

УДК 621.314

ДВУХКООРДИНАТНАЯ СИСТЕМА НАВЕДЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА СОЛНЦЕ

Аржанов Кирилл Владимирович,

аспирант кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании
Томского государственного университета систем управления и радиоэлек-
троники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 40. E-mail: rbhx@yandex.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых высокоэффективных систем наведения солнечных батарей на Солнце.

Цель работы: создание двухкоординатной системы наведения солнечных батарей на Солнце для фотоэлектрической электростанции, обеспечивающей заданную точность наведения и минимизацию энергетических затрат при наведении, с использованием в системе наведения вентильных двигателей.

Методы исследования основаны на общих положениях теории автоматического управления, теории электропривода, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем.

Результаты: в фотоэлектрической электростанции предложено использовать в системе наведения солнечной батареи на Солнце двухкоординатный электропривод, содержащий два вентильных двигателя серии ДБМ, микропроцессорную систему управления транзисторными преобразователями, адаптивный контур управления, построенный по принципу системы с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой с введением двух производных по заданию на вход регулятора тока электропривода. Для фотоэлектрической электростанции разработаны контроллер наведения на Солнце и блок датчиков положения Солнца, обеспечивающие наведение механической рамы с солнечной батареей на Солнце с точностью 1 градус. При перемещении по положению в электроприводе организован несимметричный режим позиционирования с ограничением скорости вращения, ускорения, торможения и рывка вентильного двигателя.

Ключевые слова:

Контроллер наведения на Солнце, вентильный двигатель, самонастраивающаяся система управления, режим позиционирования, датчик положения Солнца, автоматическое слежение за Солнцем.

В Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) ведется разработка двухкоординатной системы наведения солнечных батарей на Солнце для фотоэлектрической электростанции мощностью до 2 кВт. Целью работы является создание следяще-позиционного электропривода с вентильным двигателем, который обеспечивает заданную точность наведения солнечных батарей и минимизацию энергетических затрат при наведении. Предложено в системе наведения использовать вентильные двигатели серии ДБМ [1, 2]. Применение двигателей серии ДБМ обусловлено тем, что они могут эксплуатироваться в температурном диапазоне от -60 до $+85$ градусов, повышенного уровня влажности, вибраций и ударов, воздействия соляного тумана, плесневых грибов, дождя и имеют срок службы 50 тысяч часов в течение 20 лет.



Рис. 1. Эскиз фотоэлектрической электростанции

На рис. 1 приведен эскиз разрабатываемой фотоэлектрической электростанции. Конструкция состоит из следующих элементов: рама с восемью фотоэлектрическими батареями типа КСМ-200 [3];

подвижный каркас; неподвижный каркас; два редуктора; два вентильных двигателя; блок датчиков положения Солнца; четыре конечных выключателя.

Функциональная схема двухкоординатной системы наведения солнечных батарей на Солнце приведена на рис. 2.

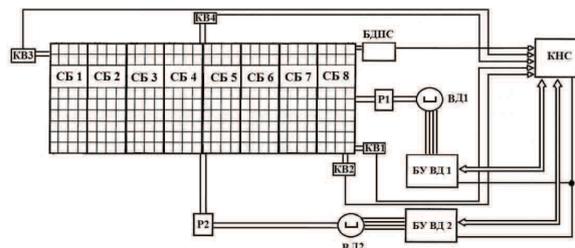


Рис. 2. Функциональная схема двухкоординатной системы наведения

На рис. 2 приняты следующие обозначения: СБ 1–СБ 8 – солнечные батареи; ВД1, ВД2 – вентильные двигатели; Р1, Р2 – редукторы; БУ ВД1, БУ ВД2 – блоки управления вентильными двигателями; БДПС – блок датчиков положения Солнца; КНС – контроллер наведения на Солнце; КВ1–КВ4 – конечные выключатели. В установке используются червячные редукторы и вентильные двигатели типа ДБМ 120-1,6-0,75-2. Блоки управления вентильным двигателем содержат: контроллер управления электроприводом, транзисторный преобразователь, драйвер датчика положения ротора.

