

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНЫЕ ГОРОДА

SOLAR CITIES

Статья поступила в редакцию 31.08.15. Ред. рег. № 2331

The article has entered in publishing office 31.08.15. Ed. reg. No. 2331

УДК 62-523.2

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
СЕРВОПРИВОДАМИ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ**

Е.В. Капля

Филиал НИУ «МЭИ» в г. Волжском
404110 г. Волжский, Волгоградская обл., пр. Ленина, д. 69
Тел.: (8443) 210160, e-mail: ev-kaple@yandex.ru

Заключение совета рецензентов: 03.09.15 Заключение совета экспертов: 06.09.15 Принято к публикации: 09.09.15

Получена новая формула, позволяющая вычислить оптимальную продолжительность поворота солнечного модуля. Установлена зависимость оптимальной по расходу энергии продолжительности поворота солнечного модуля от величины углового перемещения и параметров сервопривода. Увеличение углового перемещения приводит к увеличению оптимальной продолжительности поворота. Представлена новая структурная схема автоматизированного сервопривода модуля с блоком терминального управления. Для поворота солнечного модуля использован сервопривод с двигателем постоянного тока, червячной передачей и датчиком углового положения. Построены графики зависимости расхода энергии при терминальном управлении серводвигателем модуля от продолжительности поворота модуля. Оптимальная продолжительность поворота модуля соответствует минимуму энергетических затрат на процесс поворота.

Ключевые слова: солнечный модуль, солнечная электростанция, оптимальное потребление энергии, терминальное управление, оптимальная продолжительность, сервопривод, серводвигатель, двигатель постоянного тока.

ENERGY EFFICIENT TERMINAL CONTROL BY THE SOLAR SERVO MODULES

E.V. Kaplya

Volzhsky Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute»
69 Lenin str., Volzhsky, Volgograd reg., 404110, Russia
Tel.: (8443) 210160, e-mail: ev-kaple@yandex.ru

Referred: 03.09.15 Expertise: 06.09.15 Accepted: 09.09.15

The new formula that allows to compute the optimal duration of rotation of the solar module. The dependence of optimal consumption duration of rotation of the solar module on the magnitude of angular displacement and servo parameters. The increase in the angular displacement increases, the optimal duration of the rotation. Presents a new structural scheme of an automated servo module with the terminal control unit. To rotate the solar module used a servo with a DC motor, worm gear and a sensor of angular position. Plots of power consumption at terminal servo motor control module on the duration of rotation of the module. The optimal duration of rotation of the module corresponds to the minimum energy consumption for the turning process.

Keywords: solar module, solar power plant, optimal consumption energy, terminal control, fixed-time control, optimal termination time, optimal duration, servo-driver, servo motor, DC motor.



Егор Викторович
Капля
Egor V. Kaplya

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» ВФ МЭИ, ведущий научный сотрудник лаборатории диагностики и прогнозирования.

Образование: Волгоградский государственный технический университет (2000).

Область научных интересов: энергетика, автоматизация.

Публикации: 62.

Information about the author: candidate of physical and mathematical sciences, docent faculty «Automation of technological processes and productions» of the Volgzhky branch of Moscow power institute, leading researcher in laboratory of diagnostics and prediction of the Volgzhky branch of Moscow power institute.

Education: Volgograd State Technical University (2000).

Research area: power engineering, automation.

Publications: 62.

Введение

Современные солнечные электростанции (СЭС) – сложные автоматизированные объекты энергетики. Повышение энергоэффективности СЭС достигается совершенствованием фотоприемных устройств, использованием автоматических систем позиционирования и оптимизацией процессов управления системами позиционирования модулей [1-4]. Создание устойчивых, надежных и энергетически экономичных автоматизированных систем позиционирования солнечных модулей является перспективной задачей.

