

вышеуказанных величин  $P_1/M(\Psi_r=f(M_{\text{нагр}}))$  имеет линейный характер (рис. 7). Заштрихованная область на рис. 7 показывает потери энергии, которые можно исключить, используя способ адаптивного формирования потокосцепления в функции от момента нагрузки и тем самым повысить КПД безредукторного электропривода лифтовой лебедки.

#### Заключение

1. Применение адаптивного способа формирования потокосцепления тихоходного асинхрон-

ного двигателя позволяет исключить рывки момента и уменьшить колебания скорости кабины, что положительно сказывается на комфортабельности движения лифтовой лебедки.

2. Способ адаптивного формирования потокосцепления тихоходного асинхронного двигателя обеспечивает энергосберегающий режим, уменьшающий энергопотребление электропривода во время работы лифтовой лебедки.

*Статья подготовлена по результатам работ в рамках Госзадания 7.2826.2011.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тургенев Д.В., Дементьев Ю.Н., Ланграф С.В. Особенности механики лифтов с безредукторным приводом лебедки // Электромеханические преобразователи энергии 2009: Сборник трудов Междунар. научно-техн. конф. — Томск: Изд-во ТПУ, 2009. — С. 236–240.
2. Тургенев Д.В. Анализ трехмассовой механической системы для безредукторного привода лифтовой лебедки // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2012. — № 1 (25). — С. 59–63.
3. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором

Калмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, Л.Е. Козлова // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 317. — № 4. — С. 120–123.

4. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. — Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина, 2008. — 298 с.
5. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. 3-е изд., перераб. — М.: Энергоиздат, 1982. — 216 с.

*Поступила 20.01.2013 г.*

УДК 621.34

## МИНИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ В ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, К.В. Аржанов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: otdef11@tomsk.yandex.ru

*Приведены результаты проектирования автоматической системы наведения на Солнце фотоэлектрической энергетической установки с минимизацией энергопотребления электроприводами при наведении.*

#### Ключевые слова:

Фотоэлектрическая энергетическая установка, солнечная батарея, микроконтроллер, минимизация энергопотребления, автоматическое слежение за Солнцем.

#### Key words:

Photovoltaic power plant, solar battery, microcontroller, minimization of power consumption, automatic tracking of the sun.

В Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) разработана фотоэлектрическая энергетическая установка (ФЭУ) с автоматическим слежением солнечных батарей за Солнцем. Реализация автоматического слежения за Солнцем позволяет повысить энергетическую эффективность ФЭУ не менее чем на 30 % [1]. При этом в режиме наведения солнечных батарей на Солнце проведена минимизация потребления электрической энергии электроприводами. На рис. 1 приведена фотография разработанной в ТУСУРе ФЭУ. Блочная схема ФЭУ приведена на рис. 2, где М1, М2 — шаговые

двигатели; ДШД1, ДШД2 — драйверы шаговых двигателей; КНС — контроллер наведения на Солнце; СБ — солнечная батарея; БДПС — блок датчиков положения Солнца; БКВ X, БКВ Y — блоки конечных выключателей, Р1, Р2 — редукторы; КЗАБ — контроллер заряда аккумуляторной батареи; И — инвертор; АБ1, АБ2 — аккумуляторные батареи.

В ФЭУ используется: две солнечные батареи типа КСМ-190, инвертор с синусоидальным выходом типа TS 1000-224, два последовательно соединенных аккумулятора типа TUDOR T12V 155FT, два шаговых двигателя типа ШД-5Д, два драйвера ша-

гового двигателя типа DM-378M. Используется контроллер заряда аккумуляторной батареи, имеющий функцию экстремального регулирования мощности солнечных батарей [2].



Рис. 1. Фотография ФЭУ

Система наведения состоит из: контроллера наведения на Солнце, блока датчиков положения Солнца, двух шаговых двигателей (ШД), двух редукторов, двух драйверов шагового двигателя и двух блоков конечных выключателей. В ФЭУ используются червячные редукторы с передаточными отношениями  $i=1:500$  (по углу места) и  $i=1:250$  (по азимуту). Блочная схема контроллера наведения на Солнце показана на рис. 3. Контроллер наведения на Солнце состоит из: микроконтроллера STM 32 F103, преобразователя напряжения, узла связи с USB шиной внешнего компьютера, шести операционных усилителей, обеспечивающих усиление сигналов с шести фотоэлементов блока датчиков слежения за Солнцем, узла связи с 2 блоками конечных выключателей. Предельные перемещения в ФЭУ возможны по азимуту на  $270^\circ$ , а по углу места – на  $90^\circ$ .