На рис. 3 приведена функциональная схема электропривода для системы наведения с двумя

вентильными двигателями ДБМ 120 и двумя датчиками положения ротора ВТ60 [4]. На рис. 3 приняты следующие обозначения: ТП1, ТП2 – транзисторные преобразователи, ВД1, ВД2 – вентильные двигатели, ДПР1, ДПР2 – датчики положения ротора, КНС – контроллер наведения на Солнце, КУ ЭП1 и КУ ЭП2 – контроллеры управления электроприводами, ДТ1 – ДТ4 – датчики тока.

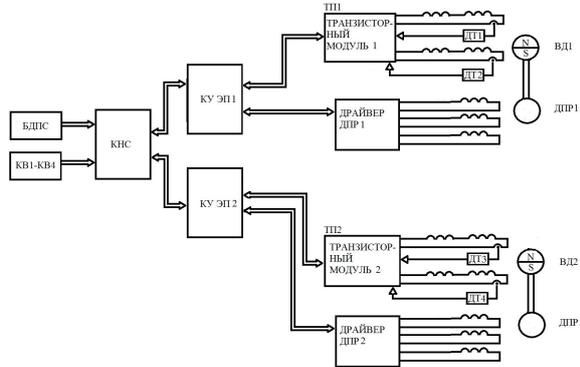


Рис. 3. Функциональная схема системы электропривода

Контроллер управления электроприводами КУ ЭП1 (КУ ЭП2) выполнен на микроконтроллере STM32F103 [5] и обеспечивает следующие режимы: прием и передачу команд с КНС; обработку сигнала с драйвера ДПР1 (ДПР2) и формирование сигналов синуса и косинуса угла поворота вала двигателя и сигнала по скорости вращения двигателя; передачу сигналов управления на транзисторный преобразователь для управления двухфазным вентильным двигателем; регулирование скорости вращения двигателя и адаптивное управление в контуре регулирования скорости вращения двигателя. Связь между контроллерами в системе управления электроприводом осуществляется по протоколу RS485. На рис. 4 показана структурная схема управления электроприводом с вентильными двигателями серии ДБМ 120 на одну координату. На рис. 4 приняты следующие обозначения: РС – регулятор скорости, ЭМ – эталонная модель, ДЗ1, ДЗ2, ДЗ3 – дифференцирующие звенья, НЗ 1, НЗ 2 – нелинейные звенья, МЗ1, МЗ2 – множительные звенья, РЭ1, РЭ2 – релейные элементы, ТП1.1, ТП1.2 – транзисторные преобразователи, ВС – вычислитель синуса угла поворота, ВК – вычислитель косинуса угла поворота, ВОС – вычислитель обратной связи по скорости, ДТ1, ДТ2 – датчики тока, В1, В2 – выпрямители, У1, У2 – первый и второй усилители, РУ1, РУ2 – регулирующие усилители.

Драйвер ДПР1 (ДПР2) формирует сигналы синуса (U_1) и косинуса (U_2) угла поворота, которые поступают в контроллер управления электропривода (КУ ЭП1 или КУ ЭП2). Вычисление скорости вращения двигателя осуществляется программным путем, с использованием сигналов синуса и косинуса угла поворота [6]. В контроллере управления электроприводом сигналы синуса (U_1) и косинуса (U_2) угла поворота умножаются на вы-

ходной сигнал регулятора скорости (U_{pc}) и получаемые сигналы поступают на входы транзисторного преобразователя ТП1.1 и ТП1.2. Транзисторный преобразователь состоит из двух однофазных инверторов с симметричной ШИМ модуляцией с полевыми транзисторами [7] и драйверами [8] и содержит управляющий микроконтроллер STM32F372VCT6. Микроконтроллер обеспечивает обработку заданного синусоидального и косинусоидального сигналов управления с высокой точностью. Частота коммутации транзисторов до 20 кГц. Токоограничение в транзисторном преобразователе выполнено на уровне шестикратного номинального тока двигателя. Защита по току с выключением транзисторного преобразователя осуществляется на уровне восьмикратного номинального тока двигателя.

