

УДК621.311.25

## Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба

Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ<sup>1</sup>, Д.Д.ГЕРРА<sup>1</sup>, Э.В.ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>✉, А.РАССЫЛКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Таллинский технический университет, Таллин, Эстония

**Как цитировать эту статью:** Влияние солнечной энергетики на развитие горнодобывающей отрасли в Республике Куба / Я.Э.Шклярский, Д.Д.Герра, Э.В.Яковлева, А.Рассылкин // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 427-440. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.12

**Аннотация.** Куба традиционно считается страной со слабо развитой промышленностью. Удельный вес горной и металлургической промышленности в валовом объеме промышленного производства республики невелик – порядка 3 % ВВП. Разработка месторождений и добыча никелевых руд являются значимой отраслью экономики Республики Куба, так как наибольшие запасы никеля и кобальта на Североамериканском континенте находятся на территории страны. Фактором роста данного сектора экономики может послужить развитие энергосистемы страны. Ввиду климатических особенностей и невозможности интегрирования в энергосистему новых мощностей путем строительства гидроэлектростанций перспективным направлением является солнечная энергетика. Определение возможности применения систем слежения за солнцем для повышения выработки электроэнергии солнечными электростанциями является одной из основных задач, с которой сталкиваются инженеры и специалисты по возобновляемым источникам энергии. В настоящее время на Кубе не существует систем слежения за солнцем, способных предоставить информацию для оценки эффективности этой технологии на территории страны. Отсутствие необходимых технологий, а также высокая стоимость разработки солнечных электростанций с системами слежения ограничивают повсеместное внедрение подобных комплексов. Отсюда вытекает задача создания недорогой экспериментальной модели, позволяющей проводить оценку эффективности применения систем трекинга в конкретных погодных условиях Республики Куба. Данная модель позволит в будущем повысить эффективность электротехнических комплексов с солнечными электростанциями, обеспечивающих электроснабжение объектов минерально-сырьевого комплекса и других регионов.

**Ключевые слова:** экспериментальная модель; горнодобывающая отрасль; Республика Куба; система слежения за солнцем; эффективность; электротехнический комплекс; возобновляемые источники энергии; солнечная энергия

**Введение.** В последние десятилетия область возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приобрела особое значение для устойчивого развития энергетики во всем мире. Доля электрической энергии, вырабатываемой с помощью ВИЭ, в общей выработке электрической энергии увеличивается ежегодно [30]. Лидерами в производстве фотоэлектрической энергии являются Германия, Испания, Япония, Италия. Согласно данным REE, в Испании фотоэлектрическая энергия достигла максимальной суточной выработки на 21 июня 2020 г. за счет интеграции 68 ГВтч в энергосистему страны. После данной интеграции уже в июле того же года на фотоэлектрических станциях было сгенерировано 1894 ГВтч, что является максимальным значением энергии, генерируемой источником [16]. Динамика применения возобновляемых ресурсов в системах энергоснабжения Республики Куба аналогична. Это объясняется многими факторами: отсутствием традиционных источников энергии (нефти, газа), благоприятными климатическими условиями, мировыми тенденциями. На территории России сегодня также применяются ВИЭ, повышающие энергоэффективность систем электроснабжения [1, 2, 4, 7]. В работах [8, 9] широко освещены проблемы интеграции ВИЭ [34, 36] в системы электроснабжения России, проблемы поддержания качества электрической энергии, вырабатываемой ВИЭ, а также экологические аспекты применения данного вида энергоресурса [21, 29]. Однако абсолютный переход от традиционных источников энергии к ВИЭ, согласно мнению ведущих мировых ученых, невозможен как по причине их более низкой эффективности, так и из-за стоимости данного вида энергоресурса [3, 11].

Развитие добычи никеля и металлургии на Кубе можно разделить на 4 этапа: 1942-1962, 1962-1986, 1986-1994 и 1994 г. – настоящее время. Для каждого этапа характерно увеличение площади, затронутой этими видами деятельности. Добыча минералов на всех месторождениях осуществляется открытым способом. По данным Министерства базовой промышленности, Куба является одним

из крупнейших в мире производителей никеля, основного экспортного товара, с производительностью около 75 тыс. т в год, а также покрывает 10 % мирового спроса на кобальт. Никель незаменим при производстве нержавеющей стали и других сплавов. Кобальт, в свою очередь, необходим для производства сплавов, используемых в таких изделиях как авиационные двигатели. Никель стал в 2000 г. крупнейшим источником экспортной выручки страны, составив около 2 млрд дол. Основными рынками сбыта являются Канада, Европа и Китай.

В начале 2008 г., до падения цен на никель, Куба заявила, что этот минерал вытеснил туризм в качестве основного источника валютных поступлений. По данным Национального центра минеральных ресурсов, в провинции Ольгин сосредоточено 34 % мировых запасов никеля с приблизительно 800 млн т доказанных запасов никеля и кобальта и 2 200 млн т вероятных запасов.

В настоящее время горнодобывающая промышленность оказывает негативное воздействие на окружающую среду в регионах. Среди наиболее значительных последствий следует отметить вырубку более 5000 га лесных угодий, загрязнение внутренних и морских водоемов. Наиболее распространенными загрязняющими веществами являются сульфаты и тяжелые металлы (Ni, Cr, Mn и др.). Поскольку на территории Республики Куба нет больших запасов углеводородов (нефти, угля, природного газа) и мощных рек, возобновляемые источники энергии являются стратегически важным решением проблемы повышения объемов выработки электрической энергии и снижения негативного воздействия на окружающую среду в регионах добычи.

Расширение предприятий по переработке полезных ископаемых требует широкого использования солнечной энергии как эффективной и экономичной альтернативы традиционным формам производства электрической энергии в труднодоступных регионах, где отсутствуют сети централизованного энергоснабжения, в регионах со слабо развитыми энергосетями. Однако, проблема максимизации улавливаемой фотоэлектрическими модулями солнечной энергии до конца не решена [10].

Наиболее известными являются два способа максимизации электроэнергии, получаемой от фотоэлектрической установки: улучшение структуры фотоэлектрической панели, направленное на повышение ее производительности; увеличение количества улавливаемого панелью солнечного излучения. Для достижения наилучшего результата при применении второго способа площадь фотоэлектрической панели должна оставаться перпендикулярной излучению источника света. Для этого в фотоэлектрических системах используются солнечные трекеры [17, 18, 23]. Повышению производительности за счет улучшения структуры фотоэлектрических панелей посвящены научные труды многих ученых [20, 27, 35] и в данной работе не рассматриваются.

В настоящее время существует несколько типов систем слежения, оптимизирующих солнечную энергию. Основными их производителями являются такие компании как Nextracker, Array Technologies, PV Hardware, Arctech Solar, Soltec, Nclave, Convert Italia, STI Norland, GameChange Solar, SunPower. Компания Nextracker лидирует в рейтинге производителей фотоэлектрических трекеров на мировом рынке (на период до 2019 г.). Поставки данной компании на сегодняшний день составляют 29 % от общего объема. Вторым крупным производителем в 2019-2021 гг. является компания Array Technologies, далее идет PV Hardware (PVH) и Arctech Solar, концерн Soltec занимает пятое место в данном рейтинге. До недавнего времени Америка являлась крупнейшим региональным рынком и представляла более половины мирового спроса на фотогальванические устройства. Тем не менее, на Ближнем Востоке и в Северной Африке также наблюдались высокие темпы роста.