Автоматическое позиционирование фотоэлектрических модулей, гелиостатов и параболоцилиндрических концентраторов обычно осуществляют с помощью электродвигателей. В современных СЭС каждый модуль имеет индивидуальный сервопривод с контроллером (управляющим устройством).

Редуктор с червячной передачей позволяет исключить возможность прокручивания солнечного модуля под действием воздушного потока и собственного веса модуля. Для поворота солнечных модулей можно использовать сервопривод с двигателем постоянного тока (ДПТ), червячной передачей и датчиком углового положения. При угловом позиционировании солнечных модулей с помощью ДПТ целесообразно использовать систему терминального управления. Терминальное управление сервоприводом реализуется на конечном отрезке времени [5-7]. При заданных энергетических ресурсах исполнительных элементов системы минимально допустимое значение T продолжительности поворота солнечного модуля зависит от начальных и конечных условий. От продолжительности поворота зависят требуемые значения сил, осуществляющих движение, и количество затраченной энергии. Поиск аналитических выражений, позволяющих определить оптимальное значение T , – актуальная задача, которую целесообразно решить для оптимизации систем позиционирования.

Цели исследования:

1. Анализ зависимости энергии, затраченной сервоприводом на заданное угловое перемещение солнечного модуля, от продолжительности поворота модуля.

2. Формулировка выражения, определяющего оптимальную (по расходу электроэнергии) продолжительность поворота солнечного модуля.

Геометрия задачи поворота солнечного модуля

Поворот солнечного модуля вокруг горизонтальной и вертикальной осей (рис. 1) предполагает использование двух серводвигателей. Алгоритмы управления двигателями аналогичны, поэтому рассмотрим систему позиционирования фотоэлектрического модуля при повороте вокруг одной горизонтальной оси OX .

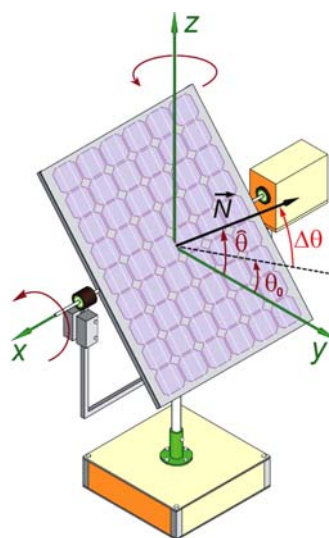


Рис. 1. Система позиционирования фотоэлектрического солнечного модуля
Fig. 1. The positioning system photovoltaic solar module

Начальное положение модуля характеризуется углом θ_0 между вектором нормали к поверхности модуля и горизонтальной плоскостью. Необходимо повернуть модуль на угол $\Delta\theta$ с минимальными затратами энергии и остановить его в положении с вектором нормали $\vec{N}$, направленным под углом $\hat{\theta}$ относительно горизонтальной плоскости (рис. 1).

Структурная схема сервопривода солнечного модуля

Структурная схема автоматизированного сервопривода с ДПТ и блоком терминального управления (БТУ) представлена на рис. 2.

На схеме использованы следующие обозначения: $\theta(t)$ – угол поворота солнечного модуля; $\alpha(t)$ – угол поворота якоря ДПТ; $\omega(t)$ – угловая скорость

вала ДПТ; $\psi(t)$ – угловая скорость солнечного модуля; $\xi(t)$ – угловое ускорение солнечного модуля; $\epsilon(t)$ – угловое ускорение вала ДПТ; $u(t)$ – управляющее напряжение; $i(t)$ – ток в цепи якоря ДПТ; L – индуктивность цепи якоря; R – активное сопротивление цепи якоря; $E(t) = k_\omega \omega(t)$ – противодействующая ЭДС якоря; k_ω – коэффициент противоЭДС, связывающий $E(t)$ с угловой скоростью; $M_{вр}(t) = k_m i(t)$ – вращающий момент, создаваемый ДПТ; k_m – коэффициент пропорциональности, связывающий ток в цепи якоря и развиваемый двигателем вращающий момент; $M_c(t)$ – момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя; J – суммарный осевой момент инерции якоря ДПТ, колес редуктора и солнечного модуля; n – передаточное число редуктора сервопривода.

