горизонтальной поверхности, из которых с помощью алгоритма [27] генерировались последовательности часовых сумм. Прямую и рассеянную

составляющие солнечного излучения определяли с применением рекомендованных в TRNSYS моделей Рейндла (Reindl) [27], потоки солнечного излучения пересчитывали с горизонтальной поверхности на наклонную с помощью модели Переса (Perez) [27, 33]. Расчеты производили для всей территории России с пространственным разрешением, соответствующим разрешению данных по солнечному излучению базы NASA POWER $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе. В расчете использовали среднесуточные температуры окружающего воздуха и скорости ветра из той же базы данных. Учитывая довольно слабую чувствительность выработки ФЭМ к температуре окружающего воздуха, дневной ход последней не моделировали, а использовали среднедневную температуру. Расчетная схема и исходные данные были аналогичны [39], где было отмечено хорошее согласие результатов расчета в TRNSYS по данным NASA POWER с фактическими данными эксплуатации трех сетевых фотоэлектрических станций. Моделирование выполняли за весь период наличия в NASA POWER исходных данных в течение всего года (с 1984 по 2020 г.), значение КИУМ усредняли по всему расчетному периоду.

При расчете температурных поправок учитывали зависимость коэффициента поглощения солнечного излучения поверхностью ФЭМ от угла падения потока излучения и наличие на ней вплотную прилегающего стекла [30]. Моделирование СЭС с идеальным и реальным (GSL750 [39, 40]) инверторами показало, что КПД инвертора можно считать постоянным (98%) и влияние происходящего на практике его резкого падения в области низких мощностей на средний КИУМ СЭС пренебрежимо мало.

Для трекеров различных типов в модуле пересчета потоков солнечного излучения с горизонтальной поверхности на приемные поверхности другой ориентации изменяли параметры, определяющие тип трекера и расположение его оси или наклон ФЭМ [33]. Если в процессе работы азимут ФЭМ не изменялся, модули считались ориентированными на юг. Для трекера с горизонтальной осью и изменением положения ФЭМ раз в сутки угол наклона ФЭМ к горизонту задавали ежедневно как разность широты и склонения Солнца в этот день.

У двусторонних фотоэлектрических модулей (Suntech STP300S-60/Pfd+ [41] и двустороннего модуля, аналогичного HVL-310/HJT), падающий поток солнечного излучения рассматривали как сумму потоков, поступающих на лицевую и тыльную стороны ФЭМ. По данным [42] используемая доля падающего на тыльную сторону двусторонних ФЭМ производства компании Nevel потока излучения (коэффициент двусторонности) превышает 90%. У различных фотоэлектри-

ческих модулей коэффициент двусторонности может принимать и более низкие значения, в частности, у одного из первых отечественных двусторонних ФЭМ MSW-180/90 коэффициент двусторонности составлял 0.5. Расчет при таком значении коэффициента двусторонности привел к двукратному уменьшению эффекта от использования двусторонних ФЭМ по сравнению с рассчитанным при коэффициенте двусторонности равном 1.0.

Угол падения прямого солнечного излучения (при тепловом расчете модуля) задавали для поверхности (лицевой или тыльной), на которую он падал, а угол наклона плоскости ФЭМ к горизонту – только для лицевой поверхности. Рассчитываемый эффективный угол падения рассеянного излучения в любом случае превышает 60° и слабо влияет на тепловой режим ФЭМ. Затенение тыльной стороны двусторонних модулей рамами модулей и опорными конструкциями, запыление и загрязнение поверхности модулей и их деградация в расчетах не учитывали.

Учет частичного затенения земной поверхности за модулем для корректного расчета потока солнечного излучения, отраженного от нее на тыльную поверхность двустороннего ФЭМ, является отдельной задачей, решаемой в [14] с помощью предложенного в [43] алгоритма, довольно сложного и требующего наличия информации о дополнительных (помимо угла наклона к горизонту и азимута) параметрах расположения модулей. Поэтому применяли другой подход: рассматривали два варианта. В первом варианте затенение земной поверхности за модулем не учитывали, что давало оценку использования двусторонних ФЭМ сверху. Во втором варианте поверхность за модулем считали полностью затененной, т.е. прямое солнечное излучение на нее не поступало (за исключением случаев, когда Солнце освещало тыльную сторону модуля). Этот вариант обеспечивал оценку использования двусторонних ФЭМ снизу.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет средних значений КИУМ СЭС выполнен для всей территории России, которая была разделена на пять зон: Заполярную, Западную, Восточную, Юго-Западную и Юго-Восточную. Граница Заполярной зоны была проведена по Полярному кругу. Восточная и Западная зоны располагались севернее широты 54° и простирались до Полярного круга, граница между ними проходила по долготе 100° . Кроме того, в Восточную зону были включены южная часть Камчатки и Курильские острова. Южная часть территории России (южнее 55°) была разделена по меридиану 83° на Юго-Западную и Юго-Восточную зоны. В Юго-Восточную зону при этом попали та-

