

УДК 000.31:621.3.049.77

ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**В. В. Осадчий, Е. С. Назарова, С. Ю. Тоболкин**

Запорожский национальный технический университет

ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина. E-mail: w.osadchiy@gmail.com

Электроприводы на базе шаговых двигателей позволяют получить высокий момент при низких угловых скоростях вращения ротора и осуществлять позиционирование без применения датчиков обратной связи. В то же время колебательные процессы при повороте ротора на один шаг могут приводить к нежелательным явлениям, в частности, к снижению момента и потере шага. С развитием микропроцессорной и полупроводниковой техники появляются новые алгоритмы управления шаговыми двигателями, которые необходимо проверять, отлаживать, а также оценивать эффективность их применения. Поэтому актуальной задачей является разработка универсального лабораторного стенда, позволяющего исследовать работоспособность и эффективность алгоритмов управления шаговыми двигателями предварительно на модели и в конечном итоге на реальном объекте. Методы исследования – математическое моделирование и физический эксперимент. Разработанный лабораторный стенд позволяет исследовать алгоритмы управления шаговыми двигателями при изменении момента инерции и статического момента сопротивления для разомкнутых и замкнутых систем управления. Получена имитационная модель и подтверждена её адекватность. Указанная имитационная модель учитывает момент, обусловленный магнитным полем ротора, что позволяет исследовать эффективность новых алгоритмов управления на основе регулирования тока в фазах шаговых двигателей.

Ключевые слова: шаговый двигатель, момент инерции, собственные колебания.**ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ МІКРОПРОЦЕССОРНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМИ ДВИГУНАМИ****В. В. Осадчий, О. С. Назарова, С. Ю. Тоболкін**

Запорізький національний технічний університет

вул. Жуковського, 64, г. Запоріжжя, 69063, Україна. E-mail: w.osadchiy@gmail.com

Электроприводы на базе кроковых двигунів дозволяють отримати високий момент при низьких кутових швидкостях обертання ротора й здійснювати позиціонування без застосування датчиків зворотного зв'язку. У той же час коливальні процеси при повороті ротора на один крок можуть призводити до небажаних явищ, а саме, до зниження моменту й втрати кроку. З розвитком мікропроцесорної і напівпровідникової техніки з'являються нові алгоритми керування кроковими двигунами, які необхідно перевіряти, відлагоджувати, а також оцінювати ефективність їх застосування. Тому актуальною задачею є розробка універсального лабораторного стенда, який дозволяє досліджувати працездатність і ефективність алгоритмів керування кроковими двигунами попередньо на моделі й у завершенні на реальному об'єкті. Методи дослідження – математичне моделювання й фізичний експеримент. Розроблений лабораторний стенд дозволяє досліджувати алгоритми керування кроковими двигунами при зміні моменту інерції та статичного моменту опору для розімкнутих і замкнутих систем керування. Отримано імітаційну модель і підтверджено її адекватність. Указана імітаційна модель враховує момент, обумовлений магнітним полем ротора, що дозволяє досліджувати ефективність нових алгоритмів керування на основі регулювання струму у фазах крокових двигунів.

Ключові слова: кроковий двигун, момент інерції, власні коливання.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Как известно, шаговые двигатели (ШД) применяются в приводах машин и механизмах, работающих в старт-стопном режиме, или в приводах непрерывного движения, где управляющее воздействие задается последовательностью импульсов. Достоинством таких двигателей является высокий момент при низких скоростях вращения, кроме того, шаговые двигатели обеспечивают возможность точного позиционирования без датчика обратной связи.

Одним из недостатков данного вида двигателей является проскальзывание ротора [1, 2]. Для устранения названного недостатка в высокоточных приводах используют системы с обратной связью по положению ротора и специализированные различные алгоритмы управления, например, с дроблением шага [3].

