

$$A_{T2}^{\text{изм}}(x_i, \tau_0) - \Omega_{\max} \rho \left( x_i, \tau_0, a, \frac{\lambda}{\alpha} \right) = 0,$$

$$i = 1, 2.$$

Также возможно, решить аналогичную систему по измеренным амплитудам на одном расстоянии от края образца при двух значениях периода колебаний  $\tau_0$ .

## Литература

1. Любимова, Д. А. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом регулярного режима третьего рода / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин ; под науч. ред. С. В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 80 с.
2. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. – М.: Высшая. школа, 1964. – 492 с.

УДК 681.2-5

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАНОВКИ РОТОРА ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Богдан П.С.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В данной работе приведены и проанализированные экспериментальные данные, полученные с пьезоэлектрического преобразователя, закрепленного на шаговом электродвигателе. Показано, что применение такого преобразователя позволяет определить остановку ротора двигателя.

**Ключевые слова:** шаговый двигатель, пропуск шагов, пьезоэлектрический преобразователь.

## STEP MOTOR STOP DETERMINATION USING A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

Bohdan P.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** This paper presents and analyzed experimental data obtained from a piezoelectric transducer mounted on a stepper motor. It is shown that the use of such a converter makes it possible to determine the stop of the motor rotor.

**Key words:** stepper motor, step skip, piezoelectric transducer.

*Адрес для переписки: Богдан П.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: pbogdan@bntu.by*

Шаговые электродвигатели применяются в приводах, обеспечивающих точное позиционирование рабочего органа. Достоинством шаговых электродвигателей в таком применении по сравнению с остальными типами (двигатели постоянного тока, асинхронные и т.п.) является принцип их работы, заключающийся во вращении ротора путем выполнения дискретных угловых перемещений (шагов) с определенным углом. Это позволяет приводам с шаговыми двигателями обходиться без датчиков, обеспечивающих обратную связь по положению рабочего органа. Логика работы таких приводов основывается на предположении, что количество отданных двигателю драйвером «команд» на выполнение шага равняется количеству шагов, действительно выполненных двигателем. Величина перемещения рабочего органа определяется по известному шагу двигателя, типу используемых механических передач и их передаточным отношениям. Однако по количеству выполненных шагов можно только определять перемещение рабочего органа относительно предыдущего положения, поэтому в таких приводах все же используется один датчик конечного положения. В начале работы рабочий орган доводится до этого положения и система управления принимает его за нулевую

точку, относительно которой рассчитывается дальнейшее перемещение.

Такой принцип построения приводов избавляет от множества проблем, связанных с наличием системы определения положения: отсутствует необходимость в датчике углового или линейного перемещения, сложность и стоимость которых пропорционально (а иногда и не очень) увеличивается с увеличением точности или диапазона измерения; отсутствует необходимость в схеме обработки сигнала с датчика; отсутствует необходимость в схеме автоматического регулирования (и, соответственно, в наладке такой схемы), которая должна корректировать положение рабочего органа по информации с датчика.

Отсутствие обратной связи является и недостатком привод с шаговыми двигателями. При превышении моментом нагрузки крутящего момента двигателя, ротор перестает выполнять шаги, останавливаясь на месте. В зависимости от характера и причины возникновения дополнительной нагрузки, ротор может продолжить вращение, пропустив несколько шагов, или полностью остановиться. В обоих случаях количество «команд», отданных на выполнение шаг будет отличаться от количества реально выполненных

двигателем шагов, что приведет к потере управляющей схемой информации о выполненном перемещении рабочего органа, при этом управляющая схема не будет иметь сведений о возникшей ситуации.

В связи с описанными особенностями работы приводов с шаговыми двигателями актуальной является задача получения управляющей схемой информации о пропуске шагов двигателем без применения датчиков перемещения для рабочего органа.

В самом простом случае это может быть сигнал о возникновении пропуска, в более предпочтительном – информация о количестве пропущенных шагов, что позволит провести коррекцию положения.