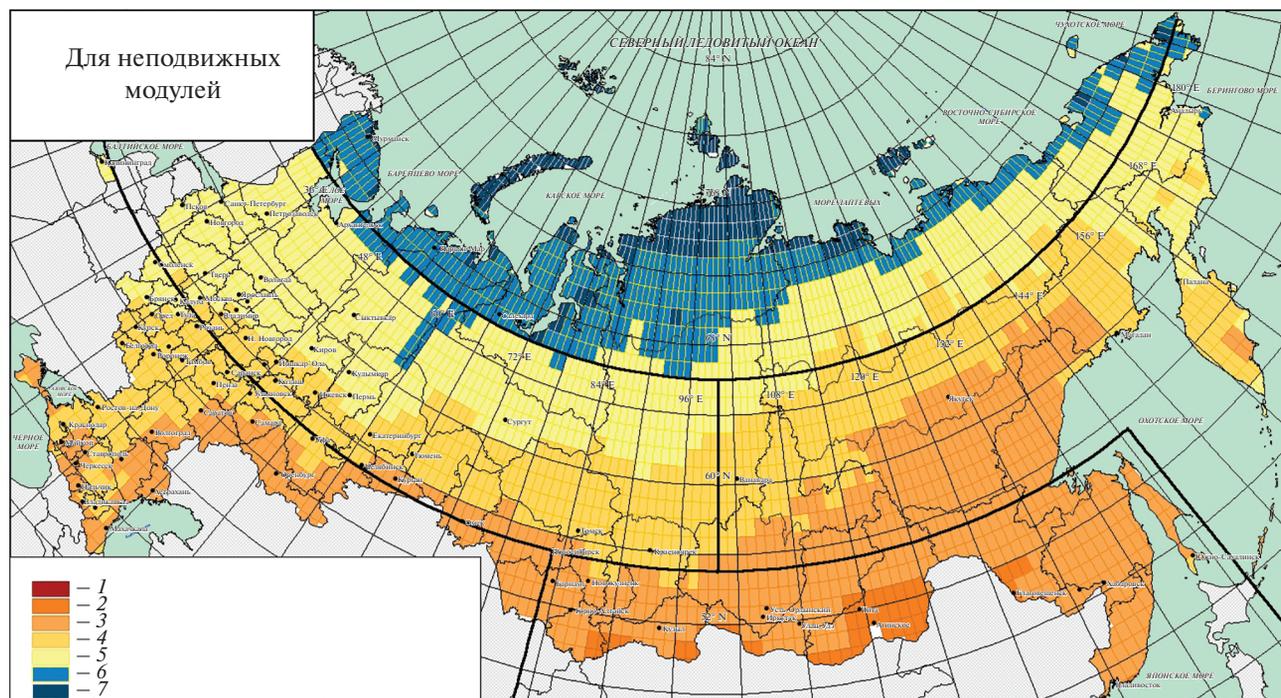


Рис. 2. Карта КИУМ СЭС с неподвижными модулями, установленными под углом наклона равным широте, и границами укрупненных зон.
КИУМ, %: 1 – 25–30; 2 – 20–25; 3 – 16–20; 4 – 14–16; 5 – 12–14; 6 – 10.4–12.0; 7 – остальные