КНС выдает и принимает следующие сигналы с драйверов шагового двигателя: сигналы включения

(выключения) двух драйверов ШД (MF1 и MF2); сигналы готовности двух драйверов ШД (RDY1 и RDY2); число шагов, которое необходимо отработать ШД (CP1 и CP2); сигналы направления вращения ШД (DR1 и DR2). В драйвере задание амплитуды тока ШД и величина минимального шага перемещения для двигателя задается через канал RS 485 по протоколу MOD BUS от микроконтроллера STM F32 103. Обмотки шагового двигателя ШД-5Д соединяются в треугольник при работе с драйвером DM-378M. Задаваемый в драйвере минимальный шаг перемещения в ШД составляет  $0,01^\circ$ , а максимальный задаваемый ток – до 7А.

Блок датчиков положения Солнца состоит из двух одинаковых датчиков [3], установленных на одном основании. Каждый датчик состоит из трех фотоэлементов, два из которых стоят наклонно друг к другу, а третий соединяет их снизу. При этом их называют: правый, левый и тыловой. Измеряемые токи у фотоэлементов датчиков следующие:  $I_A$ ,  $I_D$  и  $I_B$ ,  $I_E$  – токи в правой и левой части фотоэлементов датчиков положения Солнца;  $I_C$ ,  $I_F$  – токи в тыловой части фотоэлементов датчиков положения Солнца. Реализованный алгоритм наведения на Солнце приведен на рис. 4 (для упрощения алгоритм наведения показан на одну координату). Сначала измеряются токи во всех частях фотоэлементов датчиков, далее определяется величина ошибки по току между правой и левой частями датчика, находится относительная величина этой ошибки. Если относительная величина ошибки больше порогового значения (зоны нечувствительности  $K$ , которая может задаваться от 0,01–0,1), то происходит следующее действие: перемещение влево или перемещение вправо, или перемещение всей рамы с СБ в начальное положение, или отсутствие перемещения. При проведении испытаний в лабораторных условиях установлено, что если относительная величина ошибки меньше зоны нечувствительности  $K=0,05$ , то ошибка наведения на Солнце ФЭУ не более 1 градуса. В режиме, когда тыловой фотодатчик выдает ток ( $I_C$ ) больший, чем токи в наклонных плоскостях ( $I_A$ ,  $I_B$ ), необхо-

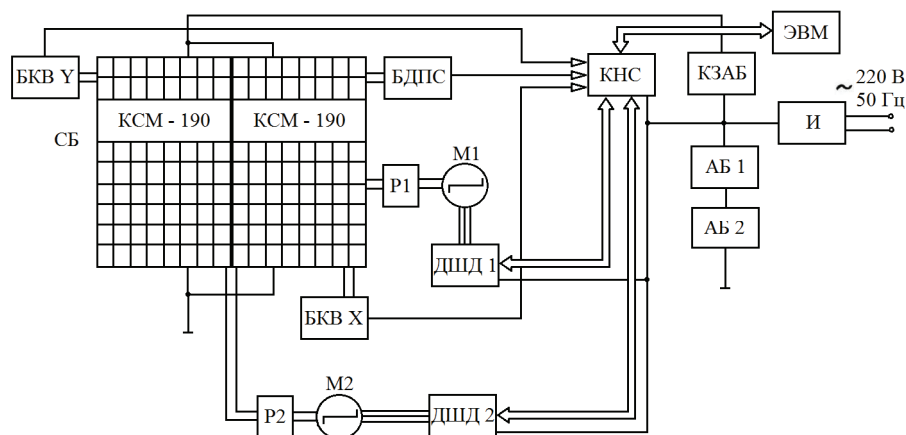


Рис. 2. Блочная схема ФЭУ

димо развернуть ФЭУ в начальное положение, так как Солнце светит с обратной стороны.