Современные драйверы шаговых двигателей, например, Trinamic TMC2209, Leadshine EM705 и пр., имеют функции отслеживания состояния двигателя по параметрам питания его обмоток: токам, сдвигам фаз, выбросам противо-ЭДС и т.п., но такая технология является еще недостаточно надежной и стабильной в работе, к тому же требует тонкой настройки порога срабатывания.

Возможным сигналом для отслеживания пропуска шагов шаговым двигателем могут служить механические вибрации ротора, возникающие при срыве синхронизации переключения обмоток с положением ротора. Проверке возможности использования такого сигнала и посвящена данная работа.

В качестве датчика вибраций служил дисковый пьезоэлемент PIEZZO-KNOCK Olimex, жестко закрепленный на шаговом двигателе ДШ-200-0,08. Шаговый двигатель был подключен к драйверу A4988 от Allegro MicroSystems. Драйвер для выполнения шагов тактировался от генератора прямоугольных импульсов. Для получения сигнала пьезоэлемент был подключен к осциллографу.

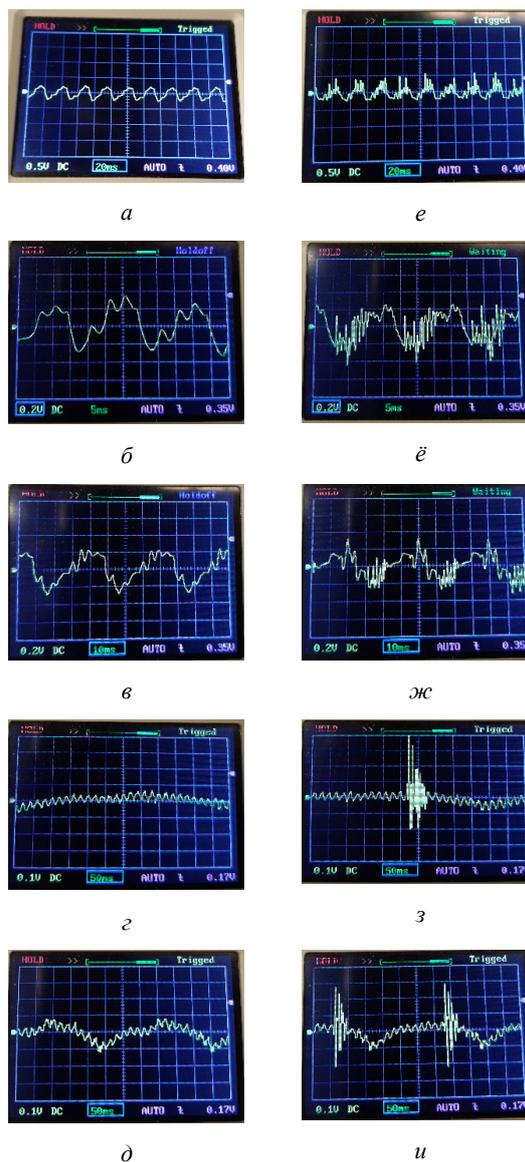
При проведении опытов снимались две осциллограммы – свободного вращения двигателя и пропуска шагов при работе «на упор» при зафиксированном роторе (предварительно ротор совершал один оборот для стабилизации режима). Такие данные снимались для пяти режимов работы драйвера – режиме полного шага и четырех режимах дробления шагов (от 1/2 до 1/16).

Полученные осциллограммы приведены на рис. 1.

При анализе приведенных результатов, в первую очередь, необходимо отметить различие между осциллограммой при свободном вращении и осциллограммой при заблокированном роторе для всех режимов дробления шага.

Для полношагового режима, а также для дроблений 1/2 и 1/4 амплитуда сигнала практически не отличается. Это связано с относительно большими шагами ротора при вращении и создаваемой вследствие этого вибрацией. В отличие от свободного вращения, работа с заблокированным ротором создает в сигнале дополнительные высокочастотные

составляющие, которые могут детектироваться с помощью фильтра высоких частот.