Электропривод с вентильным двигателем ДБМ 120, с транзисторным преобразователем и контроллером управления электроприводом замкнут через ДПР. Контур тока с электромеханической частью при определенном допущении можно представить как звено второго порядка с переменными постоянными времени [9, 10]. Электромеханическая постоянная времени фазы двигателя ДБМ120-1,6-0,75-2 составляет 1,0 мс, а электромеханическая постоянная времени составляет 12,5 мс, то есть электромеханическая постоянная времени на порядок меньше, чем электромеханическая постоянная времени. В этом случае целесообразно для оптимизации контура регулирования скорости электропривода регулятор скорости выполнить как ПИ регулятор, компенсирующий электромеханическую постоянную времени. Передаточная функция регулятора скорости в этом случае имеет следующий вид (1):

$$W_{pc}(p) = \frac{(T_M p + 1) K_k}{T_M p}, \quad (1)$$

где K_k – коэффициент передачи регулятора; T_M – электромеханическая постоянная времени двигателя; p – оператор Лапласа.

Коэффициент передачи K_k в регуляторе скорости определяется по выражению (2):

$$K_k = \frac{T_M}{K_{дв} T_n K_{дс} K_{пр}}, \quad (2)$$

где $K_{дв}$ – коэффициент передачи двигателя; T_n – эквивалентная некомпенсированная постоянная времени; $K_{дс}$ – коэффициент передачи датчика скорости; $K_{пр}$ – коэффициент передачи преобразователя.

Эквивалентная некомпенсированная постоянная времени в электроприводе определяется по выражению (3):

$$T_n = T_3 + T_\phi + T_{ш}, \quad (3)$$

где T_ϕ – постоянная времени фильтров в прямом канале; $T_{ш}$ – постоянная времени, равная периоду ШИМ; T_3 – электромагнитная постоянная времени фазы вентильного двигателя.

В электроприводе точной компенсации электромеханической постоянной времени двигателя

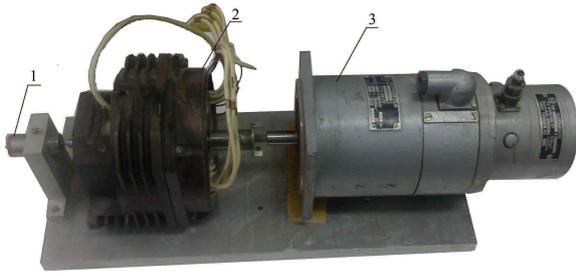


Рис. 5. Фотография электромеханического блока

Для обеспечения наведения солнечных батарей на Солнце разработан контроллер наведения на Солнце, состоящий из: микроконтроллера STM32F372VCT6, пяти операционных усилителей, обеспечивающих усиление сигналов с пяти фотоэлементов блока датчиков положения Солнца, узла связи с четырьмя конечными выключателями. КНС выдает и принимает следующие сигналы: сигналы задания амплитуды скорости перемещения для двух ВД; сигналы направления вращения по двум ВД; сигналы включения (выключения) двух транзисторных преобразователей ВД; сигналы готовности двух транзисторных преобразователей ВД; сигналы с четырех конечных выключателей.

Конструкция разработанного блока датчиков положения Солнца [17] показана на рис. 6.