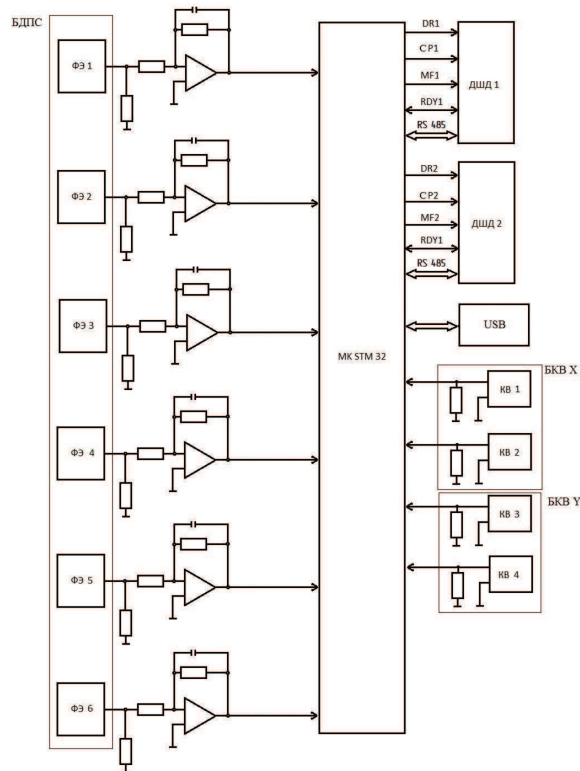


Рис. 3. Блочная схема контроллера наведения на Солнце

Определена необходимая точность наведения ФЭУ на Солнце для обеспечения минимальных потерь энергии вырабатываемой СБ. В таблице приведены потери энергии СБ при различной точности наведения её на Солнце.

Таблица. Потери энергии от СБ при различной точности наведения

Ошибка при наведении СБ на Солнце, градус	0,5	1	2	3	4	5
Потери энергии от СБ при наведении, %	0,0076	0,03	0,12	0,27	0,48	0,76

Из таблицы видно, что для сокращения потерь от СБ при наведении уменьшать ошибку наведения СБ на Солнце менее одного градуса нет необходимости.

При непрерывном автоматическом сопровождении СБ за Солнцем ШД всегда находится под номинальным током и в этом режиме получается большое потребление тока ШД. Поэтому целесообразно реализовать наведение СБ на Солнце как непрерывно-дискретное, то есть делать перемещение на два-пять градусов и далее выполнить останковку в перемещении. При этом выполняется микроцикл наведения в системе необходимо осуществить выключение драйверов ШД, чтобы исключить потребление электрической энергии ШД. Следующее перемещение (наведение) СБ, например на три

градуса, в ФЭУ будет происходить через 10–20 минут.