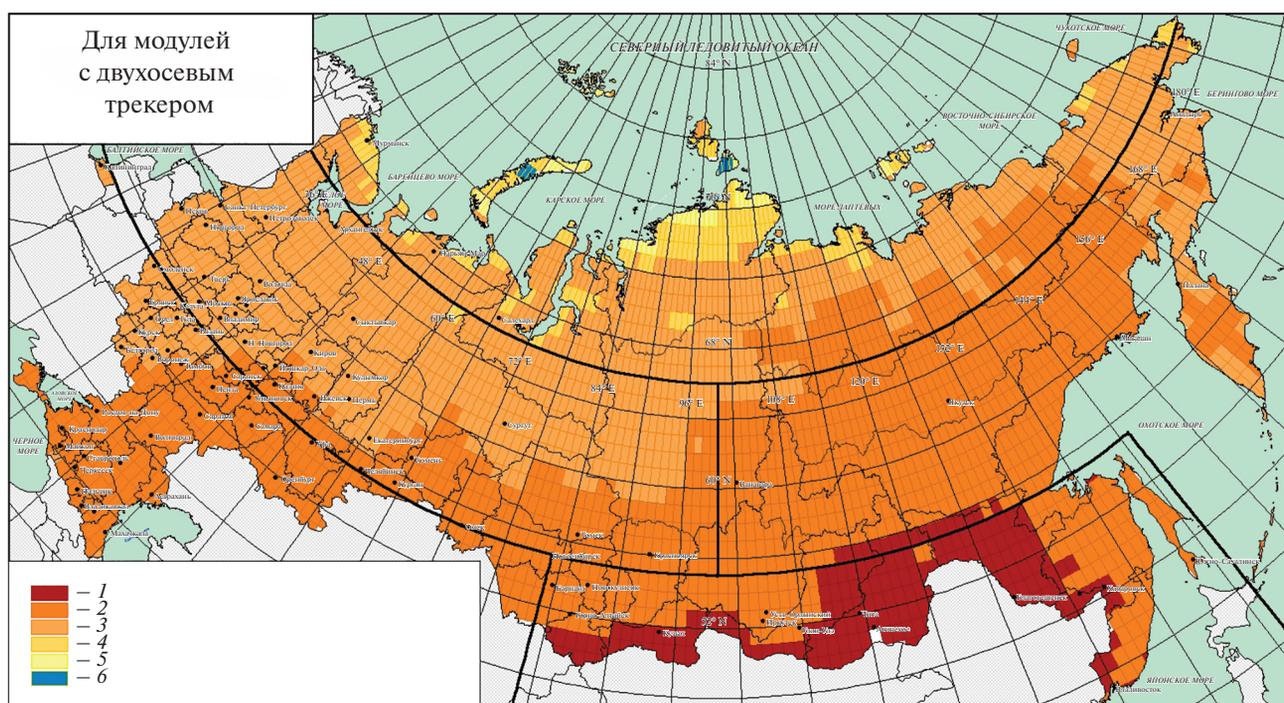


Рис. 3. Карта КИУМ СЭС с фотоэлектрическими модулями, оборудованными двухосной системой слежения за Солнцем, и границами укрупненных зон.
КИУМ, %: 1 – 25–30; 2 – 20–25; 3 – 16–20; 4 – 14–16; 5 – 12–14; 6 – 10.4–12.0

Таблица 1. Диапазоны изменения КИУМ, % (абс.) [в скобках % (отн.)] при изменении угла наклона неподвижных ФЭМ южной ориентации к горизонту в сравнении с базовым вариантом

Показатель	Зона				
	Заполярная	Западная	Восточная	Юго-Западная	Юго-Восточная
КИУМ (базовый вариант) под углом наклона равным широте	7.4–14.5	10.6–16.5	11.9–19.1	16.2–17.7	15.2–22.3
Изменение КИУМ, %, при угле наклона ФЭМ, град:					
на 15° меньше широты	От 0.4 до 0.9 (от 3 до 8)	От 0 до 0.5 (от 0 до 5)	От –0.3 до 0.5 (от –1 до 4)	От 0 до 0.1 (0)	От –0.6 до 0.7 (от –3 до 0)
на 15° больше широты	От –1.6 до –0.9 (от –14 до –8)	От –1.2 до –0.9 (от –11 до –5)	От –1.2 до –0.7 (от –9 до –4)	От –1.0 до –0.9 (от –6 до –5)	От –1.0 до –0.4 (от –6 до –2)

кие солнечные регионы, как Алтай и Забайкалье. Схемы зон и результаты расчета КИУМ показаны на рис. 2, 3.

В тех случаях, когда требовалось задавать угол наклона ФЭМ к горизонту, использовали следующие значения: равное широте, на 15° меньше и на 15° больше нее. Значения КИУМ для всей территории России изменялись от 6.4 до 33.3%. Расчетный КИУМ мультикристаллических и гетероструктурных модулей отличался от КИУМ монокристаллических, работающих в тех же условиях и с тем же трекером, максимум на 0.8% [4–5 % (отн.)]. Это подтверждает тот факт, что КИУМ слабо связан с КПД ФЭМ и определяется, в первую очередь, климатическими условиями места эксплуатации и температурными зависимостями напряжения холостого хода и тока короткого замыкания модуля. В этой связи далее представлены усредненные результаты расчетов без выделения конкретных моделей ФЭМ.

Значения КИУМ для СЭС с неподвижными ФЭМ южной ориентации, установленными под разными углами к горизонту, приведены в табл. 1.