Развитие технологий в сопутствующих областях в последние годы способствовало развитию технологий, используемых в солнечной энергетике. Сегодня с помощью различных программных продуктов, позволяющих посредством компьютерного моделирования изучать процессы, протекающие в электротехнических комплексах, различных двигателях и приводах, в том числе с помощью построения цифровых двойников, повышение эффективности конкретных установок и объектов вышло на новый уровень [19, 26, 34]. Особую роль в этом сыграло развитие электронных компонент, облегчающих изучение процессов. Одним из них является Arduino – платформа, на которой могут быть разработаны различные исследовательские проекты.

Arduino – это аппаратная и программная платформа с открытым исходным кодом, основанная на плате с аналоговыми и цифровыми входами и выходами, на языке программирования



Processing, т.е. платформа с открытым исходным кодом для электронных прототипов. Она пригодна для разработки любого типа проектов и не требует лицензирования. Первая коммерческая плата Arduino на базе 8-разрядных процессоров Atmel AVR вышла на рынок в 2005 г., обладая низкой стоимостью, достаточным функционалом и низким порогом вхождения. В настоящее время доступны модели плат с 32-разрядными микроконтроллерами ARM Cortex M3.

В настоящее время существуют другие платформы, аналогичные Arduino, – Raspberry Pi, DSP и FPGA – обладающие преимуществами программного и аппаратного обеспечения, надежные для проведения научных исследований с высокими точностью и качеством. Для данного исследования была выбрана Arduino, поскольку является бесплатной платформой.

Исследуемым объектом была выбрана солнечная электростанция прямого преобразования мощностью 2,5 МВт, располагающаяся на территории Республики Куба в провинции Сантьяго-де-Куба. Выбор обусловлен поиском решения задачи повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую оптимальным способом, учитывающим климатические характеристики региона. Как известно, климатические характеристики данного региона являются благоприятными для применения солнечной энергетики, однако для существующих систем характерен низкий КПД, поэтому задача исследования является актуальной.

**Материалы и методы исследования.** *Системы слежения за Солнцем.* Существует несколько методов получения электрической энергии из солнечного излучения – прямое преобразование с помощью фотоэлектрических модулей, концентрация фотоэлектрической солнечной энергии и солнечной тепловой энергии [15]. В данной работе рассматриваются солнечные электростанции прямого преобразования.

В настоящее время существуют различные технологии разработки солнечных систем слежения, а также различные модели, гарантирующие повышение эффективности улавливания солнечных лучей, что приводит к увеличению выработки электрической энергии.

Солнечный трекер — это механическое устройство, способное ориентировать солнечные панели таким образом, чтобы они оставались перпендикулярными солнечным лучам, следуя за солнцем с востока (рассвет) на запад (закат). Солнечные трекеры используются во всех электротехнических комплексах, в которых применяется система слежения за солнцем. Для всех способов применение системы слежения за солнцем повышает выработку электрической энергии комплексом.

Существуют различные исследования в области повышения эффективности генерирования электрической энергии фотоэлектрическими панелями с использованием одноосных и двухосных систем слежения за Солнцем. Хосе Гутьеррес предлагает в своей работе [22] прототип системы невысокой стоимости. Алгоритм слежения основан на расчете положения Солнца посредством расчета солнечного времени. В основе работы Габриэля Вилледа и др. [37] трекер позиционируют в направлении наибольшей солнечной активности, определяемой с помощью уравнений, которые вычисляют положение солнца. Другие исследования основаны на получении обратной связи с датчиков освещенности, которые отслеживают наиболее освещенную точку, и таким образом определяют управляющее воздействие системы отслеживания Солнца [6, 12, 14]. Также в работе [13, 31] учитываются старение и затенение фотоэлектрических панелей, которые влияют на эффективность преобразования солнечной энергии.

В настоящее время существуют следующие системы слежения:

- поверхность панели вращается по вертикальной оси и ориентирована в направлении север-юг; вращение регулируется так, чтобы нормаль поверхности всегда совпадала с меридианом Земли;
- поверхность панели вращается вокруг оси, обращенной на юг, и наклонена под углом, равным широте; вращение регулируется так, чтобы нормаль поверхности всегда совпадала с меридианом Земли, скорость вращения равна 15 град./ч, аналогично часам;
- поверхность панели вращается по горизонтальной оси и ориентирована в направлении север-юг; вращение регулируется так, чтобы нормаль поверхности всегда совпадала с меридианом Земли (наклонно-подъемный механизм «tip tilt»);
- поверхность всегда перпендикулярна солнцу.

В настоящее время на международном рынке существуют модели солнечных трекеров различных производителей, в свободном доступе находится информация о стоимости трекеров. В табл.1 приведены некоторые примеры текущих затрат на закупку существующих систем. Данные, представленные в табл.1, соответствуют данным на июнь 2020 г.

Таблица 1

Стоимость солнечных трекеров на международном рынке

| Типы                                                               | Стоимость, дол./ Вт | Эффективность*, % |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| Слежение по вертикальной оси и (1)                                 | 0,08-0,14           | 10-25             |
| Слежение по горизонтальной оси (2)                                 | 0,08-0,14           | 10-25             |
| Слежение с наклонно-подъемным механизмом по горизонтальной оси (3) | 0,19-0,25           | 10-20             |
| Двуосная система слежения (4)                                      | 0,40-0,50**         | 30-45             |

Примечание. \* Эффективность солнечных систем слежения по сравнению со стационарными системами. \*\* Двуосные солнечные системы слежения со спутниковой навигационной системой GPS.

Двуосная солнечная система слежения за 1000 Вт может стоить около 250 дол. Минимальные заказы на эти системы производятся от 5000 Вт.

Очевидно, что солнечные трекеры, обеспечивающие наибольшую производительность, имеют две оси. Среди различных двуосевых устройств имеются различия в увеличении производительности от 30 до 45 % по сравнению со стационарными установками. Кроме того, следует отметить различия в стоимости самого оборудования и фундаментов для комплексов. Одноосные солнечные трекеры увеличивают производительность солнечных панелей на 10-20 % в сравнении со стационарными конструкциями. Двуосные системы могут увеличивать производительность на 25 % [11].

*Структура и характеристики экспериментальной модели, разработанной для исследования систем слежения за Солнцем, входящих в электротехнический комплекс.* Проект разработан на базе платформы Arduino Mega 2650, которая имеет 16 аналоговых входов с разрешением 10 бит каждый, и 54 цифровых входа.

Arduino – это микроконтроллер, выполняющий последовательность команд (запрограммированных автором), скомпилированную в интегрированной среде разработки (Integrated Development Environment, IDE). Для реализации проекта была использована Arduino IDE.

В рамках решения поставленной задачи была разработана экспериментальная модель, в которой применяется система управления по высоте-азимуту (рис.1). Выбор данного типа управления обусловлен тем, что такой тип слежения за Солнцем обеспечивает наибольшую эффективность поглощения солнечных лучей.

Кроме компонент, представленных на рис.1, б, в экспериментальный стенд входят адаптер памяти, модуль связи Wi-Fi, микропроцессор, реле подключения, внешний источник питания, встроенные часы.

Повышение эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую достигается за счет реализации в установке одновременно двух систем управления – астрономической и оптической. С помощью датчиков (фоторезисторов) осуществляется позиционирование модуля на максимально яркий объект, положение которого по высоте-азимуту корректируется по рассчитанным уравнениям положения Солнца, которые изначально записаны в программе. Вращающийся механизм реализован на базе пяти вольтовых сервоприводов. Питание двигателей и схемы управления осуществляется от солнечной батареи. Установка позволяет оценить в конкретных климатических условиях региона работу и эффективность систем слежения за Солнцем в сравнении со стационарными системами. Структура экспериментальной установки со всеми компонентами представлена на рис.2.