Несмотря на кажущуюся простоту управления ШД, создание высокоэффективных электроприводов на их основе затрудняется резонансными явлениями, связанными с колебаниями ротора при повороте на один шаг [4], что требует разработки новых алгоритмов управления, которые, в свою очередь, нуждаются в тестировании. Поэтому разработка инструментальных средств, позволяющих оценивать эффективность новых алгоритмов, является актуальной задачей.

Целью данной работы является создание программно-аппаратного комплекса для отладки и исследования систем управления гибридными шаговыми двигателями, состоящего из экспериментальной установки и имитационной модели.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для синтеза и анализа электромеханических систем

широко используются различного рода лабораторные комплексы [5, 6]. В ходе исследования был разработан лабораторный стенд, блок–схема и внешний вид которого представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

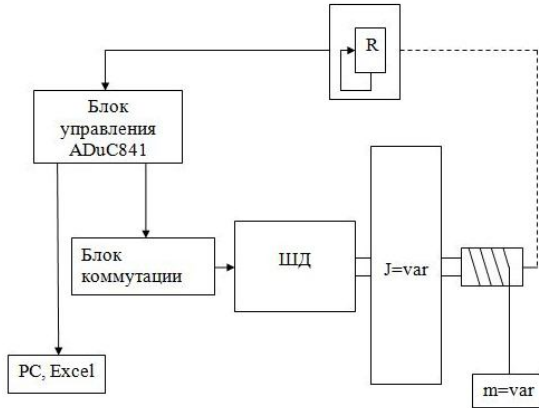


Рисунок 1 – Структурная схема лабораторного стенда

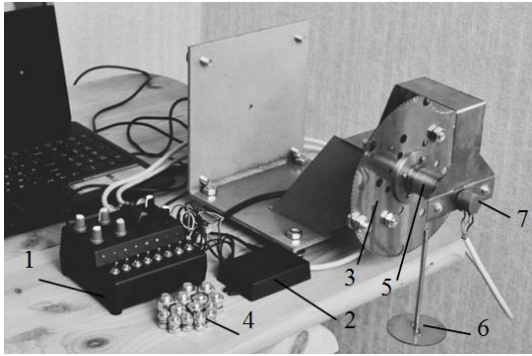


Рисунок 2 – Внешний вид стенда

Основными элементами стенда являются: униполярный шаговый двигатель СДХ 1,8/2 с напряжением питания +5 В и шагом 1,8; блок управления на основе микроконтроллера (МК) ADuC841 (1); силовой коммутатор (2), на базе драйвера IR4427S, обеспечивающий согласование выходного сигнала блока управления с ШД; закрепленный на валу ШД диск с отверстиями (3), позволяющий изменять момент инерции на валу двигателя путем установки требуемого количества комплектов болт–гайка (4); барабан (5) и соединённый с ним нагрузочное устройство (6) для изменения статического момента сопротивления путем установки требуемого количества грузов (табл. 1); соединённый с валом ШД многооборотный переменный резистор (7), используемый для определения углового положения ротора; программно-аппаратный модуль, позволяющий передавать текущие данные (угол поворота вала и токи двигателя) из МК в EXCEL через USB-интерфейс для дальнейшей обработки и анализа.

Масса грузов рассчитана с учетом диаметра барабана, что позволяет устанавливать значения статического момента, кратные 0,01 Н·м.

Таблица 1 – Моменты, создаваемые грузами

№	m, 1·10 ⁻³ кг	M, Н·м
1	65	0,01
2	130	0,02
3	325	0,05
4	650	0,1

Для изменения момента инерции используются комплекты болт–гайка (табл. 2) типоразмеров М6, М8, М10 и М12 с целью обеспечения кратности моментов инерции, создаваемых различными комплектами. На основании среднего веса комплекта рассчитаны расстояния от оси вращения до центра отверстия для установки соответствующего комплекта болт–гайка. В результате получены следующие соотношения моментов инерции: два комплекта М6 соответствуют одному комплекту М8, четыре комплекта М8 – одному М10 и четыре М10 – одному М12. Для комплектов М8, М10 и М12 на диске имеется по шесть отверстий, для комплекта М6 – два отверстия, что позволяет варьировать значение добавочного момента инерции от нуля до 3,175·10⁻³ кг·м² с шагом 2,5·10⁻⁵ кг·м².

