УДК 621 DOI: 10.15372/PMTF202215057

НАДЕЖНЫЙ КОНТРОЛЛЕР СО СКОЛЬЗЯЩИМ РЕЖИМОМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХОСНЫМ ТРЕКЕРОМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ТОЧНОГО ОТСЛЕЖИВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЦА

М. Шекари, А. Ханджанзадех*

Университет им. Шахида Бехешти, Тегеран, Иран

* Исламский университет Азад, Чалус, Иран

E-mails: morteza.shekari1986@gmail.com, amirkhanjanzadeh@gmail.com

Предложен новый двухосный трекер, предназначенный для точного отслеживания положения Солнца. Для управления трекером используется контроллер со скручивающим скользящим режимом, обеспечивающий ориентацию фотоэлектрической панели перпендикулярно направлению солнечного излучения. Контроллер со скручивающим режимом создает спиральную кривую, в результате чего уменьшаются время конвергенции и "болтанка" (вибрация) трекера. Следовательно, контроллер со скручивающим скользящим режимом высокого порядка повышает эффективность работы трекера и сглаживает его движение без необходимости дифференцирования по времени скользящей переменной. При тестировании эффективности работы предложенного трекера, управляемого контроллером со скользящим режимом, были рассмотрены различные значения мощности солнечного излучения и температуры. Результаты моделирования показали, что предлагаемый контроллер извлекает максимальную электрическую энергию из солнечного излучения. Для оценки эффективности работы предложенного трекера сконструирован и протестирован его прототип.

Ключевые слова: двухосный солнечный трекер, контроллер со скручивающим скользящим режимом высокого порядка, фотоэлектрическая панель, солнечная энергия

Введение. В связи с истощением природных топливных ресурсов в последнее время широко используются возобновляемые источники энергии.

Из результатов многочисленных исследований следует, что чрезмерное потребление ископаемого топлива является причиной разрушения окружающей среды, глобального потепления, загрязнения воздуха и вызывает различные заболевания. Солнечная энергия является неисчерпаемым и чистым источником электроэнергии. При этом не образуются парниковые газы, такие как окись углерода СО, двуокись углерода СО₂ и метан. Максимальное количество солнечной энергии необходимо получать в условиях изменчивости и неопределенности ее интенсивности и количества в течение ежедневных и ежегодных циклов. Для этого используются солнечные трекеры, позволяющие точно и быстро отслеживать солнечное излучение. Система управления трекером должна быть тщательно спроектирована. Ядро Солнца имеет температуру порядка $20 \cdot 10^6$ °C и излучает электромагнитные волны, температура которых составляет приблизительно 5600 °C. Солнечная энергия может непосредственно или косвенно преобразовываться в другие формы энергии, такие как тепло и электричество, которые используются для отопления, сушки сельскохозяйственных продуктов, в химических реакциях и т. п. Ранее в моделях солнечных трекеров не уделялось внимания разработке технологии слежения за Солнцем. С целью получения максимального количества солнечной энергии было предложено использовать в системах отслеживания солнечного излучения одноосный и двухосный солнечные трекеры. Применение двухосного солнечного трекера позволяет получать максимальное количество солнечной энергии.

Фотоэлектрические панели, оснащенные системами слежения за Солнцем, позволяют значительно увеличить выход энергии. Солнечные панели размещаются последовательно (параллельно) для увеличения напряжения (силы тока) и обеспечения постоянного тока. Затем применяется многоуровневый инвертор для преобразования постоянного напряжения в переменное напряжение, используемое в быту и в промышленности. Выходную мощность фотоэлектрических панелей можно максимизировать, расположив их перпендикулярно направлению солнечного излучения. Для поворота фотоэлектрических панелей в направлении максимального излучения используются солнечные трекеры. Солнечные трекеры различаются количеством движущихся двигателей, способом выработки электроэнергии, методами отслеживания, системами отопления или электроснабжения, способом поворота по азимуту и углу места и т. п. Как правило, все трекеры делятся на два типа: трекеры с одной осью и трекеры с двумя осями. Двухосные солнечные трекеры могут располагаться в горизонтальном и вертикальном направлениях. Повышение производительности систем слежения за Солнцем является основной задачей в области преобразования солнечной энергии.