Для того, чтобы выяснить, какие датчики параметров окружающей среды следует использовать в экспериментальной модели, было проведено корреляционное исследование, которое позволило



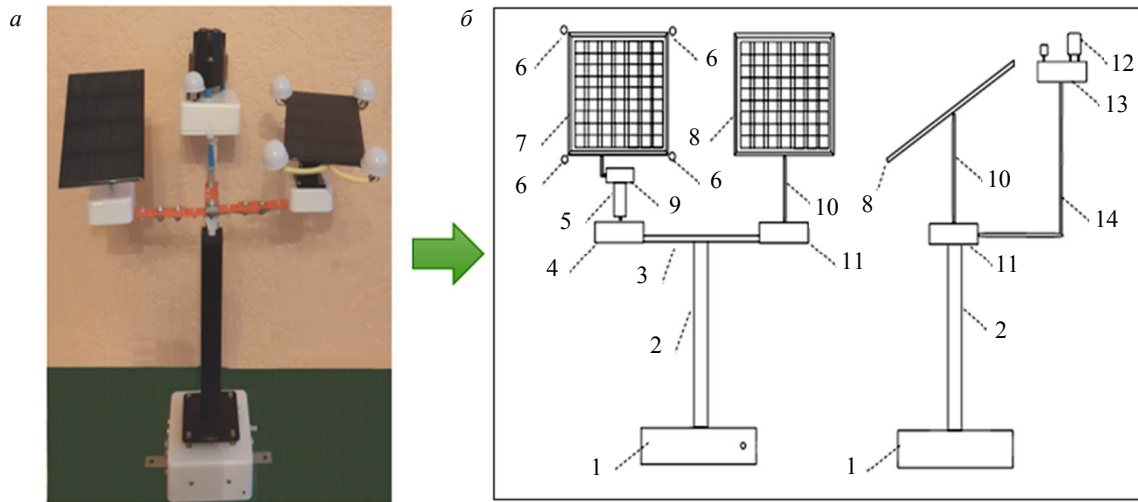


Рис. 1. Внешний вид установки (а) и общий вид устройства (б) экспериментального стенда

1 – коробка подключений; 2 – Т-образная опора; 3 – датчик температуры окружающей среды, атмосферного давления и относительной влажности; 4 – система слежения за Солнцем; 5 – серводвигатели для вертикального поворота; 6 – датчики солнечного света и наклона; 7 – солнечная панель малой мощности; 8 – метеорологическая станция; 9 – серводвигатели для горизонтального поворота; 10 – высокоточные цифровые датчики света; 11 – стационарная система; 12 – датчик солнечного излучения; 13 – датчик напряжения и тока; 14 – датчик рабочей температуры

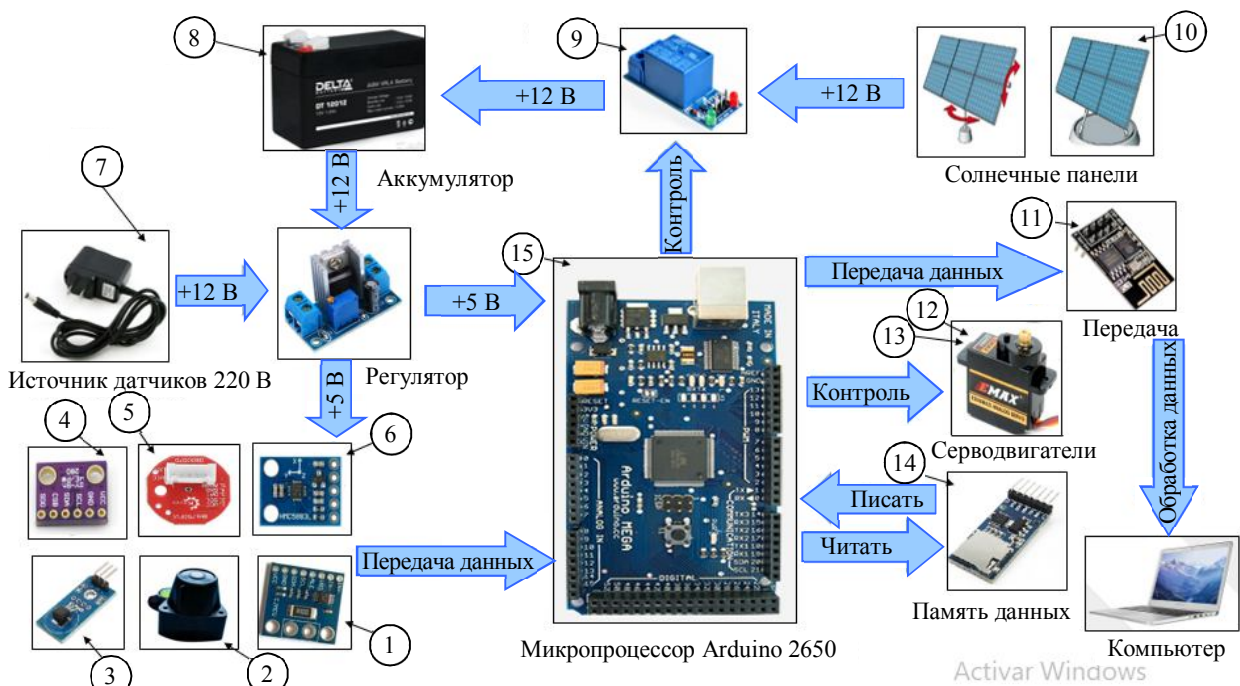


Рис.2. Структура экспериментальной установки

1 – датчик напряжения и тока; 2 – датчик солнечного излучения; 3 – датчик рабочей температуры; 4 – датчик температуры окружающей среды, атмосферного давления и относительной влажности; 5 – датчик солнечного света; 6 – цифровой компас; 7 – внешний источник питания; 8 – аккумулятор; 9 – реле подключения; 10 – солнечная панель малой мощности; 11 – модуль связи Wi-Fi; 12 – серводвигатели для вертикального поворота; 13 – серводвигатели для горизонтального поворота; 14 – карта памяти; 15 – микропроцессор

обнаружить связь между различными переменными – электроэнергией  $E_{df}$ , солнечным излучением  $I$ , скоростью ветра  $V$ , атмосферным давлением  $P$ , влажностью  $RH$  и температурой окружающей среды  $t$ . Затем для каждой из выбранных переменных был рассчитан коэффициент Пирсона  $R$  с помощью статистической программы Mintab 18.0. На основании расчета было определено, является ли корреляция между изучаемыми переменными значимой. Основным критерием было значение коэффициента Пирсона  $R < 0,05$ . Результаты анализа представлены в табл.2.



Таблица 2

Результаты корреляционного анализа

| Параметр |     | $E_{df}$   | $t$        | $V$        | $P$        | $RH$       |
|----------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|
| $t$      | $K$ | 0,756 (4)  | –          | –          | –          | –          |
|          | $R$ | 0 (1)      | –          | –          | –          | –          |
| $V$      | $K$ | 0,548 (4)  | 0,162 (3)  | –          | –          | –          |
|          | $R$ | 0 (1)      | 0 (1)      | –          | –          | –          |
| $P$      | $K$ | -0,131 (3) | 0,004 (3)  | -0,199 (3) | –          | –          |
|          | $R$ | 0 (1)      | 0,851 (2)  | 0 (1)      | –          | –          |
| $RH$     | $K$ | -0,703 (1) | -0,390 (4) | -0,405 (4) | -0,017 (3) | –          |
|          | $R$ | 0 (1)      | 0 (1)      | 0 (1)      | 0,427 (2)  | –          |
| $I$      | $K$ | 0,711 (4)  | 0,308 (4)  | 0,411 (4)  | 0,129 (3)  | -0,718 (4) |
|          | $R$ | 0 (1)      | 0 (1)      | 0 (1)      | 0 (1)      | 0 (1)      |

Примечание. 1 – корреляция значима  $R < 0,05$ ; 2 – корреляция не значима  $R > 0,05$ ; 3 – малая корреляция; 4 – высокая корреляция.