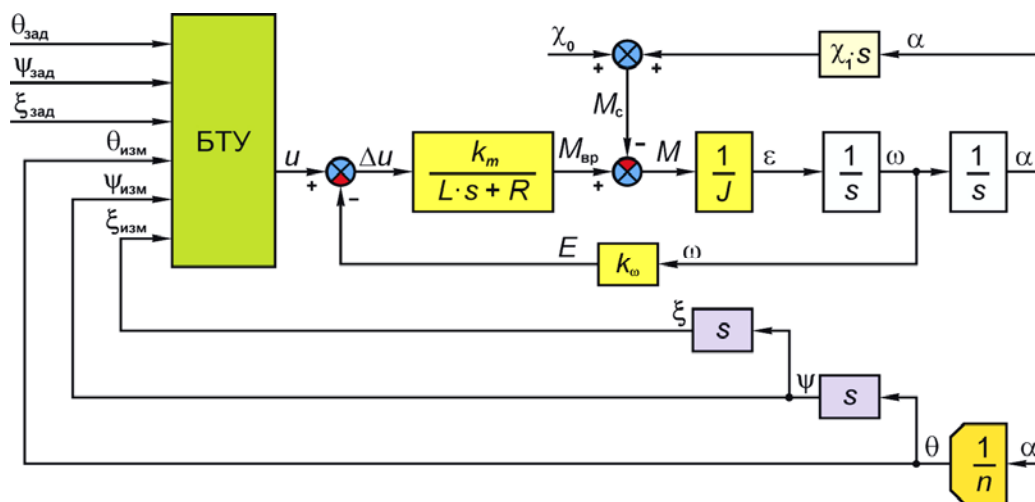


Рис. 2. Структурная схема автоматизированного сервопривода с блоком терминального управления
Fig. 2. The structural diagram of automated servomotor with the terminal control unit

Жесткая механическая связь вала двигателя и ведомого вала нагрузки посредством зубчатых колес редуктора позволяет связать фазовые координаты вала двигателя и вала модуля:

$$\theta(t) = \alpha(t)/n; \quad \psi(t) = \omega(t)/n; \quad \xi(t) = \epsilon(t)/n.$$

Измерение угла $\theta(t)$ ориентации солнечного модуля осуществляется с помощью энкодера (датчика углового положения). Мгновенная угловая скорость $\psi(t)$ и угловое ускорение $\xi(t)$ солнечного модуля вычисляются контроллером в результате дифференцирования функции $\theta(t)$ по времени. Численное дифференцирование по двум узлам может привести к некорректным результатам. Поэтому для вычисления производных целесообразно использовать многоузловую разностную схему, которая выполняет функцию сглаживающего фильтра низких частот для измеренных значений $\theta_{изм}(t)$.

На вход БТУ подаются заданные конечные значения фазовых координат вала солнечного модуля: $\theta_{зад}(T_0 + T) = \hat{\theta}$, $\psi_{зад}(T_0 + T) = \hat{\psi}$, $\xi_{зад}(T_0 + T) = \hat{\xi}$, где T_0 – момент времени начала поворота; T – продолжительность поворота. Модуль переводится из одного неподвижного состояния в другое неподвижное состояние, поэтому начальную и конечную угловую скорость солнечного модуля примем равными нулю: $\psi(T_0) = \hat{\psi} = 0$. Текущие значения фазовых координат сравниваются с заданными. БТУ вычисляет и формирует управляющий сигнал $u(t)$ на основе выбранного закона терминального управления.

