

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копытов, Н. П. Решения в сфере электроэнергетики. Развитие в контексте цифровизации/ Н. П. Копытов // Новости ЭлектроТехники. - 2019. - № 1 (115). - С. 32-33.
2. Могиленко, А. В. Влияние цифровизации на энергетическую отрасль / А. В. Могиленко // Новости ЭлектроТехники. - 2018. - № 4 (112). - С. 34-37.
3. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г. Этапы развития стратегий и информационных систем управления производственными активами // Путь науки. - 2015. - № 5. - С. 42-45.

УДК 621.311.25

*к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: yrvaskon@mail.ru*

**Коновалов Юрий Васильевич,****Хазиев Алексей Нурисламович,***обучающийся группы ЭЭ-19-1,**ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,**e-mail: uxaziewaaa@gmail.com*

### ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ В СРЕДЕ MATHWORKS SIMSCAPE

*Konovarov Yu. V., Khaziev A. N.*

#### VISUALIZATION OF THE SUN TRACKING SYSTEM IN THE MATHWORKS SIMSCAPE

**Аннотация.** Дано математическое описание системы слежения за солнцем. Получена кинематическая модель солнечного трекера. Получен действующий прототип имитационной модели системы слежения за солнцем с 3D-визуализацией рассматриваемого промышленного объекта. Снята механическая характеристика вращения узла системы наведения. Получены сравнительные графики выработки инсоляции для двух типов трекера.

**Ключевые слова:** MATLAB, электроэнергетика, инсоляция, трекер, Simscape.

**Abstract.** A mathematical description of the solar tracking system is given. A kinematic model of the solar tracker is obtained. A working prototype of a simulation model of a solar tracking system with 3D visualization of the industrial object under consideration has been obtained. The mechanical characteristic of the rotation of the guidance system node has been removed. Comparative graphs of insolation generation for two types of tracker have been obtained.

**Keywords:** MATLAB, electric power industry, insolation, tracker, Simscape.

Из всех известных способов производства электрической энергии наиболее востребованными и динамично развивающимися в настоящее время являются фотоэлектрические технологии, к конкурентным преимуществам которых относят большой срок службы основных энергетических компонентов, минимальные эксплуатационные затраты, возможность создания генерирующих установок на широкий диапазон мощностей с максимальным приближением к объектам электропотребления.

Несмотря на многие преимущества, высокая стоимость оборудования и низкая эффективность преобразования энергии по сравнению с другими типами электростанций, остаются сдерживающими факторами для внедрения фотоэлектрических электро-

станций (ФЭС). Такое положение вещей принуждает инженеров, разрабатывающих фотоэлектрические системы, находить новые и совершенствовать известные технические решения, повышающие эффективность, производительность и снижающие себестоимость вырабатываемой энергии. Одним из таких решений является использование систем слежения за положением солнца, которыми являются солнечные трекеры (СТ).

Системы слежения за Солнцем (ССС) предназначены для сохранения перпендикулярности падения солнечных лучей на поверхность солнечных модулей в течение дня, что способствует максимальному сбору энергии. Невыполнение этого условия приводит к уменьшению эффективной площади и дополнительным отражениям. Опыт ис-

пользования ССС в мире продемонстрировал, что их применение обеспечивает повышение производительности солнечных панелей в среднем от 15 до 70 % в зависимости от вида трекера, координат солнечной электростанции и времени года. Предполагаемая выгода применения ССС стимулирует развитие данной технологии солнечной энергетики [1, 2].