Результаты показывают, что атмосферное давление имеет небольшую корреляцию с другими метеорологическими переменными. Самая большая корреляция переменных наблюдается между относительной влажностью и солнечной радиацией (обратная корреляция), температурой окружающей среды и относительной влажностью (обратная корреляция), температурой окружающей среды и солнечным излучением (прямая корреляция) (рис.3). Анализ, представленный в табл.2, помогает определить, какие основные метеорологические переменные следует принимать во внимание при оценке энергетических характеристик фотоэлектрических комплексов с системой слежения за Солнцем или без нее в конкретных климатических условиях.

Данные коэффициенты получены для климатических и географических условий Республики Куба, применение данной методики планируется также для расчета корреляции на объектах минерально-сырьевой промышленности в других регионах.



Рис.3. Метеорологические переменные: температура окружающей среды (а), скорость ветра (б), относительная влажность (в), солнечное излучение (г) 23.10.2018 г. в провинции Сантьяго-де-Куба Республики Куба, соответствующие 20.02° с.ш. и 75.82° з.д.

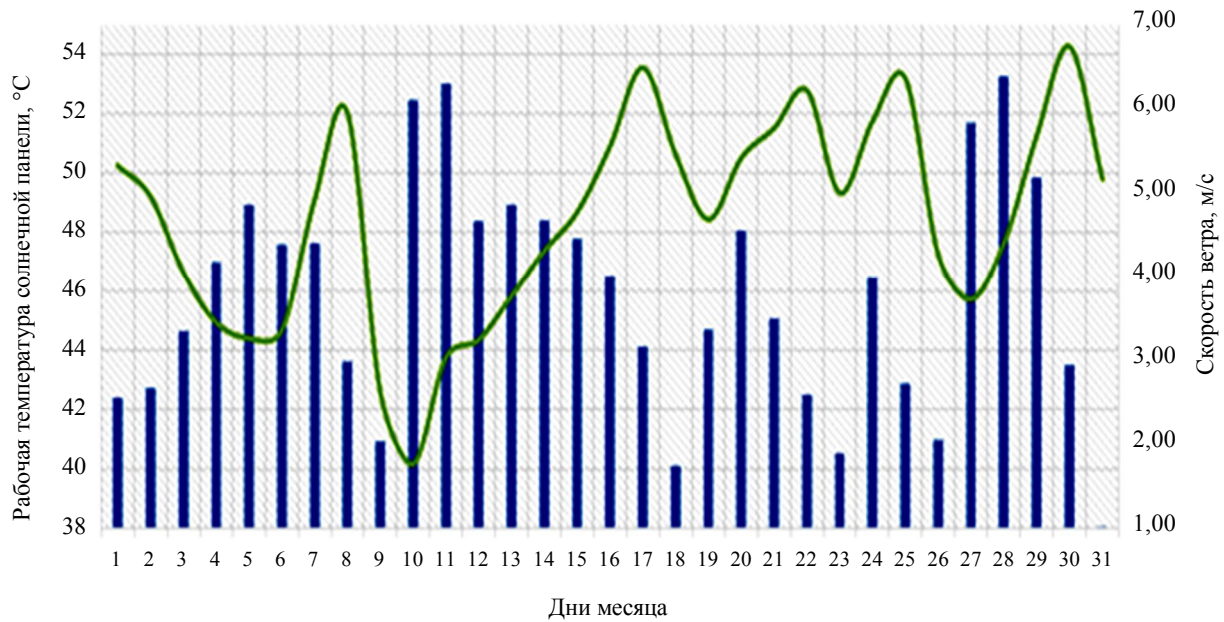


Рис.4. Зависимость рабочей температуры солнечной панели от скорости ветра

В ходе исследования также было выявлено, что энергия, производимая фотоэлектрической системой, имеет прямую корреляцию со временем (0,15), температурой окружающей среды (0,76) (рис.3, а), скоростью ветра (0,55) (рис.3, б), солнечным излучением (0,71) (рис.3, з) и обратную корреляцию с относительной влажностью (–0,70) (рис.3, в). Это означает, что для заданных климатических условий при более высокой радиации относительная влажность низкая, и наоборот. Следует учитывать, что ранее измеренные климатические переменные напрямую влияют на тепловые характеристики солнечной панели, т.е. на рабочую температуру.

На рис.4 показана зависимость рабочей температуры солнечной панели (CNC85X115-18) от скорости ветра в исследуемом регионе.

Результаты экспериментальных исследований в реальных эксплуатационных и погодных условиях говорят о том, что при работе солнечного модуля со средней рабочей температурой 50 °C его мощность снижается на 10 %, поэтому энергия также уменьшается на 10 %, что является недопустимым. Была выявлена следующая закономерность – если скорость ветра превышает 3 м/с, рабочая температура модуля значительно снижается (при скорости ветра 3-7 м/с температура снижается на 3-5 °C). Это является положительным моментом, поскольку чем дальше панель работает при стандартной рабочей температуре (25 °C), тем выше ее производительность.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для высоких скоростей ветра в регионе солнечный модуль будет иметь более эффективные электрические характеристики, так как его охлаждение будет осуществляться быстрее, что снизит рабочую температуру солнечной панели.

Кроме этого, было проведено корреляционное исследование, на основании которого были выбраны датчики метеорологических параметров. Разработанная экспериментальная модель имеет 13 датчиков, которые измеряют различные параметры окружающей среды. В модели применяются пять датчиков освещенности (BH1750FVI), два датчика рабочей температуры (DS18D20), один датчик температуры окружающей среды и относительной влажности (BME280), один датчик солнечного излучения (PYR20), один датчик наклона для солнечных батарей, два датчика постоянного тока (INA226) и два датчика напряжения (INA226), которые измеряют вольтамперную характеристику солнечных модулей. В табл.3 приведены технические характеристики каждого датчика установки.

Для вертикального и горизонтального позиционирования солнечного модуля в модели установлены серводвигатели MG995. Как горизонтальное, так и вертикальное перемещения определяются путем математического расчета положения Солнца как функции времени. Для этого определяется азимут, который описывает горизонтальное движение положения Солнца на его траектории запад-восток

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \alpha \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \varphi} \right), \quad (1)$$

где  $\delta$  – угол солнечного склонения;  $\varphi$  – угол солнечного времени;  $\alpha$  – угол солнечной высоты.

Таблица 3

Технические характеристики датчиков

| Тип датчика                                                                                | Количество | Технические характеристики    | Тип сигнала |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------|-------------|
| Датчик температуры окружающей среды, атмосферного давления и относительной влажности DHT11 | 1          | +/- 1 °C; +/- 3 %; +/- 1 ГПа  | Цифровой    |
| Высокоточный цифровой датчик света BH1750FVI                                               | 4          | От -1 до -65535 люкс (16 бит) | Цифровой    |
| Датчик света BH1750                                                                        | 1          | 1-65535 люкс                  | Цифровой    |
| Датчик рабочей температуры DS18D20                                                         | 2          | От -55 до 125 °C (12 бит)     | Цифровой    |
| Датчик напряжения и тока INA226                                                            | 2          | 0-30 В; 0-3 А                 | Цифровой    |
| Датчик солнечного излучения PYR20                                                          | 1          | 0-2000 Вт/м <sup>2</sup>      | Аналоговый  |

Также определяется солнечная высота, которая описывает вертикальное движение,

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos \theta_z), \quad (2)$$

где  $\theta_z$  – зенитный угол.