В работе [1] описана оптимальная система привода для управления системами слежения за Солнцем. В [2] для повышения энергоэффективности фотоэлектрических панелей предложена новая методика, основанная на применении программируемой вентильной матрицы, использующей многопроцессорную систему на кристалле. В работе [3] с помощью алгоритма Мамдани и адаптивной нейронечеткой логики разработан двухосный солнечный трекер с нечетким логическим контроллером. В [4] предложен метод оптимизации работы нечетких контроллеров с использованием алгоритма Такаки — Сугено — Канга с целью повышения производительности солнечных трекеров.

В работе [5] предложен контроллер для двигателя солнечного трекера, в котором для оптимизации его параметров используются такие методы, как генетический алгоритм, метод роя частиц и метод обучения.

В [6] разработана усовершенствованная методика слежения за Солнцем, предназначенная для повышения производительности и обучения трекера. В работе [7] предложена новая методика получения максимального количества энергии с использованием вращающегося по линейному закону солнечного трекера, управляемого контроллером со скользящим режимом с помощью алгоритмов нечеткой логики. В [8] разработан бездатчиковый солнечный трекер со скользящим режимом с двумя степенями свободы.

Контроллер со скользящим режимом имеет ряд преимуществ по сравнению с другими контроллерами (несложный принцип работы, высокие динамические и переходные характеристики, нечувствительность к системным неопределенностям и изменениям параметров [9]), что позволяет использовать его в линейных и нелинейных системах. Однако немодулированные сигналы, имеющие место в реальных системах, затрудняют работу контроллера со скользящим режимом, вызывая нежелательные колебания с ограниченной частотой амплитуды, известные как явление дребезга. Это явление существенно снижает производительность системы управления и препятствует широкому использованию скользящего режима на практике [10]. Для улучшения характеристик контроллера со скользящим режимом предлагалось использовать изменяющуюся во времени поверхность скольжения [11], нечеткий контроллер со скользящим режимом [12], контроллер со скользящим режимом на основе функции гиперболического тангенса [13]. Однако использование этих методов не привело к существенному уменьшению вибраций. Эффективным способом устранения вибраций является применение контроллера со скользящим режимом помимо проблемы вибрации возникает проблема бесконечного времени сходимости. В результате применения алгоритма скручивания строится спиральная кривая, ускоряется сходимость и уменьшается вибрация.

В данной работе предлагается конструкция нового двухосного солнечного трекера, для управления которым используется контроллер со скручивающим скользящим режимом, позволяющий удерживать фотоэлектрическую панель в положении, в котором ее поверхность перпендикулярна направлению излучения. Под управлением предлагаемого контроллера из солнечного излучения извлекается максимальное количество электрической энергии, также этот контроллер управляет напряжением в соответствии с требованиями сети. Таким образом, контроллер со скручивающим скользящим режимом высокого порядка повышает эффективность отслеживания положения Солнца двухосным трекером и сглаживает движение трекера при отслеживании без использования производной по времени скользящей переменной. Проведено тестирование контроллера при различных значениях мощности солнечного излучения и температуры. Сконструирован и испытан прототип предложенного контроллера.

1. Конструкция и анализ характеристик предлагаемого двухосного солнечного трекера. Ниже исследуются характеристики двухосного солнечного трекера и режимы его работы.

1.1. Двухосный солнечный трекер. Как отмечено выше, конструкция солнечного трекера позволяет повысить эффективность работы фотоэлектрической панели за счет установки ее в наилучшем положении по отношению к Солнцу (в идеале — перпендикулярно излучению). Как известно, положение Солнца меняется ежедневно и ежегодно. Основным способом точного отслеживания этих изменений является применение двухосного солнечного трекера. Использование двух осей вращения позволяет трекеру свободно двигаться в любом направлении. Первая, вертикальная, ось позволяет устройству перемещаться по сторонам света, вторая ось является горизонтальной и расположена на платформе. Математическая модель процесса слежения в системе координат (d, q) представляется следующими уравнениями:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L} \left(v_d - Ri_d + NL\Omega i_q \right), \qquad \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L} \left(v_q - Ri_q + NL\Omega i_d - K\Omega \right),
\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \left(Ki_q - f_v \Omega - C \right), \qquad \frac{d\theta}{dt} = \Omega.$$
(1)