Результаты расчетов подтверждают, что для большей части российской территории расположение ФЭМ под углом наклона к горизонту, равным широте, обеспечивает для неподвижных ФЭМ близкую к максимальной выработку электроэнергии. Лишь в Заполярье расположение ФЭМ под углом, несколько меньшим широты местности, более эффективно, что объясняется полярной ночью в данной зоне с отсутствием поступления солнечного излучения на поверхность Земли. При этом следует отметить, что отклонение угла наклона ФЭМ к горизонту $\pm 15^\circ$ от широты местности сказывается на изменении КИУМ в пределах не более 1.6% (абс.) и не более 14% годовой выработки энергии (относительном изменении КИУМ).

В табл. 2 показано влияние трекеров различных типов на увеличение КИУМ и годовую выработку электроэнергии в сравнении с ФЭМ (без трекера), расположенными неподвижно под углом к горизонту, равным широте местности.

Данные расчетов показали, что горизонтально-осевые трекеры наименее эффективны. Они не позволяют увеличить КИУМ более чем на 2.3% (абс.) и не более чем на 19% годовую выработку электроэнергии (в Заполярье). Эффект от применения вертикально-осевых и наклонно-осевых трекеров в южных регионах страны примерно одинаков и при КИУМ на уровне 16–22% для неподвижных ФЭМ их использование может дать прирост выработки электроэнергии до 33%. В северных районах эффект от применения вертикально-осевого трекера оказывается выше и доходит до 7.4% (абс.) роста КИУМ или до 55% увеличения выработки, что приближается к положительному эффекту от двухосного трекера [до 7.7 % (абс.)] или до 58% роста выработки.

Применение двусторонних ФЭМ оказалось наиболее эффективным для неподвижно установленных ФЭМ или вместе с наклонно-осевыми трекерами. Без учета затенения земной поверхности за модулем увеличение КИУМ благодаря применению двусторонних ФЭМ достигает 4% (прирост выработки до 19%, а для Заполярья до 31%), что соответствует заявляемым производителями пределам повышения мощности и выработки 20–25% [41, 44]. В расчете с полностью затененной земной поверхностью увеличение КИУМ получается на 0.9–1.9% меньше (а относительный прирост выработки в большинстве случаев на 5–9% меньше). В среднем наибольший эффект (3.1% и до 29% повышения выработки) наблюдается также для неподвижно установленных двусторонних модулей и двусторонних ФЭМ в сочетании с наклон-

Таблица 2. Диапазоны увеличения КИУМ, % (абс.), в скобках % (отн.), при применении различных трекеров в сравнении с базовым вариантом

Показатель	Зона				
	Заполярная	Западная	Восточная	Юго-Западная	Юго-Восточная
КИУМ (базовый вариант без трекера) при угле наклона равном широте, %	7.4–14.5	10.6–16.5	11.9–19.1	16.2–17.7	15.2–22.3
Увеличение КИУМ, %, при применении трекеров:					
горизонтально-осевого	1.2–2.3 (15–19)	1.2–2.2 (9–17)	0.9–2.3 (6–16)	1.4–1.5 (8–9)	0.9–1.7 (6–9)
горизонтально-осевого с ежедневной подстройкой	0.7–1.1 (5–0)	0.7–0.9 (5–7)	0.6–1.0 (5–6)	0.9 (5)	0.7–1.2 (4–5)
вертикально-осевого	2.6–7.4 (36–55)	4.1–6.2 (31–49)	3.1–7.3 (22–49)	5.1–5.5 (30–33)	3.5–6.3 (21–33)
наклонно-осевого	2.4–6.9 (33–51)	3.9–5.8 (30–46)	2.9–7.0 (22–51)	5.0–5.4 (30–32)	3.5–6.5 (23–31)
двухосного	3.0–7.7 (41–58)	4.5–6.6 (34–52)	3.5–7.7 (25–52)	5.7–6.2 (35–37)	4.1–7.5 (27–37)

Таблица 3. Увеличение КИУМ, %, [в скобках % (отн.)], благодаря использованию двусторонних ФЭМ по сравнению с односторонними (без затенения земной поверхности за модулем)

ФЭМ	Зона				
	Заполярная	Западная	Восточная	Юго-Западная	Юго-Восточная
Неподвижный под углом наклона равным широте	2.2–3.5 (23–31)	2.8–3.4 (19–28)	2.8–3.5 (17–26)	3.1–3.2 (18–19)	2.9–3.6 (16–19)
С трекером:					
горизонтально-осевым	1.5–2.4 (10–19)	2.0–2.8 (9–19)	1.8–2.7 (12–17)	2.5–2.7 (14)	2.4–3.0 (12–16)
горизонтально-осевым с ежедневной подстройкой	1.8–3.0 (18–24)	2.5–2.9 (16–22)	2.1–3.0 (14–21)	2.8–2.9 (16)	2.6–3.3 (13–17)
вертикально-осевым	2.0–2.7 (12–21)	2.4–2.9 (13–16)	2.5–3.1 (12–17)	2.9–3.1 (13–14)	2.7–3.5 (12–15)
наклонно-осевым	2.3–3.9 (16–26)	2.8–3.7 (14–23)	3.2–4.0 (14–23)	3.5–3.7 (16–17)	3.3–4.0 (14–18)
двухосным	1.8–2.7 (12–19)	2.4–3.0 (13–16)	2.5–3.1 (11–17)	3.0–3.2 (13–14)	2.8–3.6 (11–16)