В соответствие с произведенным расчетом солнечный модуль размещается перпендикулярно солнечным лучам [24].

Для расчета эффективности системы, оснащенной солнечным трекером (прироста энергии), по сравнению со стационарными системами необходимо воспользоваться следующим уравнением:

$$G_{an} = \frac{E_{dm} - E_{df}}{E_{df}} 100, \quad (3)$$

где  $E_{dm}$  – электроэнергия, генерируемая электростанцией с системой слежения;  $E_{df}$  – электроэнергия, генерируемая стационарной электростанцией.

Уравнение (3) количественно определяет прирост мощности (в процентах) с использованием системы слежения за Солнцем по отношению к энергии стационарной системы, согласно международной литературе это значение составляет 30-40 % [10, 32]. Значение  $G_{an}$  зависит исключительно от географических характеристик места исследования, также оно варьируется в зависимости от времени года.

Энергия, генерируемая солнечными панелями, хранится в аккумуляторе на 1,2 А·ч, который поддерживает электропитание экспериментальной модели.

Информация, собранная экспериментальной моделью, отображается на дисплее системы управления или может быть загружена в формате .txt для последующей обработки с помощью программного обеспечения, разработанного в GUIDE / MATLAB.

В качестве платформы использовалась среда IDE версии 1.8.5 Arduino, в ней осуществляется программирование инструкций и кодов, которые впоследствии будут загружены в микропроцессор.

Алгоритм, управляющий экспериментальной моделью солнечного трекера, состоит из двух основных блоков: первый отвечает за измерения и сбор данных, предоставляемых различными датчиками, второй является алгоритмом определения положения Солнца (рис.5).

В первую очередь микроконтроллер считывает показания со всех датчиков системы. Как только подтверждается, что ошибки измерения и/или неисправности датчиков отсутствуют, полученная информация сохраняется в памяти и отображается на цифровом дисплее. Затем микропроцессор выполняет команды для отслеживания положения Солнца, используя уравнения (1) и (2). Рассчитанные горизонтальные и вертикальные угловые значения корректируются с помощью датчиков освещенности, которые осуществляют поиск среднего значения максимальной интенсивности