Максимальную эффективность использования солнечной энергии обеспечивают двухосевые трекеры, конструкции которых подразделяются по направлению основной оси. Из двухосевых систем слежения наибольшее распространение получили трекеры с осью вращения на несущем столбе (tip tilt dual axis tracker – ТТДАТ) и трекеры с опорной плоскостью (azimuth altitude dual axis tracker – ААДАТ), в которых главная ось является вертикальной. Достоинствами ТТДАТ трекеров является простота конструкции и большая гибкость территориального размещения, что позволяет их использовать для построения ФЭС как небольшой мощности для индивидуального применения, так и в крупных энергетических проектах [3]. На практике применяются два основных алгоритма слежения за положением Солнца – астрономический и по датчикам света. Вследствие простоты технической реализации чаще используется алгоритм слежения по световым датчикам, принцип действия которого заключается в позиционировании солнечной батареи на максимальную интенсивность света на небосводе, определяемую по текущим показаниям фотоприемников. Серьезным недостатком трекерных систем с датчиками света является их неработоспособность в пасмурную погоду, при интенсивных осадках и загрязнении фотоприемников. Более надежны астрономические алгоритмы, которые в простейшем случае могут быть реализованы путем дискретного изменения положения солнечной батареи по суточной программе таймера [4].

Для работы СТ необходимы данные о положении солнца на небе в указанный момент времени, нахождение солнца определяется небесной механикой, состоящей из следующих основных формул.

Угол высоты подъема Солнца над горизонтом вычисляется по формуле:

$$h = 90^\circ - \vartheta_z.$$

Зенитный угол Солнца определяется по выражению:

$$\vartheta_z = \arccos[\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega],$$

где  $\phi$  – широта местности в точке установки панелей.

Часовой угол вычисляется по формуле:

$$\omega = 15 \cdot (t - 12 - T_{\text{уб}} - \Delta T_{\text{UTC}}) + \psi,$$

где  $t$  – текущее официальное местное время, час;  $\Delta T_{\text{UTC}}$  – разница между местным официальным временем и средним временем по Гринвичу, час;  $\psi$  – географическая долгота точки размещения приемной площадки, град.

Угол склонения находится по формуле:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin(0,986 \cdot N + 280,024),$$

где  $N$  – номер календарного дня с начала года.

Углы восхода  $\omega_n$  и заката  $\omega_k$  Солнца по солнечному времени определяются из выражений:

$$\omega_n, \omega_k = 0 \pm \arccos[-\tan \phi \cdot \tan \delta].$$

При определении параметров солнечной следящей системы удобно использовать диаграмму траектории движения Солнца, внешний вид которой показан на рис. 1. В Ангарске максимальное годовое значение углов азимута и подъема солнца не превышает  $300^\circ$  и  $60^\circ$  соответственно.

Следовательно, для СЭС, территориально расположенной в районе г. Ангарска, требуется следящая система со следующими рабочими диапазонами перемещения:  $250^\circ$  по азимуту, и  $60^\circ$  по наклону.

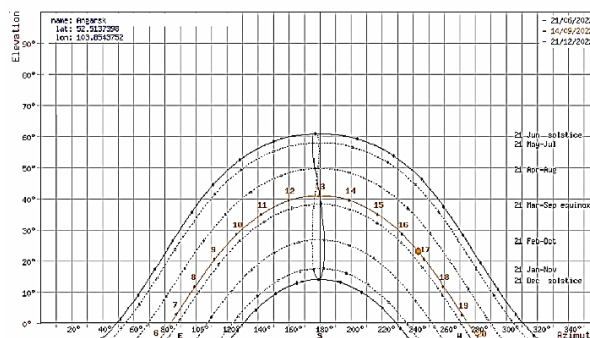


Рисунок 1 – Диаграмма траектории движения Солнца для города Ангарска

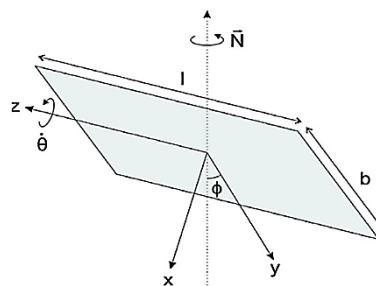


Рисунок 2 – Кинематическая модель трекера

Модель на рисунке 2 отражает принципиальную систему двухосевого трекера, имеющего две степени свободы,  $l$  – длина панели,  $b$  – ширина,  $\theta$  – угол наклона,  $\dot{\varphi}$  – угол поворота.