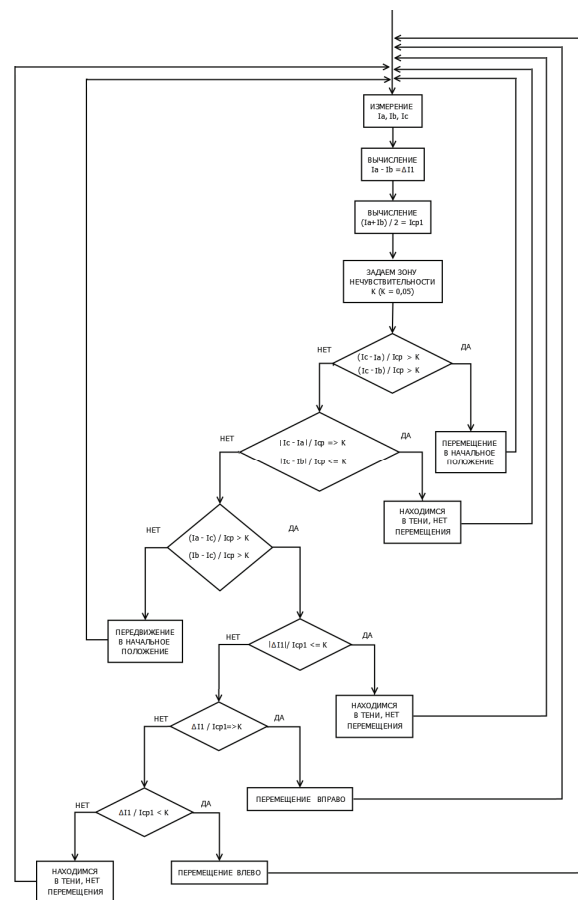


Рис. 4. Алгоритм наведения на Солнце по азимуту

Для уменьшения рывков и качаний при перемещении рамы с СБ в программном обеспечении контроллера заложен режим позиционирования, то есть в электроприводе идет ограничение по скорости и ускорению при перемещении рамы с СБ от одного положения к другому. При этом реализован несимметричный специальный режим разгона, движения и торможения. На рис. 5 показана диаграмма режима позиционирования в электроприводе. Несимметричный режим позиционирования совмещен с нелинейным заданием амплитуды тока ШД, то есть амплитуда тока ШД меняется во время движения. Это необходимо делать для минимизации потребляемого тока ШД. При пуске ШД с механизмом необходимо преодолеть нелинейный момент сухого трения. В этом режиме целесообразно увеличить амплитуду тока ШД (пусковой ток увеличить до 1,5 от номинального тока), после преодоления начального момента сухого трения можно снизить амплитуду тока ШД (рабочий ток уменьшить до 0,75 от номинального тока). Это позволяет исключить сбой при пуске ШД и в целом уменьшить потребление тока двигателем во время микроцикла наведения. Увеличенный пусковой ток в ШД целесообразно формировать в режиме позиционирования при положительном значении ускорения (рис. 5).

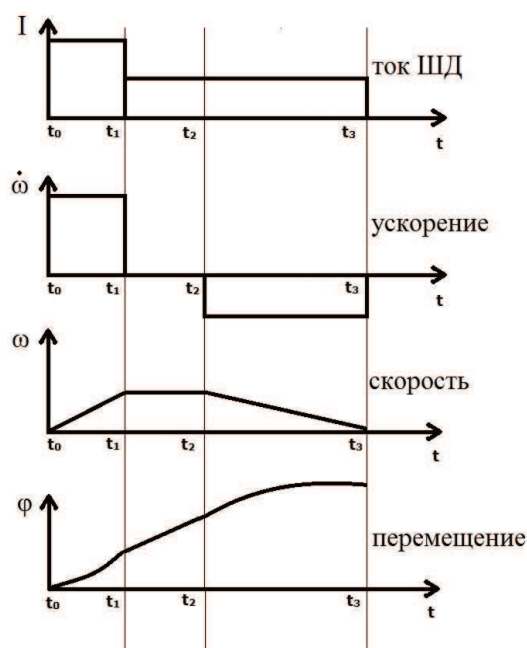


Рис. 5. Диаграмма режима позиционирования

Разработано специальное программное обеспечение для контроллера наведения, которое реализует проведение исследований энергетических характеристик (энергопотребление) шаговых электроприводов (программа STEP). Рабочее окно показано на рис. 6. При проведении экспериментальных исследований в программе можно задавать следующие параметры: величину максимальной скорости вращения двигателя, величину ограничения по ускорению и торможению, величину заданного перемещения, величину амплитуды пускового и рабочего тока ШД. Измерение потребляемой электрической энергии электроприводами при наведении ФЭУ на Солнце проводилось прибором НЮКИ 3332.

Полученные результаты экспериментальных исследований шаговых электроприводов системы автоматического слежения СБ за Солнцем показали следующее:

- наведение ФЭУ на Солнце целесообразно проводить дискретно на 3 градуса как по азимуту, так и по углу места, исходя из требований обеспечения точности наведения на Солнце и минимального потребления электрической энергии ШД;
- при перемещении рамы с СБ необходимо организовывать режим позиционирования с ограничением скорости вращения двигателя на уровне 300 об/мин и с ограничением по ускорению на уровне 4000 шаг/сек<sup>2</sup> и торможению на уровне 2000 шаг/сек<sup>2</sup>;
- пусковой ток в двигателе ШД-5Д по углу места задавать на уровне 4,5А, а рабочий ток – 3А, пусковой ток в ШД-5Д по азимуту задавать на уровне 4А, а рабочий ток – 3А;
- экспериментально измеренная суммарная суточная потребляемая энергия электропривода-

ми при перемещении рамы с солнечной батареей по азимуту на 180 градусов и по углу места на 70 градусов и возвращение рамы в начальное положение составляет не более 2,1 Вт·ч.