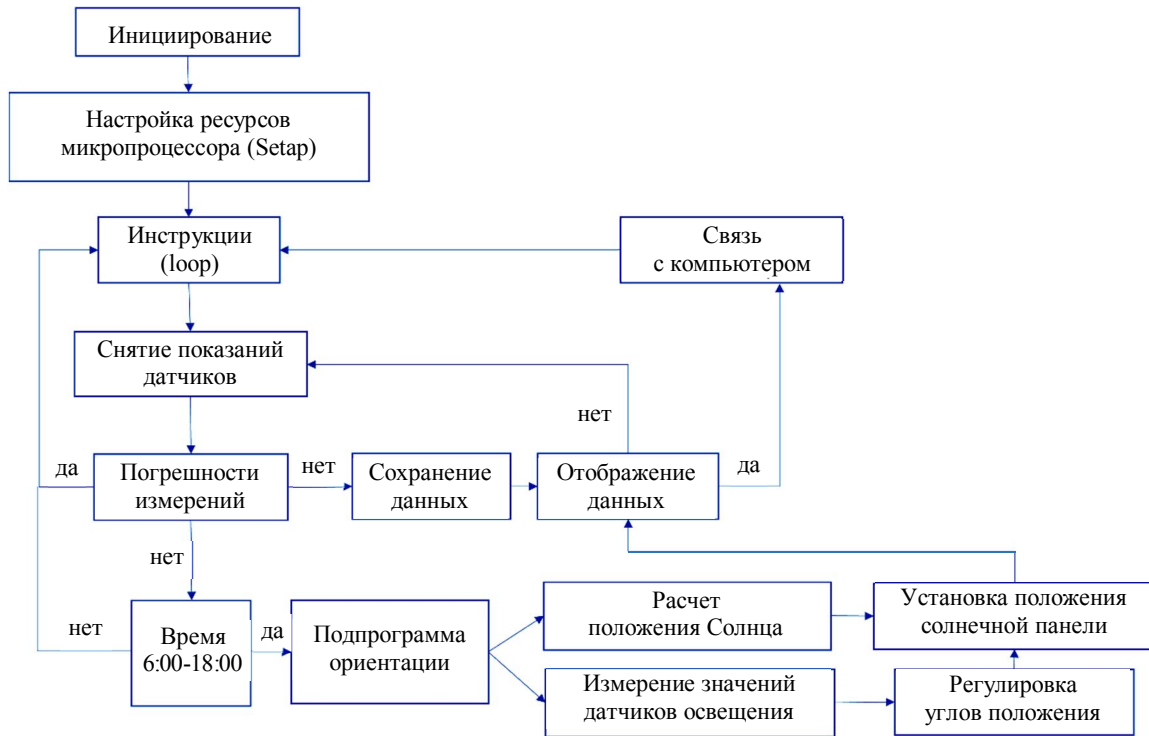


Рис.5. Алгоритм управления экспериментальной моделью солнечного трекера

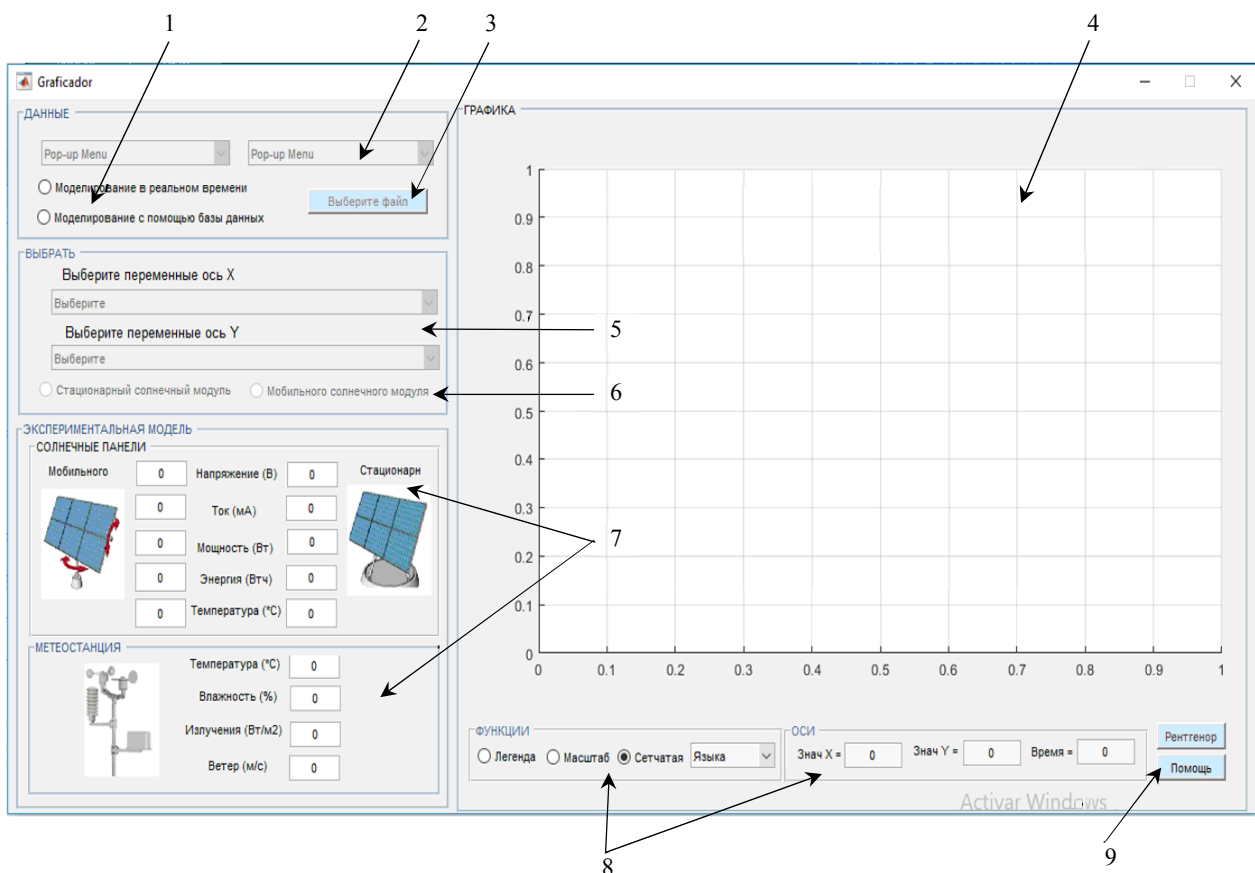


Рис.6. Интерфейс программы обработки данных в среде GUIDE / MATLAB

1 – режим работы программы; 2 – дата и время; 3 – параметры солнечных модулей; 4 – графики; 5 – выбор системной переменной; 6 – тип системы слежения; 7 – полученные результаты; 8 – функциональный блок системы; 9 – график и помощь

света в этом пространстве. Значения горизонтального и вертикального углов регулируются в соответствии с допуском, определенным в этом случае равным 5 %. Этот процент может быть изменен по усмотрению выполняющего измерения с помощью экспериментальной системы. Экспериментальная система работает с двумя комбинированными алгоритмами слежения за Солнцем, такими как астрономическая система слежения и оптическая система. Система оптического слежения подстраивается под систему слежения за Солнцем более эффективно, когда присутствуют пасмурные или дождливые дни, с другой стороны, астрономическая система позиционирует систему слежения за солнцем в соответствии с траекторией Солнца в течение дня.

*Структура и функционирование программного обеспечения, созданного для обработки данных.* С разработкой экспериментальной модели для изучения систем слежения за Солнцем в соответствии с климатическими условиями региона возникла необходимость в создании программного обеспечения, способного обрабатывать данные, полученные из этой модели. Коллективом авторов было разработано программное обеспечение в среде GUIDE/MATLAB, интерактивной платформе, где возможно программировать в визуальной среде и показывать результат. На данный программный продукт в 2020 г. был оформлен патент [5]. Программа выполняет обработку всей информации, собранной в файле данных экспериментальной модели.

Разработанная программа имеет два режима работы (рис.6): может работать в режиме реального времени через USB-соединение с экспериментальной моделью, куда могут быть занесены различные переменные, представляющие интерес как для стационарных систем, так и для солнечных трекеров; может работать с файлом данных, который экспериментальная модель хранит в памяти.

После выбора режима работы программы выполняются расчеты, а также строятся графики зависимостей метеорологических переменных от времени.

Разработанная программа выполняет следующие функции: составляет графики всех переменных, измеренных экспериментальной моделью; рассчитывает погрешности разных датчиков экспериментальной модели; рассчитывает и отображает результаты и графики основных переменных системы слежения за Солнцем и стационарных систем; показывает атмосферные значения, измеренные экспериментальной моделью; рассчитывает вольтамперные характеристики и характеристики электрической энергии каждого солнечного модуля обеих систем и сравнивает их.

С разработкой данного вычислительного инструмента обработка данных, полученных экспериментальной моделью, выполняется быстрее и проще [25].

На рис.7 показаны результаты обработки данных экспериментальной модели с помощью разработанной программы. Анализ проводился с использованием солнечных батарей малой мощности (CNC85X115-18).

Результаты, полученные для энергии, генерируемой стационарной фотоэлектрической системой и системой слежения за Солнцем, соответствуют только одному дню (23.10.2008) из 365 дней в году. Как видно из графиков (уравнение (3)), энергия, поступающая в электрическую систему за

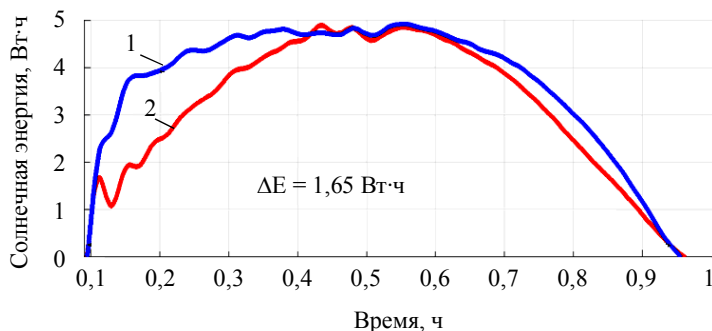


Рис.7. Сравнение энергии, вырабатываемой панелью мощностью 1,5 Вт поступающей с помощью стационарной установки и установки системы слежения за Солнцем. Измерение времени с 6:00 до 18:00

1 – энергия (солнечный генератор с отслеживанием солнца),  $E = 7,15 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ ;  
2 – энергия (стационарный солнечный генератор),  $E = 5,5 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$

8 ч с помощью солнечной системы слежения на 30 % выше, чем у стационарной системы (угол наклона солнечного генератора  $20^\circ$ ).

*Погрешности измерений экспериментальной модели.* Неопределенность может быть определена как параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий разброс значений, которые могут быть разумно отнесены к реальному значению [22, 38].

Последовательность расчета математической неопределенности экспериментальной модели следующая:

- вычисление среднеарифметического образца

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}, \quad (4)$$

где  $x_i$  – числовое значение образца,  $n$  – размер выборки;

- расчет дисперсии

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}; \quad (5)$$

• критерием оценки типичного отклонения являлся положительный квадратный корень дисперсии

$$S = \sqrt{s^2}; \quad (6)$$

- расчет среднего отклонения

$$G_m = \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (7)$$

- вычисление абсолютной ошибки

$$E_a = G_m + E_i, \quad (8)$$

где  $E_i$  – инструментальная ошибка или ошибка измерения датчика;

- расчет относительной ошибки

$$E_r = \frac{E_a}{\bar{x}} 100. \quad (9)$$

Значения, представленные в табл.4, соответствуют уравнениям, приведенным выше.

Таблица 4

Погрешности результатов измерений

| Измеряемая переменная                   | $n$ | $\bar{x}$ | $S$    | $^*T$ | $E_a$ | $E_r, \%$ |
|-----------------------------------------|-----|-----------|--------|-------|-------|-----------|
| Датчик температуры окружающей среды, °C | 50  | 30,88     | ±0,479 | ±0,5  | 0,17  | 0,54      |
| Датчик рабочей температуры 1, °C        | 50  | 24,18     | ±6,77  | ±1    | 1,46  | 6         |
| Датчик рабочей температуры 2, °C        | 50  | 21,46     | ±4,17  | ±1    | 1,09  | 5         |
| Относительная влажность, %              | 50  | 63,88     | ±0,32  | ±2    | 0,14  | 0,22      |
| Скорость ветра, м/с                     | 50  | 1,22      | ±0,53  | –     | 0,17  | 6         |
| Датчик света 1, люкс                    | 50  | 425,98    | ±29,74 | –     | 4,2   | 0,98      |
| Датчик света 2, люкс                    | 50  | 463,16    | ±31,51 | –     | 4,5   | 0,96      |
| Датчик света 3, люкс                    | 50  | 410,97    | ±37,05 | –     | 5,2   | 0,94      |
| Датчик света 4, люкс                    | 50  | 355,92    | ±32,95 | –     | 4,6   | 0,97      |
| Датчик напряжения, В                    | 50  | 8,32      | ±0,74  | –     | 0,2   | 2,5       |
| Датчик напряжения, В                    | 50  | 8,48      | ±0,73  | –     | 0,2   | 2,4       |

\* Точность указана производителем.