но-осевым трекером, причем прирост КИУМ по мере продвижения на север увеличивается.

Данные расчетов диапазонов увеличения КИУМ благодаря использованию двусторонних ФЭМ по сравнению с односторонними представлены в табл. 3, 4.

Был исследован также популярный вертикальный вариант установки двусторонних ФЭМ [25, 42], у которых плоскость модулей могла располагаться как в направлении запад – восток (лицевая поверхность модуля ориентирована на юг), так и в направлении север – юг. Результаты расчета для

Таблица 4. Увеличение КИУМ, %, [в скобках % (отн.)], благодаря использованию двусторонних ФЭМ по сравнению с односторонними (с затенением земной поверхности за модулем)

ФЭМ	Зона				
	Заполярная	Западная	Восточная	Юго-Западная	Юго-Восточная
Неподвижный под углом наклона равным широте	1.9–2.6 (17–27)	2.0–2.5 (12–22)	1.9–2.5 (10–20)	1.9–2.0 (11–12)	1.7–2.1 (8–13)
С трекером:					
горизонтально-осевым	1.0–1.3 (7–13)	1.2–1.5 (8–11)	1.2–1.6 (7–12)	1.5 (8)	1.4–1.6 (6–10)
горизонтально-осевым с ежедневной подстройкой	0–1.1 (0–10)	0.8–1.6 (6–11)	0.7–1.7 (4–13)	1.6 (9–10)	1.5–1.7 (7–11)
вертикально-осевым	1.5–1.8 (8–16)	1.7–1.9 (8–12)	1.6–2.0 (7–12)	1.7–1.8 (8)	1.6–1.9 (6–10)
наклонно-осевым	1.9–2.3 (10–21)	2.1–2.4 (10–15)	2.0–2.9 (9–16)	2.2–2.3 (10–11)	2.1–2.4 (8–13)
двухосным	1.2–1.7 (7–14)	1.6–1.9 (8–11)	1.5–2.2 (6–13)	1.9 (8–9)	1.8–2.1 (6–11)

Таблица 5. Увеличение КИУМ, %, и относительный прирост выработки, %, благодаря использованию установленных вертикально двусторонних ФЭМ по сравнению с односторонними без затенения земной поверхности за модулем и с затенением (в скобках)

Показатель	Зона				
	Заполярная	Западная	Восточная	Юго-Западная	Юго-Восточная
Увеличение КИУМ, %, при ориентации плоскости ФЭМ:					
запад – восток	1.7–2.0 (1.3–1.6)	0.4–1.8 (от –0.1 до 1.5)	0.2–1.9 (от –0.2 до 1.4)	0–0.5 (от –0.6 до 0)	От –0.7 до 0.8 (от –1.4 до 0.4)
север – юг	1.2–3.0 (1.0–2.7)	0.2–2.6 (от –0.1 до 2.3)	От –1.0 до 2.4 (от –1.2 до 2.1)	0.2–0.6 (от –0.1 до 0.2)	От –1.2 до 0.6 (от –1.7 до 0.2)
Относительный прирост выработки, %, при ориентации плоскости ФЭМ:					
запад – восток	13–23 (9–20)	3–17 (от –1 до 14)	1–15 (от –1 до 11)	0–3 (от –4 до 0)	От –4 до 5 (от –7 до 2)
север – юг	13–25 (11–23)	1–22 (0–20)	От –4 до 20 (от –7 до 17)	1–3 (от –1 до 1)	От –7 до 3 (от –9 до 1)

земной поверхности без снега при альбедо (отражательной способности) около 0.2 приведены в табл. 5.