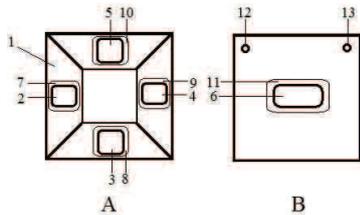


Рис. 6. Конструкция БДПС: А) вид сверху; В) вид снизу

На рис. 6 приняты следующие обозначения: 1 – усеченная пирамида; 2–6 – фотоэлементы; 7–11 – защитные стекла; 12, 13 – элементы крепления. Датчик выполнен в форме усеченной четырехгранной пирамиды с наклоном противоположных граней в 20 градусов. Пирамида изготовлена из дюралюминиевого сплава, в четырех гранях пирамиды и в основании выполнены посадочные места под пять фотоэлементов. Все фотоэлементы зафиксированы в посадочных местах и закрыты защитными стеклами. В основании пирамиды имеются элементы для крепления датчика к поворотной раме солнечной электростанции. Проведены экспериментальные исследования БДПС с целью определения его чувствительности в режиме малых перемещений. Перемещение (вращение) фотодатчика проводилось с помощью поворотного стола от фрезерного станка, имеющего разрешительную способность при перемещении 0,25 углового градуса. Максимальный ток одного фотоэлемента БДПС при максимальной солнечной освещенности достигает 100 мА. В таблице приведены результаты измерений выходного тока фотоэлемента одной гра-

ни БДПС при малых перемещениях, при малой освещенности.

Таблица. Ток фотоэлемента БДПС при перемещении на малый угол

φ , градус	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
I , мА	15,76	15,78	15,8	15,82	15,84	15,85	15,86	15,87	15,89

Из таблицы видно, что БДПС обладает чувствительностью менее 0,5 углового градуса. Максимальный диапазон измерения тока фотоэлемента БДПС контроллером наведения определяется по формуле:

$$D = \frac{I_{\max}}{\Delta I_{\min}}, \quad (7)$$

где ΔI_{\min} – минимальное значение в разнице тока фотоэлемента при перемещении на 1 градус; I_{\max} – максимальный ток фотоэлемента.

Расчет по формуле (7) (при использовании таблицы) показывает, что при перемещении с одного до полутора углового градуса (изменение тока составляет 10 мкА) максимальный диапазон измерения тока составляет 10000. В этом случае необходимая разрядность АЦП микроконтроллера блока наведения на Солнце составит 14 разрядов ($2^{14}=16384$), а с учетом возможности регулирования составит 16 разрядов. То есть целесообразно выбирать микроконтроллер с 16 разрядным встроенным АЦП.

Для уменьшения рывков и качаний при наведении рамы на Солнце в программном обеспечении КНС заложен несимметричный режим позиционирования, то есть торможение идет с пониженным ускорением и рывком по сравнению с разгоном [18]. На рис. 7 показана диаграмма режима позиционирования в электроприводе. В электроприводе обеспечивается максимальное быстродействие при перемещении во время микроцикла наведения. Это необходимо для минимизации затрат электрической энергии электроприводами при перемещении.

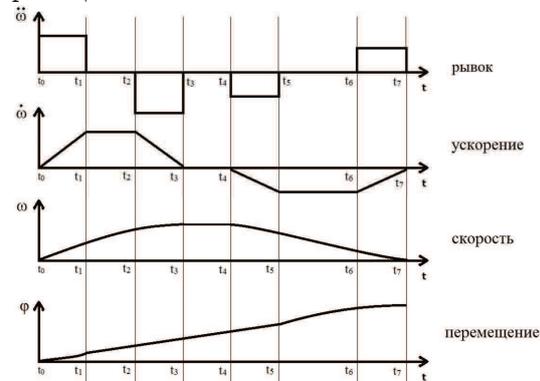


Рис. 7. Диаграмма режима позиционирования

На рис. 7 в интервале времени t_0-t_3 происходит разгон двигателя с максимальным ускорением и