Терминальное управление сервоприводом

Известный [5, 6] закон терминального управления при трех конечных условиях применительно к сервоприводу представим в следующем виде:

$$u(t, T) = \begin{cases} k_u n \left(\frac{12(\hat{\theta} - \theta(t))}{(\hat{T} - t)^2} - \frac{6(\hat{\psi} + \psi(t))}{\hat{T} - t} + \hat{\xi} \right) & (1) \\ \text{при } t \in [T_0; T_0 + T]; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где $\hat{T} = T_0 + T + \Delta T$ – момент времени окончания переходного процесса; ΔT – жесткость управления (временной интервал между ведущей и ведомой фазовыми точками); $\Delta T = T$; k_u – коэффициент пропорциональности между напряжением на обмотке ДПТ и угловым ускорением ротора; $k_u = JR / k_m$.

Математическая модель сервопривода постоянного тока

В основе известной [8] математической модели сервопривода постоянного тока – система дифференциальных уравнений:

$$J \frac{d^2 \alpha(t)}{dt^2} = k_m i(t) - M_c(t); \quad (2)$$

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u(t) - k_w \frac{d\alpha(t)}{dt}. \quad (3)$$

Момент сил сопротивления будем считать линейно зависящим от угловой скорости вращения ротора ДПТ:

$$M_c(t) = \begin{cases} \chi_1 \omega(t) + \chi_0, & \omega(t) > 0; \\ \chi_1 \omega(t) - \chi_0, & \omega(t) < 0; \\ M_{вр}(t), & \text{если } \omega(t) = 0 \wedge |M_{вр}(t)| \leq \chi_0; \\ \chi_0, & \omega(t) = 0 \wedge M_{вр}(t) > \chi_0; \\ -\chi_0, & \omega(t) = 0 \wedge M_{вр}(t) < -\chi_0, \end{cases} \quad (4)$$

где χ_0 – момент трогания ротора двигателя и механической нагрузки сервопривода, приведенный к валу двигателя; χ_1 – коэффициент сопротивления движению.

Уравнения (2)–(4) соответствуют структурной схеме на рис. 2.

Расход энергии при терминальном управлении

Основной энергетической характеристикой процесса управления сервоприводом является величина электрической энергии Q , затраченной на питание двигателя в процессе управления (от момента T_0 до момента $T_0 + T$ конца процесса управления).

Энергия, потребляемая якорем ДПТ от источника электрической энергии в процессе терминального управления сервоприводом, выражается интегралом

$$Q(T) = \int_{T_0}^{T_0+T} u(t, T) i(t, T) dt. \quad (5)$$

Ток в цепи якоря ДПТ представим решением (3) относительно $i(t, T)$ для $t \geq T_0$:

$$i(t, T) = \exp\left(-\frac{R}{L}(t - T_0)\right) \times \times \frac{1}{L} \int_{T_0}^t \exp\left(\frac{R}{L}(t' - T_0)\right) \left[u(t', T) - k_w \frac{d\alpha(t', T)}{dt'} \right] dt' + + \exp\left(-\frac{R}{L}(t - T_0)\right) i(T_0, T), \quad (6)$$

где $i(T_0, T)$ – ток в цепи якоря в момент времени T_0 . При пуске двигателя можно принять $i(T_0, T) = 0$, т.к. ток через индуктивный элемент не может измениться мгновенно.