Перед построением трехмерной модели необходимо составить математическое описание движения системы, вывод уравнения движения системы, приводимой в движение обоими двигателями, которые совершают угловое вращение [5].

При разработке математического описания, в целях упрощения принимается  $\dot{\theta} = 0$ . Вектор угловой скорости  $\vec{N}$  вдоль координат  $x$  -  $y$  -  $z$  полученный из результирующего вектора угловой скорости  $\vec{\omega}$ :

$$\vec{\omega} = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}$$

$$= -N \sin \theta \vec{i} - N \cos \theta \vec{j} + \dot{\varphi} \vec{k}$$

где  $\theta$  – угол между панелью и вертикальной осью;  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орты.

Кинетический момент определяется выражением:

$$\vec{H} = I_{xx} \omega_x \vec{i} - I_{zz} \omega_z \vec{k},$$

где  $I_{xx}, I_{zz}$  – моменты инерции на оси  $x, z$ .

$$I_{xx} = \frac{1}{12} m(b^2 + l^2),$$

$$I_{zz} = \frac{1}{12} mb^2.$$

где  $m$  – масса тела,  $b$  – ширина,  $l$  – длина.

Кинетическая энергия равна:

$$T = \frac{1}{2} \vec{\omega} \vec{H}.$$

Предполагая, что потенциальная энергия пренебрежимо мала ( $V = 0$ ), то в соответствии с уравнением Лагранжа, можем записать:

$$L = T - V,$$

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i^{nc},$$

где  $i = 1, 2, \dots, n, \dot{q}_i$  – обобщенные скорости.

Предполагая, что система не имеет трения, так что силы консервативны:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0.$$

При вычислении частных производных получим следующие выражения:

$$\left(\frac{d}{dt}\right) \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right) = \frac{1}{12} mb^2 \ddot{\varphi}$$

где  $\ddot{\varphi}$  – производная второго порядка от угла поворота.

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = \frac{1}{12} m(b^2 + l^2) N^2 \sin \varphi \cos \varphi$$

Следовательно, уравнение движения имеет вид:

$$mb^2 \ddot{\varphi} - m(b^2 + l^2) N^2 \sin \varphi \cos \varphi = 0$$

Полученное дифференциальное transcendентное уравнение позволяет описать кинематику солнечного трекера, оптимизировать движение солнечной панели в соответствующем программном комплексе применительно к геолокационным параметрам их установки.

Современные программные средства для инженерных расчетов, в частности приложения Simulink и Simscape, позволяют значительно упростить выполнение динамических расчетов силовых передач. Они предоставляют фундаментальные блоки, при помощи которых можно создать модели физических компонентов, таких, как двигатель внутреннего сгорания, фрикционная муфта сцепления, зубчатый редуктор, упругие валы, демпфирующие устройства и другие компоненты силовой передачи. По модели, которая близка по виду к кинематической схеме, Simscape автоматически составляет дифференциальные уравнения, описывающие поведение механической системы [6].

На основе известных кинематических, инерционно-упругих и демпфирующих параметров трекера разработана Simscape-модель (рисунки 3 и 4) для симуляции динамических процессов, в частности поворота по обеим осям под действием крутящего момента двигателя. Сигналы поворота и наклон идут с подсистемы расчет положения солнца, поворот определяется азимутальным положением солнца, наклон его высотой на небе, характеристики момента вращения вала мотора снимаются осциллографом.