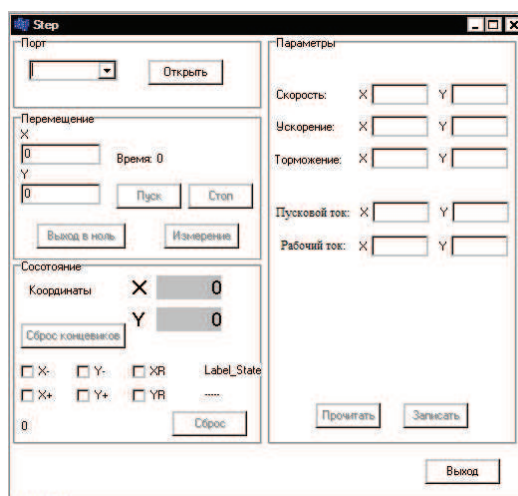


Рис. 6. Рабочее окно программы STEP

Разработано основное программное обеспечение для контроллера наведения на Солнце (программа KNS), реализующее автономную работу ФЭУ. В контроллере реализованы два режима работы: ручное и автоматическое управление. На рис. 7 показано рабочее окно программы KNS.

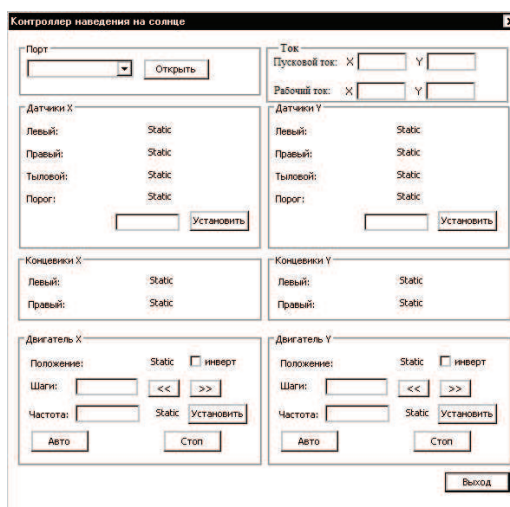


Рис. 7. Рабочее окно программы KNS

Данная программа обеспечивает:

- автоматическое наведение ФЭУ на Солнце;
- ручное перемещение ФЭУ по азимуту и по углу места от четырех кнопок, расположенных на корпусе контроллера наведения;
- управление от компьютера по USB шине, при этом обеспечивается как ручное перемещение ФЭУ, так и автоматическое наведением на Солнце с контролем параметров перемещения;
- возможность настройки в КНС заданной скорости, ускорения, торможения и токов в ШД в режиме позиционирования при наведении на Солнце;

- возможность изменения частоты опроса БДПС и соответственно частоты дискретного перемещения при наведении (дискретное наведение ФЭУ может проводиться через 1–20 минут);
  - возможность изменения порога срабатывания (порога зоны нечувствительности) при расчете разницы токов в фотоэлементах БДПС.
- Изготовленная в ТУСУРе ФЭУ установлена на крыше одного из учебных корпусов.

#### Выводы

1. Разработана система непрерывно-дискретного наведения ФЭУ на Солнце, содержащая блок датчиков положения Солнца, контроллер наведения на Солнце, два специальных драйвера шагового двигателя, два шаговых двигателя и два блока конечных выключателей.
2. Для минимизации энергопотребления шаговыми электроприводами при непрерывно-дискретном наведении ФЭУ предложено следующее:

- осуществлять непрерывно-дискретное наведение микроциклом через три градуса как по азимуту, так и по углу места;
  - реализовать в режиме микроцикла наведения несимметричный специальный режим позиционирования, при котором обеспечивается увеличение до полуторного от номинального значения амплитуды импульса тока шагового двигателя в момент действия положительного ускорения и уменьшение до 0,75 от номинального значения амплитуды импульса тока шагового двигателя в остальное время режима позиционирования;
  - осуществлять выключение драйверов шаговых двигателей после микроцикла наведения ФЭУ на Солнце.
3. Проведены экспериментальные исследования на ФЭУ, подтвердившие теоретические предложения.

*Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Осипов А.В., Теушаков О.А., Аржанов К.В. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24). – Ч. 1. – С. 282–287.
2. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Осипов А.В., Теушаков О.А., Аржанов К.В. Автономная фотоэлектрическая

- энергетическая установка // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 133–138.
3. Солнечная установка: пат. 2459156 Рос. Федерация. № 2010150042/06; заявл. 06.12.10; опубл. 20.08.12, Бюл. № 23. – 7 с; ил.

*Поступила 31.01.2013 г.*