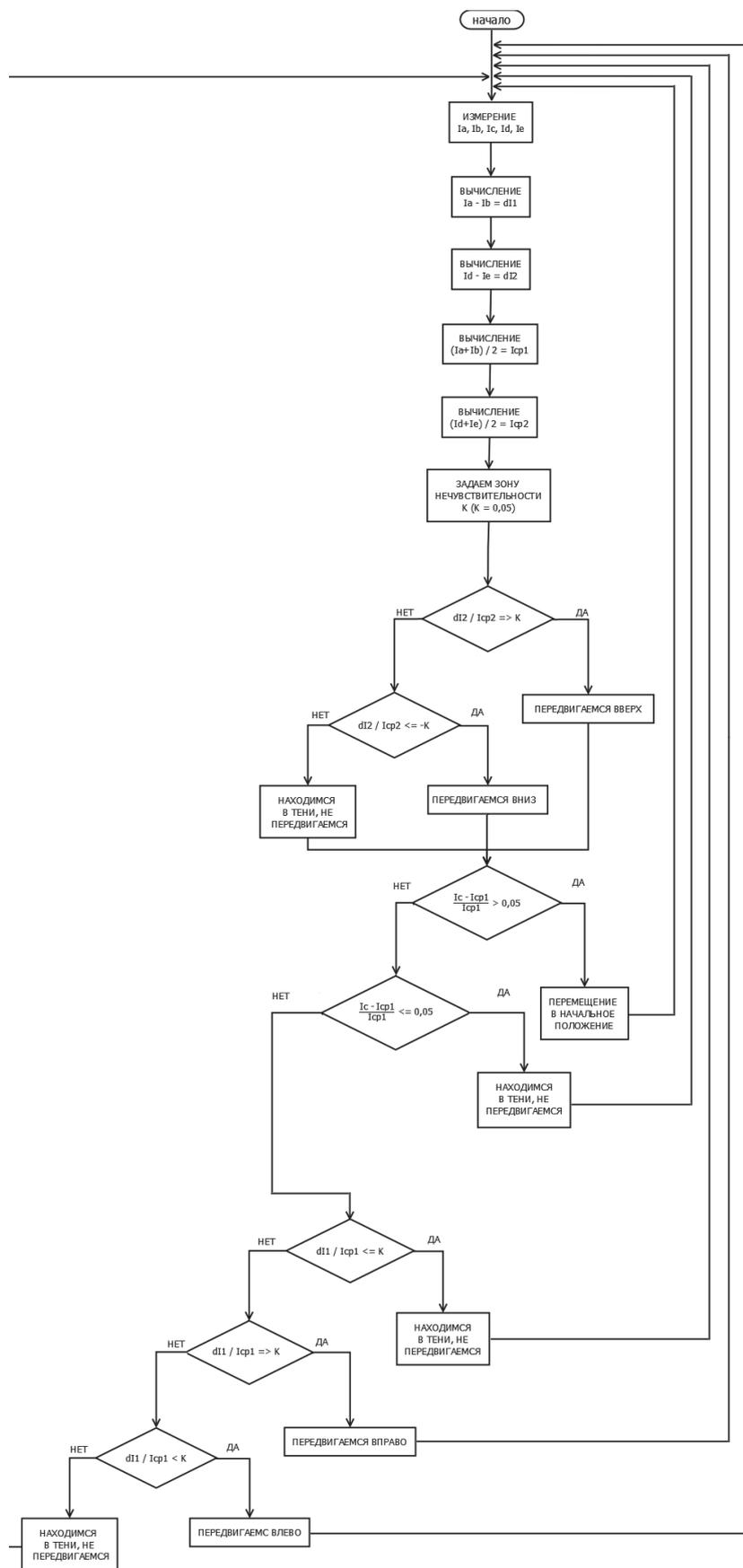


Рис. 8. Алгоритм наведения СБ на Солнце

рывком, в интервале t_4-t_7 происходит торможение.

Алгоритм наведения СБ на Солнце с использованием разработанного БДПС приведен на рис. 8. Сначала измеряются токи в пяти фотоэлементах датчика (I_a, I_b, I_c, I_d, I_e), далее определяется величина разницы в токе в противоположных гранях датчика ($dI_1=I_a-I_b$; $dI_2=I_d-I_e$) и находится относительная величина ошибки по току $\left(\frac{dI_2}{I_{cp2}}; \frac{dI_1}{I_{cp1}}\right)$.