Здесь i_d , i_q — эталонные токи в направлениях осей $d, q; v_d, v_q$ — эталонные напряжения в направлениях осей d, q; R, L — сопротивление и индукция ротора; J — момент инерции ротора; N — число оборотов ротора; K — коэффициент, зависящий от величины крутящего момента; f_v — коэффициент трения; Ω — угловая скорость; θ — угол, определяющий положение ротора. Переменные состояния можно представить в виде

$$x = [i_d, i_q, \theta, \Omega]^{\mathrm{T}}, \qquad u = [v_d, v_q]^{\mathrm{T}},$$

где x, u — вектор состояния и вектор входных данных соответственно. Система уравнений (1) относительно переменных состояния имеет вид

$$f(\Omega) = \begin{bmatrix} -R/L & N\Omega & 0 & 0\\ N\Omega & -R/L & \alpha_{23} & -K\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & K/J & 0 & -f_v/J \end{bmatrix}, \quad g = \begin{bmatrix} 1/L & 0\\ 0 & 1/L\\ 0 & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad p = \begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 0\\ -C/J \end{bmatrix}$$

 $c(\mathbf{O})$

Для того чтобы провести анализ системы управления двухосным трекером, систему уравнений относительно выходных данных $y_1 = \theta$, $y_2 = i_d$ нужно записать в следующем виде:

$$\theta = y_1, \qquad \Omega = \dot{y}_1, \qquad i_d = y_2, \qquad i_q = \frac{1}{K} (J\ddot{y}_1 + f_v \dot{y}_1 + C), v_d = L\dot{y}_2 + Ry_2 - \frac{NL}{K} \dot{y}_1 (J\ddot{y}_1 + f_v \dot{y}_1 + C),$$
(2)
$$v_q = \frac{JL}{K} \ddot{y}_1 + \frac{1}{K} (Lf_v + RJ)\ddot{y}_1 + \left(\frac{Rf_v}{K} + K - NLy_2\right)\dot{y}_1 + \frac{R}{K}C.$$

1.2. Скользящий режим управления. Согласно теории управления существует два вида неопределенностей (погрешности) системы: параметрические и непараметрические. Математическая модель любой системы является приближенной вследствие неопределенности параметров системы и неточности моделирования ее поведения (параметрическая неопределенность). Непараметрическая неопределенность обусловлена характеристиками окружающей среды, такими как шум, температура и т. п. В силу нелинейного характера большинства процессов, отслеживаемых трекером, разработка контроллеров, обладающих требуемой производительностью, на основе моделей с учетом неопределенностей является одной из основных задач при создании систем управления.

При использовании предлагаемого метода отсутствует необходимость учитывать неопределенности системы. Для определения закона управления достаточно задать неопределенный верхний предел. Между эффективностью работы контроллера и параметрической неопределенностью всегда существует противоречие. В частности, приводы в системе управления имеют некоторые ограничения, а использование закона управления с большим коэффициентом усиления само по себе может вызывать появление немоделируемых сигналов. Основной проблемой контроллера является наличие вибраций. Для их устранения в данной работе предлагается конструкция контроллера со скручивающим скользящим режимом.

Скользящий режим управления включает две фазы: фазу достижения поверхности переключения и фазу скольжения. Прежде чем достичь поверхности переключения, контроллер переводит систему в требуемое состояние. Скользящий режим возникает при приближении траектории к поверхностям переключения.

Точка в пространстве состояний начинает движение из начального положения, затем поверхность переключения захватывает ее и вынуждает двигаться к источнику (рис. 1,a). На практике вследствие таких явлений, как трение и частота переключения, точка в пространстве состояний системы, перемещаясь к поверхности переключения, проскакивает



Рис. 1. Теоретическая (a) и реальная (b) траектории, при движении по которым достигается поверхность переключения

через эту поверхность и незначительно отклоняется от нее. Поскольку поверхность переключения является своего рода поглотителем, точка возвращается на эту поверхность, но вновь проходит через нее, незначительно отклоняясь. Этот процесс продолжается до тех пор, пока точка в пространстве состояний не достигнет источника и ошибка не обратится в нуль. Такое движение точки соответствует "болтанке" (рис. $1, \delta$).