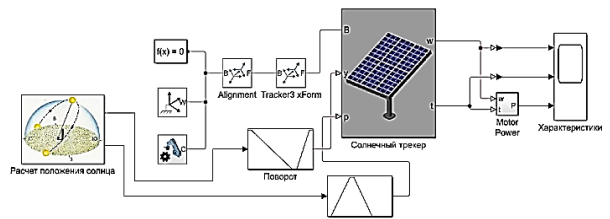


Рисунок 3 – Структурная схема системы слежения за солнцем

В Simscape multibody части трекера соединены между собой с помощью блоков Rigid Transform, представляющих собой матрицу преобразования между двумя системам координат. Две составляющие независимо определяют поступательную и вращатель-

ную части преобразования, в построении использовались для скрепления элементов между собой, World Frame – обеспечивает доступ к «мировой» уникальной, неподвижной, ортогональной, правосторонней системе координат, являющейся основой в модели, Mechanism Configuration – устанавливает механические и имитационные параметры, которые применяются ко всей модели, Solver Configuration – определяет параметры решателя, используемые для моделирования.



Рисунок 4 – Элементная схема солнечного трекера

В общем случае система позиционирования делится на ряд основных частей, к ним относятся:

- Элементы основания и солнечной панели с каркасом в которые входят площадка под стойку и сама стойка, солнечная панель с каркасом, выполнены с помощью конструктивных блоков solid, площадка из brick solid, панель образует множество различных по свойствам brick блоков, стойка из cylindrical solid. Блокам типа solid можно указать следующие свойства: геометрические – длину, высоту, ширину в выбранных единицах; инерции – плотность, центр масс; графические – цвет, прозрачность.

- Элементы вращения которые служат для поворота на определенный угол некоторой соединенной конструкции, кроме описанных выше конструктивных блоков имеют блоки Revolute Joint обеспечивающие одну вращательную степень свободы тела, следующего за блоком Revolute joint вокруг оси, заданной на вкладке Axes окна настройки блока, имеет входной параметр угла поворота; блок Bearing Joint имеет четыре степе-

ни свободы: три вращательные R1, R2, R3 и одну поступательную P1, причем поступательное движение вдоль оси P1 должно следовать после трех поворотов вокруг осей R1, R2, R3 и по направлению совпадать с осью; блок Worm and Gear Constraint реализует червячную передачу с соответствующими входными параметрами, позволяющую валу мотора вращать панель. Соответствующая подсистема отображена на рисунке 5 [7, 8].

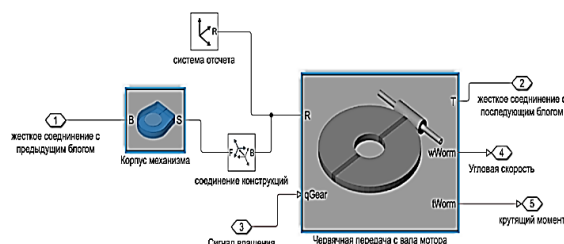


Рисунок 5 – Подсистема механизма горизонтального поворота

В Simscape модели трекера параметризация блоков, образующих модель, реализована созданием переменных с помощью внешних скриптов в workspace, выполнена группировка по категориям. Такой способ позволяет в отдельном окне удобно редактировать переменные, тем самым меняя свойства блоков, образующих модель.

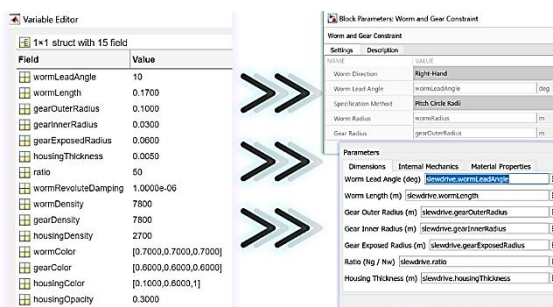


Рисунок 6 – Окно редактирования переменных и примеры для двух блоков

Также в Simscape multibody есть возможность импорта сторонних моделей, это позволяет сделать блок file solid, поддерживаются основные форматы stp и stl. С помощью плагина Simscape Multibody Link есть возможность импорта сборок САПР, поддерживаемые программы SolidWorks, PTC Creo, и Autodesk Inventor [9].