Вычислив погрешности для каждого из датчиков экспериментальной модели, можно по результатам, полученным в табл.2, сделать следующие выводы:

- значения, полученные аналоговыми датчиками рабочей температуры LM35, показывают высокие относительные ошибки 6 и 5 % соответственно, а датчик скорости ветра имеет относительную ошибку 6 %. Это достаточно большие отклонения, поэтому необходимо определить причины такой большой ошибки;

- причины, которые увеличивают погрешность измерения, могут быть различными, наиболее вероятными являются следующие: датчик может быть поврежден; датчик не откалиброван; из-за некачественной реализации могут быть допущены ошибки при измерении с помощью датчика; электрические помехи.

С другой стороны, значения неопределенности для датчиков LM35 ( $\pm 6,77$  и  $\pm 4,55$  °C) значительно отличаются от значения, представленного производителем ( $\pm 1$  °C). Другие датчики имеют адекватные значения относительной погрешности, некоторые не превышают 1 %.

Одной из фундаментальных причин, по которой датчик используется для измерения скорости ветра в экспериментальной модели, является то, что ветер естественным образом охлаждает солнечный модуль, это влечет снижение его рабочей температуры, что приводит к увеличению напряжения на выходе. Это обусловлено тем, что существует обратная пропорциональная зависимость между температурой работы солнечного модуля и выходным напряжением. Все это приводит к увеличению эффективности солнечного модуля.

В результате исследования аналоговые датчики LM35 были заменены цифровыми датчиками температуры D18B20, которые имеют незначительные относительные погрешности измерений.

**Заключение.** В настоящее время существует несколько систем электроснабжения, которые объединяют электрические подсистемы для горнодобывающих предприятий на территории Республики Куба с системами электроснабжения, обладающими солнечными установками. Куба имеет запасы никеля и кобальта, крупные месторождения медных руд, марганцевых руд хромитов, железной руды, асбеста, фосфоритов. В 2006 г. началось освоение нефтегазового месторождения [32]. В 2014 г. крупная российская компания «Роснефть» и кубинская государственная нефтяная компания «Union CubaPetroleo» подписали соглашение о сотрудничестве в области повышения нефтеотдачи на зрелых месторождениях и соглашение о совместной разработке кубинского шельфа. Поэтому внедрение систем слежения за Солнцем в системы электроснабжения объектов минерально-сырьевого комплекса будет способствовать не только развитию горнодобывающей отрасли в целом, но и приведет к улучшению экологической обстановки в регионе. Внедрение двуосевых систем слежения в системы электроснабжения горных комплексов позволит увеличить подачу электроэнергии на 30-40 % в зависимости от географической широты, в которой расположено горное предприятие.

Использование солнечного трекера является значимым технологическим решением в области оптимизации использования солнечной энергии, поскольку это позволит в будущем более широко использовать энергию для развития промышленности. Экспериментальная модель двуосевой солнечной системы слежения позволит увеличить излучение, поглощаемое панелями, а следовательно, и генерируемую энергию [39]. В то же время с помощью разработанной модели могут быть изучены все электрические параметры этих систем и их зависимость от климатических условий региона.

Предложенная экспериментальная модель соответствует необходимым параметрам, а погрешности ее измерения соответствуют диапазону принятых значений. Экспериментальная модель представляет собой экономичную альтернативу для исследования солнечных трекеров в различных климатических условиях, а также на территории других стран, поскольку стоимость этой экспериментальной модели не превышает 100 дол.

Опыт, полученный в ходе исследования, представленного в данной работе, может быть применен в проведении аналогичных исследований в России [33]. При разработке стратегии развития энергосистем восточных регионов России следует учитывать возможность организации центров солнечной генерации [28]. Исследования такого типа помогут объективно оценить технический и экономический эффект от применения технологии солнечного трекинга в конкретных климатических условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 31-40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31
2. Бельский А.А. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности / А.А.Бельский, В.С.Добуш, Ш.Ф.Хайкал // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 564-569. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.564
3. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга / М.А.Пашкевич, Д.Бек, В.А.Матвеева, А.В.Алексеев // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 125-130. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.125
4. Паньков И.А. Повышение качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах / И.А.Паньков, В.Я.Фролов // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 563-568. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.563