Нелинейную систему уравнений можно записать в виде

$$\dot{x} = f(x,t) + B(x,t)u,$$

где x - n-мерный вектор. Скользящая функция s(x,t) должна быть определена, при этом должен выполняться закон управления, соответствующий фазе достижения:

$$u(x,y) = \begin{cases} u^+(x,t), & s(x,t) > 0, \\ u^-(x,t), & s(x,t) < 0. \end{cases}$$

Закон управления u(x,t) должен быть построен таким образом, чтобы точка в пространстве состояний достигала поверхности скольжения s(x,t).

Рассмотрим следующую систему:

$$\dot{x} = A(x) + B(x)u.$$

Необходимо найти такую функцию (закон управления) $u_c(x)$, которая оставляет траекторию на поверхности s(x) = 0. Определение поверхности скольжения сводится к нахождению решения системы уравнений

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} A(x) + \frac{\partial s}{\partial x} B(x)u = 0.$$
(3)

Используя решение уравнений (3), выражение для управления $u_c(x)$ можно представить в виде

$$u_c(x) = -\left(\frac{\partial s}{\partial x} B(x)\right)^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} A(x).$$

Для обеспечения скользящего режима управления используется теория Ляпунова. Метод Ляпунова можно определить следующим образом:

$$\dot{s} > 0$$
 при $s < 0,$
 $\dot{s} < 0$ при $s > 0,$

или

 $\dot{s}s < 0.$

Необходимо гарантировать конечное время достижения источника, т. е.

$$\dot{s}_1 = \frac{\partial s_i}{\partial x} \times \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \times (A(x + B(x))),$$

или

$$\dot{s}_1 = C_1^{\mathrm{T}} A x + C_1^{\mathrm{T}} b_1 u_1 + \ldots + C_1^{\mathrm{T}} b_m u_m, \qquad \dot{s}_1 > 0 \quad \text{при} \quad s_1 < 0, \quad \dot{s}_1 < 0 \quad \text{при} \quad s_1 > 0,$$

:

 $\dot{s}_m = C_m^{\rm T} A x + C_m^{\rm T} b_m u_m + \ldots + C_m^{\rm T} b_m u_m, \qquad \dot{s}_m > 0 \quad \text{при} \quad s_m < 0, \quad \dot{s}_m < 0 \quad \text{при} \quad s_m > 0.$

1.3. Скручивающий скользящий режим управления двухосным солнечным трекером. Ошибка, возникающая в процессе слежения, определяется следующим образом:

$$\begin{split} e_1(t) &= i_d(t) - i_{dr}, \quad e_2(t) = i_q(t) - i_{qr}, \quad e_3(t) = \Omega(t) - \Omega_r, \quad e_4(t) = \theta(t) - \theta_r, \\ \dot{e}_1 &= \frac{1}{L} \left(v_d - v_{dr} - Re_1 + NL(e_3e_2 + e_3i_{qr} + e_2\Omega_r) \right), \\ \dot{e}_2 &= \frac{1}{L} \left(v_q - v_{qr} - Re_2 + NL(e_3e_1 + e_3i_{dr} + e_1\Omega_r) - Ke_3 \right), \\ \dot{e}_3 &= \frac{1}{J} \left(Ke_2 + f_v e_3 - C_r \right), \qquad \dot{e}_4 = e_3. \end{split}$$

В соответствии со скользящим режимом второго порядка поверхность скольжения можно представить следующим образом:

$$s_{\Omega} = \mu e_3 + \dot{e}_3 \tag{4}$$

(µ — положительная константа). Продифференцируем уравнение (4):

$$\dot{s}_{\Omega} = \mu \dot{e}_3 + \ddot{e}_3,$$

или

$$\dot{s}_{\Omega} = \frac{\mu}{J} \left(K e_2 - f_v e_3 - C_r \right) + \frac{1}{J} \left(K \dot{e}_2 - f_v \dot{e}_3 - \dot{C}_r \right).$$

Далее следует провести коррекцию траектории с использованием процесса управления. Для этого рассматривается поверхность скольжения

$$\dot{s}_{\theta} = \mu_1 e_4 + \mu_2 \dot{e}_4 + \ddot{e}_4. \tag{5}$$

Из (5) следует

$$s_{\theta} = \mu_1 e_4 + \mu_2 e_3 + \frac{1}{J} \left(K e_2 - f_v e_3 - C_r \right).$$