Если относительная величина ошибки по току больше порогового значения (зоны нечувствительности K , которая может задаваться от 0,01...0,05), происходит одно из следующих действий: перемещение рамы влево или вправо, перемещение рамы вверх или вниз. Если относительная величина ошибки по току меньше порогового значения, то отсутствует перемещение.

Это означает что: либо рама с СБ точно направлена на Солнце, или рама с СБ находится в тени. Если величина тока в тыловой части датчика (I_c) больше среднего значения тока в гранях датчика по азимуту $\left(\frac{I_c - I_{cp1}}{I_{cp1}}\right)$ на 5 %, то это означает, что

Солнце светит с обратной стороны рамы. Это происходит на следующий день после восхода Солнца, при этом необходимо раму развернуть в начальное положение. При проведении испытаний двухкоординатной системы наведения в лабораторных условиях установлено, что если относительная величина ошибки меньше зоны нечувствительности на $K=0,05$, то обеспечивается точность наведения рамы на Солнце в 1 градус. При завершении цикла наведения (1 градус) необходимо выключать транзисторные преобразователи для исключения потребления энергии вентиляторами двигателями [19].

Разработанное программное обеспечение реализует следующие функции: автоматическое наведение

рамы с СБ на Солнце; ручное перемещение (от четырех кнопок) рамы с СБ по обеим координатам; возможность настройки в контроллере заданной скорости, ускорения и торможения в режиме позиционирования; возможность изменения частоты опроса БДПС и соответственно частоты дискретного перемещения при наведении (дискретное наведение солнечных батарей может проводиться через 1...10 мин); возможность изменения зоны нечувствительности (K) [20].

Выводы

1. В фотоэлектрической электростанции с выходной мощностью до 2 кВт предложено использовать в системе наведения СБ на Солнце двухкоординатный электропривод, содержащий два вентиляционных двигателя серии ДБМ, микропроцессорную систему управления транзисторными преобразователями, адаптивный контур управления, построенный по принципу системы с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой с введением двух производных по заданию на вход контура регулирования тока электропривода.
2. Для фотоэлектрической электростанции разработаны контроллер наведения на Солнце и блок датчиков положения Солнца, обеспечивающие наведение механической рамы с СБ на Солнце с точностью 1 градус. При перемещении механической рамы организован несимметричный режим позиционирования с ограничением скорости вращения, ускорения, торможения и рывка вентиляционного двигателя.
3. Испытанный экспериментальный образец двухкоординатной системы наведения подтвердил теоретические расчеты.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований и экспериментальных разработок)» 2385.2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОАО Машиноаппарат. URL: <http://mashap.maverick.ru/> (дата обращения: 15.01.2014).
2. Бельский Ю.М., Зеленков Г.С., Микеров А.Г. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. – Л.: Изд-во ЛДНТП, Ленинградское отделение, 1987. – 29 с.
3. НПП Квант. URL: <http://www.npp-kvant.ru> (дата обращения: 19.01.2014).
4. ОАО ВНИТИ МЭ. URL: <http://www.vniimem.com> (дата обращения: 16.01.2014).
5. Reference manual STM32F100xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. URL: http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00246267.pdf (дата обращения: 08.01.2014).
6. Микропроцессорное управление электроприводами с вентиляционными двигателями для движителей необитаемых подводных аппаратов / В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, В.А. Бейнарович, Ю.А. Шиняков, А.Е. Лапа, К.В. Аржанов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 199–204.
7. Infineon: Power Transistor SPW47N60C3 URL: http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60C3_Rev%5B1%5D.2.6_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42dff93492f (дата обращения: 07.01.2014).
8. PRODUCTS Power Management ics MOSFET Drivers Half Bridge. URL: <http://www.micrel.com/index.php/en/products/power-management-ics/mosfet-drivers/half-bridge.html> (дата обращения: 10.01.2014).
9. Микеров А.Г. Электромеханические датчики и электронные компоненты управляемых вентиляционных двигателей. – СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 1999. – 150 с.
10. Микеров А.Г. Торговые многофункциональные электроприводы малой мощности с бесконтактными синхронными электрическими машинами встраиваемого исполнения: дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 1992. – 300 с.
11. Удут С.Л. Синтез адаптивной системы управления электромеханическими преобразователями двухкоординатной поворотной платформы: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1996. – 200 с.