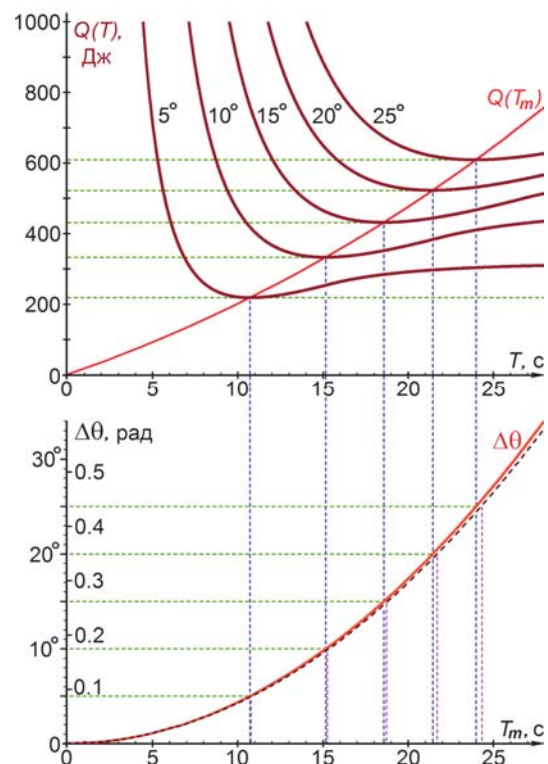


Рис. 3. Графики зависимостей $Q(T)$ и $T_m(\Delta\theta)$
Fig. 3. Dependency graphs $Q(T)$ and $T_m(\Delta\theta)$

Функция $Q(T)$ имеет минимум (рис. 3). Оптимальная продолжительность T_m поворота модуля соответствует минимуму целевой функции $Q(T)$: $Q(T_m) = \min_{0 < T < \infty} Q(T)$, где $Q(T_m)$ – минимальная энергия, которую необходимо затратить на питание двигателя в процессе поворота модуля.

Убывание функции $Q(T)$ в области $0 < T \leq T_m$ связано с уменьшением максимума напряжения

$\max_{T_0 \leq t \leq T_0 + T} |u(t, T)|$ при увеличении T . Возрастание функции $Q(T)$ при $T > T_m$ обусловлено ростом продолжительности простоя ротора и увеличением энергии, затраченной за время простоя [7]. Величина T_m зависит от заданных начальных и конечных условий, а также от характеристик сервопривода.

Оптимальная продолжительность поворота

В начале процесса терминального управления при $T = T_m$ управляющее напряжение примерно равно $|u(T_0, T_m)| \approx 2U_p$, где $U_p = R\chi_0/k_m$ – пусковое напряжение ДПТ. Полярность напряжения в момент пуска ДПТ определяется знаком углового перемещения: $\text{sign}[u(T_0, T)] = \text{sign}(\Delta\theta)$, где $\Delta\theta = \bar{\theta} - \theta(T_0)$, следовательно

$$\text{sign}(\Delta\theta) \cdot u(T_0, T_m) = 2U_p. \quad (7)$$

Уравнение (7) для $(\psi(T_0) = \bar{\psi} = 0) \cap (\xi = 0)$ с учетом (1) принимает вид

$$\text{sign}(\Delta\theta) \cdot k_u n \frac{6\Delta\theta}{(T_m + \Delta T)^2} = U_p. \quad (8)$$

Решив (8) относительно T_m , получаем формулу

$$T_m = \sqrt{6 \frac{k_u n}{U_p} |\Delta\theta|} - \Delta T = \sqrt{6 \frac{Jn}{\chi_0} |\Delta\theta|} - \Delta T. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет вычислить приближенное значение T_m оптимальной продолжительности поворота модуля для заданного угла поворота $\Delta\theta$, представленного в радианах. Увеличение углового перемещения приводит к увеличению оптимальной продолжительности процесса терминального управления.

Список литературы

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
2. Капля Е.В., Кузеванов В.С., Шевчук В.П. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
3. Camacho E.F., Berenguel M., Rubio F.R., Martínez D. Advances in industrial control: Control of solar energy systems. Springer-Verlag London Limited, 2012.

Результаты моделирования

Численные эксперименты проведены с моделью сервопривода, обладающего характеристиками: $L = 0,01$ Гн; $R = 2$ Ом; $k_m = 0,08$ Н·м/А; $k_\omega = 0,2$ В·с/рад; $J = 1,5$ кг·м²; $n = 10$; $\chi_1 = 0,1$ Н·м·с/рад; $\chi_0 = 0,2$ Н·м при следующих начальных и конечных условиях: $\psi(T_0) = \omega(T_0) = 0$; $\theta(T_0) = 20^\circ$; $\bar{\theta} = \theta(T_0) + \Delta\theta$; $\bar{\psi} = \bar{\omega} = 0$; $\bar{\xi} = \bar{\varepsilon} = 0$.