Таким образом, управление скользящего режима определяется следующим образом:

$$u_{s_{\Omega}} = -U_0 \operatorname{sgn}(s_{\Omega}), \qquad u_{s_{\theta}} = -U_0 \operatorname{sgn}(s_{\theta}) = \dot{s}_{\theta}.$$

Алгоритм скручивания используется для устранения явления "болтанки" в системах с переменной структурой. Для того чтобы сформулировать закон управления u(t), используются два слагаемых: непрерывная функция производной по времени и непрерывная по времени функция скользящей переменной. Управление скручивающего скользящего режима строится с использованием интеграла по контуру управления. Однако степень системы дифференциальных уравнений (2) выше, чем степень системы уравнений, полученной с помощью алгоритма скручивания, поскольку в этом алгоритме производная по времени от функции *s* не используется. Поверхности, полученные с помощью алгоритма скручивания, представляются следующим образом:

$$u_{s_{\Omega}} = \varkappa_{\Omega} \sqrt{|s_{\Omega}|} \operatorname{sat} (|s_{\Omega}|) - \lambda_{\Omega} \int_{0}^{t} \operatorname{sat} (s_{\Omega}) dt,$$
$$u_{s_{\theta}} = \varkappa_{\theta} \sqrt{|s_{\theta}|} \operatorname{sat} (|s_{\theta}|) - \lambda_{\theta} \int_{0}^{t} \operatorname{sat} (s_{\theta}) dt.$$

2. Результаты моделирования и их обсуждение. Численное моделирование задачи выполнялось с использованием программы MATLAB/SIMULINK. Положение фотоэлектрической панели, при котором извлекается максимальное количество солнечной энергии, обеспечивает максимальные напряжение V_{MPP} и силу тока I_{MPP}. Исследования проводились в стандартных условиях радиационных испытаний (мощность излучения 1 кВт/м², номинальная температура 25 °C). Для того чтобы оценить эффективность работы контроллера со скручивающим скользящим режимом высокого порядка, проводились испытания при различных значениях температуры и мощности излучения. Для увеличения напряжения фотоэлектрической панели до требуемого значения использовался повышающий преобразователь. Как отмечено выше, для точного отслеживания положения Солнца и увеличения выходной мощности фотоэлектрической панели предлагается использовать двухосный датчик на основе контроллера со скручивающим скользящим режимом высокого порядка. Система слежения фотоэлектрической панели, разработанная с использованием результатов измерений азимута и угла места, обеспечивает вращение трекера во всех направлениях. Предлагаемый двухосный солнечный трекер предназначен для извлечения максимального количества электрической энергии из солнечного излучения с использованием результатов непрерывного расчета максимальной фотоэлектрической мощности. Системы слежения за Солнцем, разработанные на основе контроллера со скользящим режимом высокого порядка, потребляют минимальное количество энергии. Однако этот контроллер имеет существенный недостаток, а именно подвержен вибрации, что препятствует точному отслеживанию положения Солнца. Для устранения этого недостатка контроллер со скользящим режимом высокого порядка был соответствующим образом усовершенствован с использованием алгоритма скручивания.

Для доказательства эффективности работы предлагаемого устройства слежения за Солнцем рассматривались различные значения температуры и мощности излучения, моделирующие переменные погодные условия.



а — ступенчатый закон излучения, б — фотоэлектрический выходной сигнал при солнечном излучении по ступенчатому закону; 1 — одноосный солнечный трекер, 2 двухосный солнечный трекер, 3 — двухосный солнечный трекер, управляемый контроллером со скручивающим следящим режимом высокого порядка

2.1. Ступенчатое изменение интенсивности солнечного излучения и температуры. Рассматривается модель солнечного излучения, в которой его интенсивность изменяется с $W = 1000 \text{ Br/m}^2$ до $W = 600 \text{ Br/m}^2$ при t = 0.3 с, а затем — с $W = 600 \text{ Br/m}^2$ до $W = 1000 \text{ Br/m}^2$ при t = 0.7 с (рис. 2, a). На рис. 2, б представлены результаты моделирования такого излучения, которые свидетельствуют о высокой эффективности отслеживания солнечного излучения двухосным солнечным трекером, управляемым контроллером со скользящим режимом высокого порядка на основе алгоритма скручивания. Двухосный трекер извлекает большее количество энергии, чем одноосный.