5. Патент № 2020615141 РФ. Программа для исследования режимов работы солнечной батареи / Д.Д.Герра, Э.В.Яковлева. Оpubл. 18.05.2020. Бюл. № 1.
6. *Ali M.I.M.* Efficiency of solar cells for UAV / M.I.M.Ali, M.H.Husni // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. Vol. 8. Iss. 5s. P. 575-577.
7. Augmented reality system and maintenance of oil pumps / N.Koteleva, G.Buslaev, V.Valnev, A.Kunshin // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2020. Vol. 33. Iss. 8. P. 1620-1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20
8. *Bardanov A.I.* Modeling the process of redistributing power consumption using energy storage system with various configurations to align the electrical loads schedule / A.I.Bardanov, O.S.Vasilkov, T.V.Pudkova // International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering (IPDME), 23-24 April, 2020, St. Petersburg, Russian Federation. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1753. № 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012013
9. *Belsky A.A.* The use of hybrid energy storage devices for balancing the electricity load profile of enterprises / A.A.Belsky, A.N.Skamynin, O.S.Vasilkov // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2020. Vol. 63. № 3. P. 212-222. DOI: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222
10. *Bodnár I.* Simulation of a solar power plant / I.Bodnar, F.Dávid, D.Gyorgy // 20th International Carpathian Control Conference (ICCC), 26-29 May, 2019, Krakow-Wieliczka, Poland. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2019.8766044
11. *Carbonell M.* Solar tracker operation and origins. URL: <https://www.hogarsense.es/energia-solar/seguidor-solar> (дата обращения 18.01.2021).
12. *Cherepovitsyn A.E.* Methods and tools of scenario planning in areas of natural resources management / A.E.Cherepovitsyn, A.A.Ilinova // European Research Studies Journal. 2018. Vol. 21. Iss. 1. P. 434-446.
13. Current collector optimizer topology with reconfiguration algorithm to harvest optimal power from nonuniform aged PV arrays / A.Refaat, A.A.Shehata, M.Elgamal, N.V.Korovkin // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020), 6-9 October, 2020, Vladivostok, Russia. IEEE, 2020. № 9271455. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271455
14. Digital platform as a means of process optimization of integrating electric vehicles into electric power networks / Y.L.Zhukovskiy, P.K.Suslikov, E.G.Arapova, L.Z.Alieva // International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020), 6-8 April, 2020, Novosibirsk, Russian Federation. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1661. № 012162. DOI: 10.1088/1742-6596/1661/1/012162
15. *Dobush V.S.* Electrical Complex for Autonomous Power Supply of Oil Leakage Detection Systems in Pipelines / V.S.Dobush, A.A.Belsky, A.N.Skamynin // XIII International Scientific and Technical Conference «Applied Mechanics and Systems Dynamics», 5-7 November, 2019, Omsk, Russian Federation. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1441. № 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/1441/1/012021
16. Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production / J.Alonso-Montesinos, F.R.Martínez, J.Polo et al. // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 23. № 6376. DOI: 10.3390/en13236376
17. *Enrique J.M.* A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications / J.M.Enrique, J.M.Andújar, M.A.Bohórquez // Solar Energy. 2010. Vol. 84. Iss. 1. P. 79-89. DOI: 10.1016/j.solener.2009.10.011
18. *Mejía A.E.* Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para la optimización de un sistema fotovoltaico / A.E.Mejía, M.H.Londoño, J.C.Osorio // Scientia et Technica. 2010. Vol. 1. № 44. P. 245-250 (in Spanish).
19. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2 / A.V.Boikov, R.V.Savelev, V.A.Payor, A.V.Potapov // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 20. P. 3-6. DOI: 10.17580/cisir.2020.02.01
20. *Glazev M.* Environmental technologies in the production of metallurgical silicon / M.Glazev, V.Bazhin // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues – Proceedings of the Russian-German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion. London: CRC Press, 2019. P. 114-119. DOI: 10.1201/9781003017226-17
21. *Gulkov Y.V.* Research of grounding systems of electrical complexes in the conditions of permafrost soils / Y.V.Gulkov, A.V.Turysheva, A.V.Kopteva // Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus 2019), 28-31 January, 2019, St. Petersburg and Moscow, Russian Federation. IEEE, 2019. P. 969-972. DOI: 10.1109/ElConRus.2019.8657119
22. *Gutiérrez S.J.* Prototype for an off-grid photovoltaic system with low cost solar tracking. EEE Mexican Humanitarian Technology Conference, 2017. DOI: 10.1109/MHTC.2017.7926198
23. Influence of solar tracking error on the performance of a small-scale linear Fresnel reflector / A.Barbón, C.Bayón-Cueli, L.Bayón, P.F.Ayuso // Renewable Energy. 2020. Vol. 162. P. 43-54. DOI: 10.1016/j.renene.2020.07.132
24. *Iqbal M.* An introduction to Solar Radiation. Academic Press, 1983. 408 p.
25. *Kelly N.A.* Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system / N.A.Kelly, T.L.Gibson // Solar Energy. 2009. Vol. 83. Iss. 11. P. 2092-2102. DOI: 10.1016/j.solener.2009.08.009
26. *Lavrenko S.A.* Energy efficient unit executive body for tunneling and cleaning operations / S.A.Lavrenko, D.I.Shishljannikov, A.B.Maksimov // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th Conference of the Russian-German Raw Materials, 7-8 November, 2018, Potsdam, Germany. CRC Press, 2018. P. 287-292.
27. *Lavrik A.* Assessing the solar power plant efficiency degradation resulting from heating / A.Lavrik, E.Iakovleva, A.Leskov // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. № 3. P. 115-119. DOI: 10.12911/22998993/86149
28. *Litvinenko V.S.* The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied natural gas // Resources. 2020. Vol. 9. Iss. 5. P. 59. DOI: 10.3390/RESOURCES9050059
29. Mathematical simulation of transient operation modes of an electric drive of a centrifugal pump for a slurry pipeline / A.Korzhev, O.Bolshunova, I.Voytyuk, A.Vatlina // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019), 19-20 November, 2019, St. Petersburg, Russian Federation. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 140. № 04012. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004012
30. *Ponomarenko T.* Mineral resource depletion assessment: Alternatives, problems, results / T.Ponomarenko, M.Nevskaya, I.Jonek-Kowalska // Sustainability (Switzerland). 2021. Vol. 13. Iss. 2. P. 862. P. 1-15. DOI: 10.3390/su13020862
31. SICODI, a system proposal for management of information from meetings and its use in the cubapetroleo union / S.B.Rosabal, A.M.Castillo, L.A.Q.Santiesteban, Y.F.Martínez // Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud (ACIMED). 2011. Vol. 22. Iss. 4. P. 362-370 (in Spanish).



32. *Shehata A.A.* Optimal Allocation of FACTS Devices based on Multi-Objective Multi-Verse Optimizer Algorithm for Multi-Objective Power System Optimization Problems / A.A.Shehata, A.Refaat, N.V.Korovkin // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon 2020), 6-9 October, 2020, Vladivostok, Russian Federation. IEEE, 2020. № 9271359. DOI: [10.1109/FarEastCon50210.2020.9271359](https://doi.org/10.1109/FarEastCon50210.2020.9271359)
33. *Smirnov A.I.* Diagnostics of inter-turn short-circuit in the stator winding of the induction motor / A.I.Smirnov, I.N.Voytyuk // International Scientific Electric Power Conference, 23-24 May, 2019, St. Petersburg, Russian Federation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 643. № 012023. DOI: [10.1088/1757-899X/643/1/012023](https://doi.org/10.1088/1757-899X/643/1/012023)
34. *Sychev Y.A.* The Method of Power Factor Calculation under Non-Sinusoidal Conditions / Y.A.Sychev, B.N.Abramovich, M.E.Aladin // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus 2020), 27-30 January, 2020, St. Petersburg and Moscow, Russian Federation. IEEE, 2020. P. 904-908. DOI: [10.1109/EIConRus49466.2020.9039427](https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039427)
35. *Tafavogh M.* Design and production of a novel encapsulated nano phase change materials to improve thermal efficiency of a quintuple renewable geothermal/hydro/biomass/solar/wind hybrid system / M.Tafavogh, A.Zahedi // Renewable Energy. 2021. Vol. 169. P. 358-378. DOI: [10.1016/j.renene.2020.12.118](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.118)
36. *Tsvetkov P.S.* Public Perception of Carbon Capture and Storage: A State-of-the-Art Overview / P.S.Tsvetkov, A.E.Cherepovitsyn, S.V.Fedoseev // Heliyon. 2019. Vol. 5. Iss. 12. P. 1-28. DOI: [10.1016/j.heliyon.2019.e02845](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02845)
37. Two-Axis Sun Tracking System for a Solar Furnace / G.Villeda, A.Castañeda, J.T.Vega, J.Pineda // Informacion Tecnologica. 2011. P. 95-106. DOI: [10.4067/S0718-07642011000200011](https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000200011)
38. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / Y.L.Zhukovskiy, N.A.Korolev, I.S.Babanova, A.V.Boikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 8. Iss. 3. № 032056. DOI: [10.1088/1755-1315/87/3/032056](https://doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032056)
39. *Veligorskiy O.* High-efficiency solar tracker development and effectiveness estimation / O.Veligorskiy, R.Kosenko, S.Stepenko // Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2-6 June, 2014, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2014. P. 153-158. DOI: [10.1109/IEPS.2014.6874169](https://doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874169)

**Авторы:** Я.Э.Шклярский, д-р техн. наук, профессор, [Shklyarskiy\\_YaE@pers.spmi.ru](mailto:Shklyarskiy_YaE@pers.spmi.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8803-9898> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Д.Д.Герра, аспирант, [dgd210386@gmail.com](mailto:dgd210386@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-5752-1251> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Э.В.Яковлева, канд. техн. наук, доцент, [yakovleva\\_ev@pers.spmi.ru](mailto:yakovleva_ev@pers.spmi.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7354-0185> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.Рассылкин, д-р техн. наук, профессор, [anton.rassolkin@taltech.ee](mailto:anton.rassolkin@taltech.ee), <https://orcid.org/0000-0001-8035-3970> (Таллинский технический университет, Таллин, Эстония).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.03.2021.

Статья принята к публикации 21.05.2021.