При моделировании были приняты: $t_0 = 0$; $T_0 = 1$ с; $\Delta T = 0,01$ с; $\Delta t = 10^{-3}$ с.

Угловое перемещение солнечного модуля варьровалось в диапазоне $0^\circ \leq \Delta\theta \leq 34^\circ$.

Графики зависимости энергии $Q(T)$, затраченной в процессе поворота, от продолжительности T поворота построены с помощью (1)–(6) при $\Delta\theta = 5, 10, 15, 20, 25^\circ$ и показаны на рис. 3.

В результате минимизации функции $Q(T)$ для $0^\circ \leq \Delta\theta \leq 34^\circ$ построен график зависимости $T_m(\Delta\theta)$, представленный в нижней части рис. 3 сплошной линией. Результаты расчета $T_m(\Delta\theta)$ по (9) представлены на рис. 3 наклонной пунктирной кривой. Близость сплошной и пунктирной расчетных кривых $T_m(\Delta\theta)$ подтверждает корректность расчета оптимальной продолжительности поворота модуля с помощью (9).

Заключение

Получена новая формула для расчета оптимальной (по расходу энергии) продолжительности поворота солнечного модуля: $T_m = \sqrt{6(Jn/\chi_0)|\Delta\theta|} - \Delta T$, где $\Delta\theta$ – заданное угловое перемещение солнечного модуля (в радианах); n – передаточное число редуктора сервопривода; J – суммарный осевой момент инерции вращающихся деталей сервопривода и солнечного модуля; χ_0 – момент трогания сервопривода; ΔT – жесткость управления. Предлагаемая формула позволяет вычислить оптимальную продолжительность T_m процесса поворота солнечного модуля из одного неподвижного состояния в другое.

References

1. Vissarionov V.I., Derûgina G.V., Kuznecova V.A., Malinin N.K. Solnečnaâ energetika. M.: Izdatel'skij dom MÊI, 2008.
2. Kaplâ E.V., Kuzevanov V.S., Ševčuk V.P. Modelirovanie processov upravleniâ v intellektual'nyh izmeritel'nyh sistemah. M.: FIZMATLIT, 2009.
3. Camacho E.F., Berenguel M., Rubio F.R., Martínez D. Advances in industrial control: Control of solar energy systems. Springer-Verlag London Limited, 2012.

4. Ochieng R.M. Solar collectors and panels, theory and applications. Croatia, Rijeka: Sciyo, 2010.
5. Батенко А.П. Системы терминального управления. М.: Радио и связь, 1984.
6. Батенко А.П. Управление конечным состоянием движущихся объектов. М.: Советское радио, 1977.
7. Капля Е.В. Энергоэффективное терминальное управление серводвигателем постоянного тока // Автоматизация процессов управления. 2015. № 1 (39). С. 27-33.
8. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Теория электропривода. Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2004.
4. Ochieng R.M. Solar collectors and panels, theory and applications. Croatia, Rijeka: Sciyo, 2010.
5. Batenko A.P. Sistemy terminal'nogo upravleniâ. M.: Radio i svâz', 1984.
6. Batenko A.P. Upravlenie konečnym sostoâniem dvižušihsâ ob"ektov. M.: Sovetskoe radio, 1977.
7. Kaplâ E.V. Ėnergoëffektivnoe terminal'noe upravlenie servodvigatel'm postoiânogo toka // Avtomatizaciâ processov upravleniâ. 2015. № 1 (39). S. 27-33.
8. Firago B.I., Pavlâčik L.B. Teoriâ èlektroprivoda. Minsk: ZAO «Tehnoperspektiva», 2004.

Транслитерация по ISO 9:1995