Таблица 2 – Масса и момент инерции комплектов болт–гайка

№	Комплект	m, 1·10 ⁻³ кг	R, м	J _{доб} , кг·м ²
1	М12	48,3	0,091	4,0·10 ⁻⁴
2	М10	31,5	0,057	1,0·10 ⁻⁴
3	М8	15,5	0,040	2,5·10 ⁻⁵
4	М6	6,8	0,043	1,25·10 ⁻⁵

Особенностью диска для изменения момента (рис. 3) является различие диаметров отверстий, что практически исключает установку комплекта болт–гайка в непредназначенное для него место.

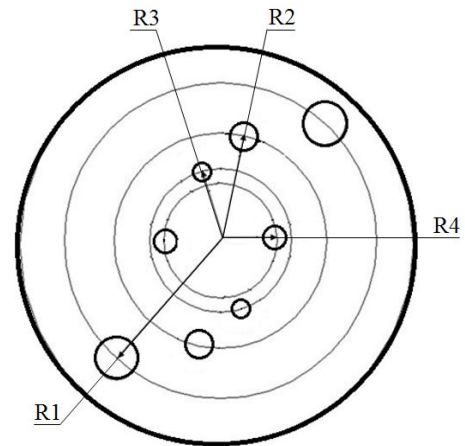


Рисунок 3 – Схематическое изображение диска для изменения момента инерции

В ходе исследования экспериментальным путем определены зависимость момента от угла поворота ротора двигателя и частота собственных колебаний ротора при повороте на один шаг. Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 4.

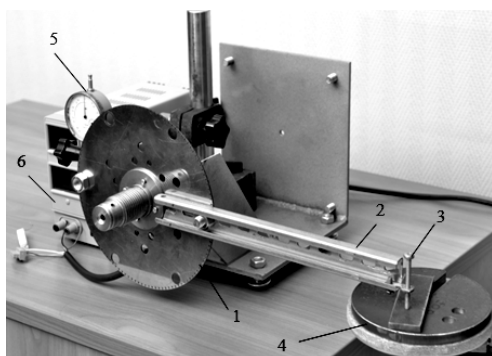


Рисунок 4 – Внешний вид установки для измерения момента двигателя

Изменение положения ротора проводилось с помощью регулировочного винта (3), закрепленного на одном конце рычага (2), жестко связанного с валом двигателя и диском (1). В качестве нулевой отметки принято горизонтальное положение рычага. Регулировочный винт (3) упирается в платформу тензодатчика (4), что позволяет определить суммарный момент, создаваемый двигателем и рычагом. Причем значение момента, обусловленное массой рычага, больше значения максимального момента ШД, благодаря чему исключается люфт при изменении направления момента двигателя. Диапазон изменения с помощью регулировочного винта положения вала составляет $\pm 3^\circ$.

Для заданных угловых положений вала ШД, измеряемых с помощью микрометра (5), при варьировании тока в фазе двигателя с помощью блока питания (6) фиксировались значения силы, действующей на тензодатчик. Результаты обработки полученных экспериментальных данных для одной из фаз ШД с учетом параметров рычага и тензодатчика приведены на рис. 5.

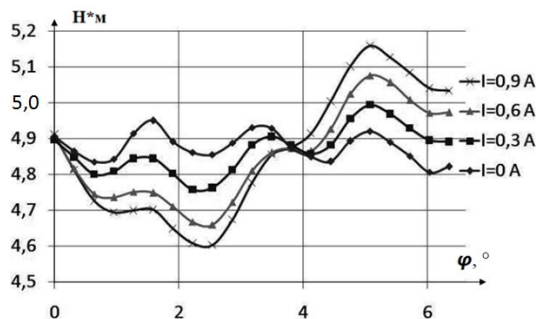


Рисунок 5 – Зависимости момента ШД от угла поворота ротора для заданных значений тока фазы

Полученные зависимости имеют выраженную периодичность, причем период при отсутствии тока

в фазе в четыре раза меньше, чем период при его наличии.