Обычно предполагается, что за счет вертикального расположения модулей удается собрать больше излучения, чем падает на одну оптимально ориентированную наклонную поверхность, благодаря большому количеству излучения, падающего на

тыльную сторону ФЭМ. Данные расчета показывают, что для северных территорий это действительно так, особенно для Заполярья, где оптимальный угол наклона плоскости ФЭМ близок к 90°, а применение двусторонних модулей позволяет генерировать электроэнергию в полярный день круглые сутки. При перемещении в южном направлении выигрыш в КИУМ от использования тыльной стороны модулей уменьшается, по-

ка он не будет полностью компенсирован проигрышем из-за их неоптимальной ориентации. Такой результат получается как при ориентации вертикально установленных ФЭМ запад – восток, так и при ориентации север – юг. В последнем случае использование двусторонних ФЭМ по данным [25] имеет смысл только при небольшом (примерно 2 м) расстоянии между рядами модулей, когда существенное влияние на выработку оказывает их взаимное затенение.

Необходимо отметить, что все расчеты, в том числе и для двусторонних ФЭМ, были проведены без учета снежного покрова, т.е. с “летним” рекомендованным в [27] значением альbedo 0.2. Проверка была выполнена моделированием ФЭМ, установленных неподвижно под углом равным широте, а также оборудованных наклонно-осевым трекером, в точке на территории России с максимальным альbedo (самое большое значение альbedo наблюдается на Алтае на границе с Казахстаном (49° с.ш., 85° в.д.) в декабре [38]). В этой точке альbedo принимали равным 0.2 в апреле–октябре и 0.5 в остальные месяцы. Прирост КИУМ по сравнению с вариантом круглогодичного альbedo 0.2 составил для односторонних модулей 1.2% (абс.), для двусторонних 1.0%. Для наклонно-осевого трекера КИУМ по сравнению с вариантом круглогодичного альbedo 0.2 увеличился на 3.6 и 3.5% соответственно. Таким образом, изменение альbedo (в естественных пределах, без применения специальных отражателей) на эффективность двусторонних ФЭМ по сравнению с односторонними влияет весьма слабо.

ВЫВОДЫ

1. Размещение систем слежения за Солнцем (трекеров) и двусторонних фотоэлектрических модулей влияет на коэффициент использования установленной мощности СЭС. В результате расчетов массивов КИУМ для территории России с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе установлено, что максимальный эффект достигается в Заполярной зоне, где выработка электроэнергии СЭС может быть увеличена на 70–80%. В южных регионах увеличение выработки может достигать 55%.

2. Из одноосных трекеров наибольший и примерно одинаковый эффект в южных регионах обеспечивают вертикально-осевые и наклонно-осевые трекеры. В северных регионах эффект от вертикально-осевого выше и доходит до полуторакратного роста КИУМ, что вплотную приближается к эффекту от двухосного трекера. Горизонтально-осевые трекеры гораздо менее эффективны.

3. Влияние на КИУМ использования двусторонних модулей – наибольшее для неподвижно установленных ФЭМ и вместе с наклонно-осевы-

ми трекерами. Относительный прирост КИУМ за счет применения двусторонних ФЭМ достигает 19%, а для Заполярья 31%, что соответствует заявляемым производителями пределам прироста мощности и выработки 20–25%.

4. В расчетах с полностью затененной земной поверхностью за модулем относительный прирост КИУМ на 5–9% меньше, чем без учета затенения. Увеличение альbedo земли в естественных пределах (без применения специальных отражателей) не приводит к заметному повышению эффекта от применения двусторонних модулей.

5. Благодаря вертикальной ориентации двусторонних ФЭМ КИУМ в северных регионах увеличить удастся, но при перемещении в южном направлении выигрыш в КИУМ от использования тыльной стороны модулей уменьшается, пока полностью не компенсируется проигрышем из-за их неоптимальной ориентации.

6. Расчетные значения КИУМ для ФЭМ разных типов различаются слабо, что подтверждает независимость КИУМ от эффективности ФЭМ.

7. Целесообразность практического применения различных систем слежения ФЭМ за Солнцем должна определяться на основе технико-экономического анализа с учетом дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат на системы слежения, что является предметом отдельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Постановление** Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 (ред. от 10.03.2020) “О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности” (вместе с “Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии”). http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146916
2. **Маликова О.И., Златникова М.А.** Государственная политика в области развития возобновляемой энергетики // Государственное управление. Электронный вестник. 2019. № 72. С. 5–30.
3. **Electric Power Monthly. Capacity Factors for Utility Scale Generators Primarily Using Non-Fossil Fuels.** https://www.eia.gov/electricity/monthly/epm_table_grapher.php?t=epmt_6_07_b
4. **Анализ** показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2018 г. М.: АО СО ЕЭС, 2019.
5. **Анализ** показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2019 г. М.: АО СО ЕЭС, 2020.
6. **Анализ** показателей балансов электрической энергии и мощности ЕЭС России за IV квартал 2020 г. М.: АО СО ЕЭС, 2021.