2.2. Пилообразное изменение интенсивности солнечного излучения и температуры. Закон изменения солнечного излучения показан на рис. 3, а. На рис. 3, б приведены результаты численного моделирования. Видно, что предлагаемый двухосный трекер извлекает большее количество энергии, чем одноосный. Использование двухосного солнечного трекера, управляемого контроллером со скользящим режимом высокого порядка на основе алгоритма скручивания, позволяет уменьшить вибрации.



1 ис. 5. Сигналы фотоэлектрической панели. a — пилообразное изменение солнечного излучения, δ — фотоэлектрический выходной сигнал при пилообразном изменении интенсивности солнечного излучения; остальные обозначения те же, что на рис. 2

2.3. Синусоидальное изменение интенсивности солнечного излучения и температуры. Для оценки эффективности работы предлагаемого двухосного трекера слежения за Солнцем использовалась также синусоидальная модель солнечного излучения (рис. 4,*a*). На рис. 4,*б* показаны результаты моделирования синусоидального закона излучения. Как и ожидалось, двухосная система слежения за Солнцем, управляемая контроллером со скользящим режимом высокого порядка на основе алгоритма скручивания, извлекает существенно большее количество солнечной энергии по сравнению с одноосным трекером. Также подтверждается, что использование контроллера со скользящим режимом позволяет устранить вибрации.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение. Создан и испытан прототип предлагаемой фотоэлектрической системы (рис. 5). Параметры системы имели следующие значения: максимальная мощность 150 Вт, напряжение при максимальной мощности 34,5 В, сила тока при максимальной мощности 4,35 А, напряжение на клеммах разомкнутой цепи 43,5 В, сила тока короткого замыкания 4,75 А, шунтовое сопротив-



Рис. 4. Сигналы фотоэлектрической панели:

a — синусоидальное изменение солнечного излучения, δ — фотоэлектрический выходной сигнал при синусоидальном изменении интенсивности солнечного излучения; остальные обозначения те же, что на рис. 2



Рис. 5. Фотоэлектрическая система с предложенным двухосным солнечным трекером



Рис. 6. Зависимости выходной мощности фотоэлектрических панелей от времени при использовании одноосного (1) и двухосного (2) солнечных трекеров, а также при использовании двухосного солнечного трекера, управляемого контроллером со скручивающим скользящим режимом высокого порядка (3)

ление 427,776 Ом, добавочное сопротивление 0,29116 Ом, температурный коэффициент максимальной мощности -0,38001 %/°C, температурный коэффициент напряжения холостого хода -0,110352 B/°C, температурный коэффициент тока короткого замыкания 0,08558 %/°C, номинальная температура фотоэлементов 25 °C, номинальная рабочая температура фотоэлементов 45 °C.

Для ориентирования фотоэлектрической панели используются два двигателя постоянного тока. Первый двигатель выполняет угловое вращение по часовой и против часовой стрелки, второй двигатель совершает возвратно-поступательное движение. Для точного отслеживания солнечного излучения используются светочувствительные резисторы, установленные на фотоэлектрических панелях. При поглощении солнечного излучения датчиками светочувствительных резисторов на фотоэлектрической панели генерируется необходимое напряжение, пропорциональное количеству солнечной энергии. Максимальное количество электрической энергии извлекается в том случае, если солнечные лучи перпендикулярны поверхности фотоэлектрической панели. При этом два датчика регистрируют одинаковое напряжение. Если датчики регистрируют различное напряжение, то фотоэлектрическая панель перемещается в сторону датчика с более высоким напряжением. При этом используются оба двигателя постоянного тока. Предлагаемый контроллер получает соответствующие сигналы от датчиков и вычисляет значения θ и Ω . Затем эти сигналы поступают в контроллер для расчета нормализованного сигнала для двух двигателей постоянного тока. В результате повышающий преобразователь обеспечивает точный и надежный рабочий цикл. Предлагаемая система тестировалась в различных условиях в течение нескольких дней.

Одноосный и двухосный датчики слежения за Солнцем извлекают существенно различающееся количество солнечной энергии. Было рассчитано среднее за неделю значение выходной мощности фотоэлектрической панели. Зависимости полезной извлекаемой мощности от времени приведены на рис. 6. При определении полезной энергии энергия, потребляемая двигателями постоянного тока, не учитывается, поскольку составляет 1 % извлекаемой энергии.