С помощью описанной выше функции была загружена условная модель административного здания (рисунок 7), импорт окружения позволяет визуально оценить размеры, относительное расположение солнечных

трекеров, построить проекции для определения возможных перекрытий.

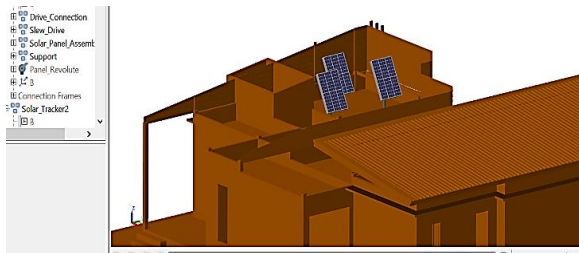


Рисунок 7 – Пример использования модели для административного здания

На рисунке 8 отображена работа ССС в течении 16 часов, левая часть – положение в момент восхода солнца, средняя через 6 и 10 часов после, правая после 16 часов в момент заката.



Рисунок – 8. Изометрический вид поворот панелей в течение 16 часов

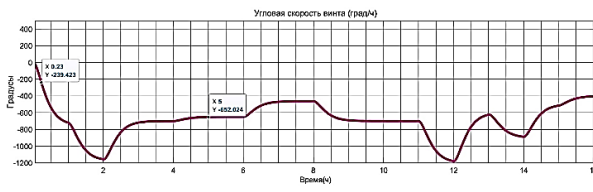


Рисунок 9 – График угловой скорости винта от времени

Разработанная математическая модель позволяет построить график угловой скорости винта от времени (рисунок 9), который показывает характеристику угловой скорости винта (червяка) приводящего в движение основное колесо, в течении моделируемого времени. Соотношение радиусов винта и колеса 1:50.

На текущем этапе получен действующий прототип имитационной модели системы слежения за солнцем с 3D-визуализацией рассматриваемого объекта. Несмотря на то, что модель объекта является упрощенной, подход представляется перспективным, поскольку делает процесс имитационного моделирования очень наглядным. Модель позволяет отчетливо иллюстрировать поведение каждого механического компонента в различных условиях эксплуатации, оценить выходные характеристики такие как угловая скорость и крутящий момент, а также исследовать разные конфигурации ССС.

Методика позволяет оценить целесообразность применения систем слежения за солнцем, минимизирует капитальные затраты и использование полезных площадей, повышает качество электроснабжения и уменьшает отрицательное экологическое воздействие источников энергии.

Дальнейшим развитием работы видится создание более детализированных и, следовательно, более адекватных моделей объектов. Основным препятствием на этом пути является рост требований к вычислительной мощности и объему памяти процессоров, на которых может быть развернута система.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee J.F., Rahim N.A. Performance Comparison of Dual Axis Solar Tracker vs Static Solar System in Malaysia [Электронный ресурс]. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Performance-comparison-of-dual-axis-solar-tracker-Lee-Rahim/40b85f7289f2ceac8b8bb7e89a891ba245e0b193>.
2. Ribeiro D.B.S., Demetino G.G., Pepe I.M. Solar Trackers: Worldwide Map of Performances // 22 International Congress of Mechanical Engineering. – Ribeirno Preto, Brazil, 2013. –P. 5521–5530.
3. Prinsloo G., Dobson R. Solar Tracking. South Africa. EBook. – 2015. – ISBN: 978–0620–61576–1. [Электронный ресурс] URL: <https://www.researchgate.net/profile/Gerro-Prinsloo>.
4. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. 95–106 Обухов С.Г., Плотников И.А. Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем. [Электронный ресурс] URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/51499/1/bulletin\\_tpu-2018-v329-i10-10.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/51499/1/bulletin_tpu-2018-v329-i10-10.pdf).
5. Dual-Axis Solar Tracker: Functional Model Realization and Full-Scale Simulations Myo Thaw and Melanie Li Sing How P. 143–145. [Электронный ресурс] URL: <https://www.academia.edu/33093665>.