12. Справочник по теории автоматического управления // под ред. А.А.Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
13. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
14. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К. Комбинированные следящие системы. – Киев: Изд-во «Техника», 1978. – 264 с.
15. Самонастраивающаяся система регулирования скорости: пат. № 131508 U1 Рос. Федерация. № 2013111388; заявл. 13.03.13; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. – 2 с.
16. Самонастраивающаяся система регулирования скорости: А.с. 1462243 СССР; заявл. 28.09.1987; опубл. 28.02.1989, Бюл. № 8. – 4 с.
17. Датчик положения Солнца: пат. № 135126 U1 Рос. Федерация. № 2013117198; заявл. 15.04.13; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33. – 2 с.
18. Бейнарлович В.А. Электромеханические системы управления непрерывными технологическими процессами. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 1989. – 280 с.
19. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, А.В. Осипов, О.А. Теушаков, К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 133–138.
20. Аржанов К.В. Система наведения солнечных батарей на солнце // Силовая электроника и энергоэффективность: Матер. XIX Междунар. научно-техн. конф. – Украина, Алушта, 2013. – Т. 2. – С. 152–155.

Поступила 07.02.2014 г.

UDC 621.314

TWO-COORDINATE SYSTEM OF POINTING SOLAR BATTERIES TO THE SUN

Kirill V. Arzhanov,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin Avenue, 40. E-mail: rbhx@yandex.ru

Relevance of the work is caused by the need to develop new highly effective systems pointing solar batteries to the Sun.

Objective: development of two-coordinate guidance system of solar panels to the sun for photovoltaic power plants to provide the desired pointing accuracy and energy consumption minimization using a guidance system valve engines.

Research methods are based on the general theory of automatic control, electric theory, computational methods, and the use of modern instrumentation systems.

Results: The author has proposed to use in photovoltaic power station in the system of pointing solar battery to the Sun the two-axis actuator containing two valve engines of DBM series, microprocessor system of controlling transistor converters, adaptive control loop, constructed on the principle of the system with reference model and signal self-tuning with the introduction of two derivatives for setting electric drive current to a controller input. The author has developed for photovoltaic power station the controller of pointing to the Sun and a block of sensors of the Sun position provide guidance of mechanical frame with solar battery to the Sun with an accuracy of 1 degree. When position moving in the electric drive the asymmetric positioning mode with limited rotation speed, acceleration, deceleration and jerk valve engine is arranged.

Key words:

Controller of pointing to the Sun, brushless motor, self-adjusting control system, positioning mode, sensor of the Sun position, the Sun automatic tracking.