Предлагаемый двухосный трекер, управляемый контроллером со скользящим режимом высокого порядка с использованием алгоритма скручивания, обеспечивает точность отслеживания и плавность движения.

Заключение. Предложен новый двухосный солнечный трекер, управляемый контроллером со скользящим режимом высокого порядка с использованием алгоритма скручивания для точного отслеживания солнечного излучения. Фотоэлектрическая панель устанавливается перпендикулярно направлению излучения, что существенно повышает эффективность контроллера и обеспечивает точное отслеживание положения Солнца при различных значениях температуры и мощности излучения. Предложенный контроллер обеспечивает получение максимального количества электрической энергии, а также контролирует напряжение в соответствии с требованиями сети.

Установлено, что двухосный солнечный трекер, управляемый контроллером со скользящим режимом высокого порядка с использованием алгоритма скручивания, повышает точность отслеживания и обеспечивает плавность движения за счет уменьшения вибраций. Результаты численного моделирования подтверждены результатами тестирования созданного прототипа трекера.

ЛИТЕРАТУРА

- Bazyari S., Keypour R., Farhangi S., et al. A study on the effects of solar tracking systems on the performance of photovoltaic power plants // J. Power Energy Engng. 2014. V. 2, N 4. P. 718–728.
- Gad H. H., Haikal A. Y., Ali H. A. New design of the PV panel control system using FPGA-based MPSoC // Solar Energy. 2017. V. 146. P. 243–256.
- Hijawi H., Arafeh L. Design of dual axis solar tracker system based on fuzzy inference systems // Intern. J. Soft Comput., Artific. Intelligence Appl. 2016. V. 5, N 2/3. P. 23–35.
- Tripathi S., Shrivastava A., Jana K. C. Self-tuning fuzzy controller for sun-tracker system using Gray Wolf Optimization (GWO) technique // ISA Trans. 2020. V. 101. P. 50–59.
- Rawat A., Jha S. K., Kumar B. Position controlling of Sun Tracking System using optimization technique // Energy Rep. 2020. V. 6. P. 304–309.
- Carballo J. A., Bonilla J., Berenguel M., et al. New approach for solar tracking systems based on computer vision, low cost hardware and deep learning // Renewable Energy. 2019. V. 133. P. 1158–1166.
- Babaei S. M., Yahyazadeh M., Fatehi Marj H. Novel MPPT for linear-rotational suntracking system using fractional fuzzy grey-based sliding mode control // Iran. J. Sci. Technol., Trans. Electric. Engng. 2020. V. 44. P. 1379–1401.
- Rhif A., Vaidyanathan S. Sliding mode control design for a sensorless sun tracker // Applications of sliding mode control in science and engineering. Cham: Springer, 2017. P. 419–434. (Studies in Comput. Intelligence; V. 709).
- Tapia A., Efimov D., Bernal M., et al. A polytopic strategy for improved non-asymptotic robust control via implicit Lyapunov functions // Nonlinear Anal.: Hybrid Systems. 2021. V. 39. 100988.
- Sarkar M. K., Dev A., Asthana P., Narzary D. Chattering free robust adaptive integral higher order sliding mode control for load frequency problems in multi-area power systems // IET Control Theory Appl. 2018. V. 12, N 9. P. 1216–1227.

- Yorgancioglu F., Redif S. Fast nonsingular terminal decoupled sliding-mode control utilizing time-varying sliding surfaces // Turkish J. Electric. Engng Comput. Sci. 2019. V. 27, N 3. P. 1922–1937.
- Prieto P. J., Cazarez-Castro N. R., Aguilar L. T., Cardenas-Maciel S. L. Chattering existence and attenuation in fuzzy-based sliding mode control // Engng Appl. Artific. Intelligence. 2017. V. 61. P. 152–160.
- Shi Z., Deng C., Zhang S., et al. Hyperbolic tangent function-based finite-time sliding mode control for spacecraft rendezvous maneuver without chattering // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 60838–60849.

Поступила в редакцию 12/I 2022 г., после доработки — 17/VI 2022 г. Принята к публикации 27/VI 2022 г.