а–д – при свободном вращении в режиме полного шага, дробления 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 соответственно;  
е–и при заблокированном роторе в аналогичных режимах

Рисунок 1 – Осциллограммы, снятые с пьезоэлемента

Для режимов дробления шага 1/8 и 1/16 амплитуда сигнала при свободном вращении значительно меньше, вследствие меньшего шага и меньших рывков ротора, поэтому на ее фоне при блокировке ротора появляются хорошо различимые всплески сигнала, которые должны быть распознаны компаратором.

Следует заметить, что более сложные модели драйверов шаговых двигателей обладают функцией внутренней интерполяции шагов (за счет плавного изменения тока в обмотках), за счет чего перемещение ротора двигателя даже в полношаго-

вом режиме происходит довольно плавно и с заметно меньшими вибрациями. При использовании драйверов с такими режимами различие выходного сигнала при пропуске шагов и при нормальном вращении может быть заметно больше (особенно для работы при малом дроблении шага).

**Вывод.** Использование пьезоэлектрического преобразователя с шаговым двигателем позволяет

получить выходной сигнал, с помощью которого возможно определить пропуск шагов двигателем.

Дальнейший интерес представляет исследование работы схем обработки с таким сигналом и определение возможности детектирования одиночных шагов при вращении и их подсчета, исследование зависимости выходного сигнала от механической жесткости системы.

УДК 628.941

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКАХ СВЕТА

Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Проанализированы перспективы применения гиперболических отражателей для увеличения углового размера светового пучка в светодиодных светильниках. Показано, что за счет увеличения длины хода светового пучка в этом случае уменьшается освещенность плоскости.

**Ключевые слова:** светодиодный источник света, гиперболический отражатель, распределение освещенности.

## APPLICATION OF HYPERBOLIC REFLECTORS IN LED LIGHT SOURCES

Bogdan P., Zaytseva E., Baranov P., Stepanenko A.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** The prospects of using hyperbolic reflectors to increase the angular size of the light beam in LED lamps are analyzed. It is shown that by increasing the travel length of the light beam in this case, the illumination of the plane decreases.

**Key words:** LED light source, hyperbolic reflector, illumination distribution.

*Адрес для переписки: Богдан П.С., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: pbogdan@bntu.by*

Широкое использование светодиодных источников света ограничивается малым угловым размером светового пучка. Компенсировать этот недостаток возможно, используя в осветительном приборе дополнительные оптические элементы (линзы, отражатели [1–3]) и рассеивающие фильтры [4]. Выбор оптимального варианта до сих пор остается актуальной задачей. Цель данного исследования – проанализировать, как введение в светодиодный светильник дополнительных отражающих элементов влияет на распределение освещенности. В качестве отражателя был выбран один из элементов двуполостного гиперболоида вращения, в фокусе которого располагался светодиод. Расчет распределения освещенности производился для двух вариантов, когда отражающий слой находился как на вогнутой, так и на выпуклой поверхности гиперболоида.

Схема для расчета распределения освещенности плоскости при отражении светодиодного луча от гиперболоида с внутренним зеркальным слоем представлена на рис. 1. Луч, выходящий из точки  $F$  расположения светодиода под углом  $\alpha$ , отражается от внутренней поверхности верхней части

двуполостного гиперболоида в точке  $R$  и падает на освещаемую плоскость  $EQ$  под углом  $\beta$ .

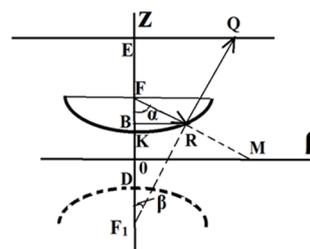


Рисунок 1 – Схема для расчета распределения освещенности плоскости при отражении светодиодного луча от гиперболоида с внутренним зеркальным слоем

Распределение освещенности на освещаемой плоскости  $EQ$  в функции угла  $\alpha$  направления луча индикатрисы силы света светодиода и угла наклона  $\beta$  луча к перпендикуляру к освещаемой плоскости имеет вид:

$$E(\alpha, \beta) = \frac{I(\alpha) \cos \beta}{l^2}, \quad (1)$$

где  $I(\alpha)$  – зависимость силы света от угла наклона луча к оси симметрии индикатрисы;