REFERENCES

1. OAO Mashinoapparat [Machine apparatus]. Available at: <http://mashap.maverick.ru/> (accessed 15 February 2014).
2. Belenkiy Yu.M., Zelenkov G.S., Mikerov A.G. *Opyt razrabotki i primeneniya beskontaktnykh momentnykh privodov* [Experience in development and application of contactless torque drives]. Leningrad, LDNTP, Leningrad Branch, 1987. 29 p.
3. NPP Kvant [Quantum]. Available at: <http://www.npp-kvant.ru> (accessed 19 January 2014).
4. OAO VNITI ME [VNITI ME]. Available at: <http://www.vnii-mem.com> (accessed 16 January 2014).
5. Reference manual STM32F100xx advanced ARM-based 32-bit MCUs. Available at: http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/reference_manual/CD00246267.pdf (accessed 8 January 2014).
6. Arzhanov V.V., Shurygin Yu.A., Beynarovich V.A., Shinyakov Yu.A., Lapa A.E., Arzhanov K.V. Mikroprotsessornoe upravlenie elektroprivodami s ventilnymi dvigatelyami dlya dvizhiteley neobitaemykh podvodnykh apparatov [Microprocessor control with electric motors for propulsion unmanned underwater vehicles]. Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 2012, no. 2 (26), P. 1, pp. 199–204.
7. Infineon: Power Transistor SPW47N60C3 Available at: http://www.infineon.com/dgdl/SPW47N60C3_Rev%5B1%5D.2.6_PCN.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42df93492f (accessed 7 January 2014).
8. PRODUCTS Power Management ics MOSFET Drivers Half Bridge. Available at: <http://www.micrel.com/index.php/en/products/power-management-ics/mosfet-drivers/half-bridge.html> (accessed 10 January 2014).
9. Mikerov A.G. *Elektromekhanicheskie datchiki i elektronnye komponenty upravlyaemykh ventilnykh dvigateley* [Electromechanical sensors and electronic components of controlled valve motors]. St. Petersburg, LETI Publ., 1999. 150 p.
10. Mikerov A.G. *Bortovye mnogofunktsionalnye elektroprivody maloy moshchnosti s beskontaktnymi sinkhronnymi elektricheskimi mashinami vstravaemogo ispolneniya* [Onboard electric multifunction low power contactless synchronous electrical machines embedded performance. Dr. Diss.] St. Petersburg, 1992. 300 p.

11. Udut S.L. *Sintez adaptivnoy sistemy upravleniya elektromekhanicheskimi preobrazovatelyami dukhkoordinatnoy povorotnoy platform. Dis. kand. tehn. nauk* [Synthesis of an adaptive control system of electromechanical transducers of two-coordinate turntable. Cand. Diss.]. Tomsk, 1996. 200 p.
12. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Handbook on automatic control theory]. Ed. by Krasovsky A.A. Moscow, Nauka Publ., 1987. 712 p.
13. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskiy G.G. *Upravlenie elektropriivodami* [Control of electrical drives]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 392 p.
14. Zaytsev G.F., Steklov V.K. *Kombinirovannye sledyashchie sistemy* [Combined tracking systems]. Kiev, Tekhnika, 1978. 264 p.
15. Arzhanov V.V., Arzhanov K.V., Arzhanova A.V. *Samonastraivayushchiyasya sistema regulirovaniya skorosti* [Adaptive speed regulation system]. Patent RF, no. 2013111388, 2013.
16. Arzhanov V.V., Filipas A.A. *Samonastraivayushchiyasya sistema regulirovaniya skorosti* [Adaptive speed regulation system]. Patent USSR, no. 1462243, 1989.
17. Arzhanov K.V. *Datchik polozheniya Solntsa* [Sun position sensor]. Patent RF, no. 2013117198, 2013.
18. Beynarovich V.A. *Elektromekhanicheskie sistemy upravleniya nepreryvnymi tekhnologicheskimi protsessami* [Electromechanical systems for continuous process]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 1989. 280 p.
19. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arzhanov V.V., Osipov A.V., Teushchakov O.A., Arzhanov K.V. *Avtonomnaya fotoelektricheskaya energeticheskaya ustanovka* [Autonomous photovoltaic power plant]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 4, pp. 133–138.
20. Arzhanov K.V. *Sistema navedeniya solnechnykh batarey na solntse* [The guidance system of solar panels to the sun]. *Materialy XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Silovaya elektronika i energoeffektivnost»* [Proc. XIX International scientific conference. Power Electronics and Energy Efficiency]. Ukraine, Alushta, 2013. pp. 151–155.