7. **Renewable Power Generation Costs in 2019.** International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi, 2020.
8. **IEC 61215-2:2016.** Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval. Part 2: Test procedures. Geneva: IEC, 2016.
9. **ГОСТ Р 56980-2016.** Модули фотоэлектрические из кристаллического кремния наземные. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2016.
10. **Capacity factors of solar photovoltaic energy facilities in California, annual mean and variability /** A. Boretto, S. Castelletto, W. Al-Kouz, J. Nayfeh // *E3S Web Conf.* 2020. V. 181. Is. 1. Art. 02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018102004>
11. **Hafez A.Z., Yousef A.M., Harag N.M.** Solar tracking systems: Technologies and trackers drive types – A review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2018. V. 91. P. 754–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.09>
12. **Bifacial solar photovoltaics – A technology review /** R. Guerrero-Lemus, R. Vega, T. Kim, A. Kimm, L.E. Shephard // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. V. 60. P. 1533–1549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.041>
13. **Performance of bifacial PV arrays with fixed tilt and horizontal single-axis tracking: Comparison of simulated and measured data /** D. Berrian, J. Libal, M. Klenk, H. Nussbaumer, R. Kopecek // *IEEE J. Photovoltaics.* 2019. V. 9. Is. 6. P. 1583–1589. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2924394>
14. **Monofacial vs bifacial Si-based PV modules: Which one is more costeffective? /** C.D. Rodríguez-Gallegos, M. Bieri, O. Gandhi, J.P. Singh, T. Reindl, S.K. Panda // *Sol. Energy.* 2018. V. 176. P. 412–438. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.012>
15. **Global techno-economic performance of bifacial and tracking photovoltaic systems /** C.D. Rodríguez-Gallegos, L. Haohui, O. Gandhi, J.P. Singh, V. Krishnamurthy, A. Kumar, J.S. Stein, Wang Shitao, L. Li, T. Reindl, I.M. Peters // *Joule.* 2020. V. 4. Is. 7. P. 1514–1541. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.005>
16. **IEC 62817:2014.** International Standard. Photovoltaic systems – Design qualification of solar trackers. Geneva: IEC, 2014.
17. **ГОСТ Р 57229-2016.** Системы фотоэлектрические. Устройства слежения за Солнцем. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016.
18. **Maia C.B., Ferreira A.G., Hanriot S.M.** Evaluation of a tracking flat-plate solar collector in Brazil // *Appl. Therm. Eng.* 2014. V. 73. Is. 1. P. 953–962. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.052>
19. **Обухов С.Г., Плотников И.А.** Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за Солнцем // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2018. Т. 329. № 10. С. 95–106.
20. **Стребков Д.С., Пенджиев Д.С.** Солнечная электростанция с параболоцилиндрическими концентраторами в пустынной зоне Каракум // *Гелиотехника.* 2019. № 2. С. 157–173.
21. **Системы слежения за Солнцем /** М.В. Китаева, А.В. Юрченко, А.В. Скороходов, А.В. Охорзина // *Вестник науки Сибири.* 2012. № 3 (4). С. 61–67.
22. **Jacobson M.Z., Jadhav V.** World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels // *Sol. Energy.* 2018. V. 169. P. 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.030>
23. **Guo S., Walsh T.M., Peters M.** Vertically mounted bifacial photovoltaic modules: a global analysis // *Energy.* 2013. V. 61. P. 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.04>
24. **Optimization and performance of bifacial solar modules: a global perspective /** X. Sun, M.R. Khan, C. Deline, M.A. Alam // *Appl. Energy.* 2017. V. 212. P. 1601–1610. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.041>
25. **Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization /** M.R. Khan, A. Hanna, X. Sun, M.A. Alam // *Appl. Energy.* 2017. V. 206. P. 240–248. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.042>
26. **Эффективность применения систем слежения за Солнцем и двусторонних фотоэлектрических модулей в южных районах Российской Федерации и Республике Узбекистан /** С.Е. Фрид, В.М. Симонов, Н.В. Лисицкая, Н.Р. Авезова, А.Э. Хаитмухамедов // *Гелиотехника.* 2020. № 3. С. 217–227.
27. **Даффи Дж., Бекман У.** Основы солнечной теплоэнергетики / пер. с англ. Долгопрудный: Издательский дом “Интеллект”, 2013.
28. **TRNSYS – Transient System Simulation Tool.** <http://trnsys.com/>
29. **Раушенбах Г.** Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983.
30. **De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A.** Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance // *Sol. Energy.* 2006. V. 80. Is. 1. P. 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>
31. **Cotfas D.T., Cotfas P.A., Kaplanis S.** Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2013. V. 28. P. 588–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.017>
32. **Modeling of PV system and parameter extraction based on experimental data: Review and investigation /** A.M. Humada, S.Y. Darweesh, K.G. Mohammed, M. Kamil, S.F. Mohammed, N.K. Kasim, T.A. Tahseen, O.I. Awad, S. Mekhile // *Sol. Energy.* 2020. V. 199. P. 742–760. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.068>
33. **TRNSYS 17.** V. 4. Mathematical Reference. <http://web.mit.edu/parmstr/Public/TRNSYS/04-MathematicalReference.pdf>
34. **Suntech** Hupro STP300-310S – 20/Wfw. <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/39647>
35. **Suntech** Polycrystalline STP270-280 – 20/Wfw. <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/39646>
36. **Спецификация на фотоэлектрические модули 300–320 Вт.** <https://www.hevelsolar.com/loaded/catalog/goods/13b1c2c2-b900-11e9-80f4-005056826d7b> Спецификация на фотоэлектрические модули 300–320Вт.pdf
37. **Suntech** ranked in the “Global Top 20 Companies on PV 2020”. <https://www.suntech-power.com/suntech-ranked-in-the-global-top-20-companies-on-pv-2020/>

38. NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). <https://power.larc.nasa.gov/>
39. Сравнительный анализ расчетных моделей сетевых фотоэлектрических станций / А.Б. Тарасенко, С.В. Киселева, О.С. Попель, С.Е. Фрид, Т.С. Габдрахманова, Н.Р. Аvezова, В.М. Симонов, М.Ж. Сулейманов // Гелиотехника. 2020. № 1. С. 71–90.
40. Full KSTAR PV inverter catalogue. <https://bslenco.com/wp-content/uploads/2018/04/PV-Inverter-Catalogue-2018.pdf>
41. Suntech HyPro STP 300-310S-20/Wfw-MX. <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/43262>
42. Хевел поставила швейцарскому подразделению Coca-Cola двусторонние солнечные модули. <https://www.hevelsolar.com/about/news/khevel-postavila-shveicarskomu-podrazdeleniyu-coca-cola-dvustoronnie-solnechnye-moduli/>
43. A practical irradiance model for bifacial PV modules: Preprint. NREL/CP-5J00-67847 / B. Marion, S. Mac Alpine, C. Deline, A. Asgharzadeh, F. Toor, D. Riley, J. Stein, C. Hansen. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2017. Golden. CO.
44. Hevel Solar Heterojunction PV module HVL-385/ HJT, HVL-390/HJT, HVL-395/HJT. [https://www.hevelsolar.com/loaded/catalog/goods/c446d3aa-758e-11ea-8103-005056826d7b_Datasheet_385-395_GG%20\(EN\).pdf](https://www.hevelsolar.com/loaded/catalog/goods/c446d3aa-758e-11ea-8103-005056826d7b_Datasheet_385-395_GG%20(EN).pdf)

Evaluating the Possibility of Increasing the Capacity Utilization Factor of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants

S. E. Frid^{a, *} and N. V. Lisitsksaya^a

^a Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*e-mail: s_frid@oivtran.ru

Abstract—The influence of two methods for increasing the amount of solar radiation incident on the solar power plant (SPP) photovoltaic array surface—the use of Sun tracking systems (trackers) and bifacial photovoltaic modules—on the capacity utilization factor (CUF) value is estimated for the entire territory of Russia. The CUF values are estimated for a few types of photovoltaic modules under the climatic conditions of Russia by means of dynamic simulation in the TRNSYS software system. The actinometric and climatic data from the NASA POWER long-term satellite observations database with the $1^\circ \times 1^\circ$ latitude-longitude spatial resolution were used. The photovoltaic modules were described by a five-parametric model, the parameters of which were determined from the module nameplate data provided by the manufacturers. The electricity outputs and CUF values were compared for SPPs equipped with vertical axis and tilted-axis trackers and SPPs equipped with fixed south-oriented photovoltaic modules with different tilt angles. It has been determined that the maximal effect from the use of trackers can be achieved in the transpolar zone of Russia, where the amount of electricity generated by an SPP can be increased by 70–80%. In certain southern regions of the country, the amount of electricity generated in the case of using trackers can be increased by as much as 55%. It is shown that the best effect is obtained in the case of using fixed bifacial modules equipped with tilt-axis trackers (the increase of CUF is up to 4% abs.). By using vertically oriented bifacial modules, the CUF value can be increased to some extent in high latitudes. In moving toward lower latitudes, the gain in the CUF from using the module rear side decreases until it becomes fully compensated by the loss resulting from their non-optimal orientation.

Keywords: photovoltaic solar power plant, capacity utilization factor, Sun tracking system, tracker, bifacial photovoltaic module