В результате совместной обработки аналогичных зависимостей для всех фаз ШД путем вычитания момента при отсутствии тока и смещения на углы, кратные шагу, получена зависимость момента, обусловленного током в фазе, от угла поворота ротора ШД (рис. 6).

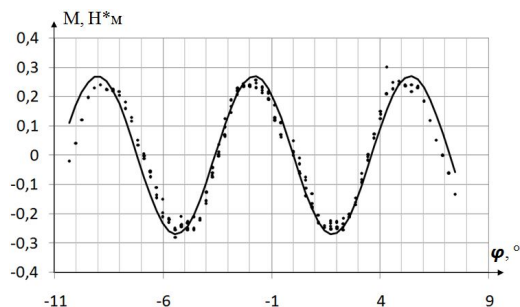


Рисунок 6 – Зависимость момента, создаваемого током в фазе, от угла поворота ротора ШД

На основании анализа результатов экспериментов, представленных на рис. 5, 6, предложено выразить момент двигателя в виде двух составляющих: первая – момент, создаваемый магнитным потоком при прохождении тока через обмотку, и вторая – момент, создаваемый постоянными магнитами. При этом суммарный момент для одной фазы ШД определяется выражением

$$M_{\Sigma} = K_I I \sin(\phi) - K_{ПМ} \sin(4\phi), \quad (1)$$

где K_I – коэффициент, определяющий отношение амплитуды момента к току в фазе ШД; $\phi_{ЭМ}$ – угол поворота ротора в пределах периода изменения момента одной фазы ШД; $K_{ПМ}$ – конструктивная постоянная, равная амплитуде момента, обусловленного постоянными магнитами.

Коэффициент K_I получен на основании экспериментальных данных. Амплитуда момента определялась как половина от разности между максимальным и минимальным значением за период при заданном токе в фазе ШД. Значения тока и соответствующей ему амплитуды момента представлены на графике (рис. 7).

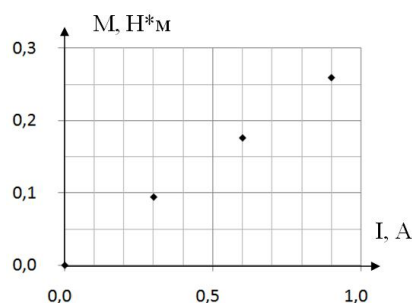


Рисунок 7 – Зависимость амплитуды момента от тока в фазе двигателя

Расчётные значения коэффициента K_I для различных значений тока в фазе ШД приведены в табл. 3. На основании указанных данных можно заключить, что отношение амплитуды момента к току практически не зависит от значения тока, и принять $K_I = 0,30$.

На основании зависимостей и параметров, определенных экспериментальным путем, а также с учётом принятых допущений (1) механические процессы в лабораторном стенде будут описываться системой уравнений (2):

$$\begin{cases} J \frac{d^2\phi}{dt^2} = M_{ЭМ} + M_{ПМ} - M_C - K_{ВТ} \frac{d\phi}{dt}; \\ M_{ЭМ} = K_I (I_{A+} \cos(\phi_{ЭМ}) + I_{B+} \sin(\phi_{ЭМ}) - I_{A-} \cos(\phi_{ЭМ}) - I_{B-} \sin(\phi_{ЭМ})); \\ M_{ПМ} = -K_{ПМ} \sin(4\phi_{ЭМ}); \\ \phi_{ЭМ} = \frac{N_w}{4} \phi; \\ J = J_0 + J_{ДОБ}; \\ J_{ДОБ} = n_{M12} J_{M12} + n_{M10} J_{M10} + n_{M8} J_{M8} + n_{M6} J_{M6}, \end{cases} \quad (2)$$

где J – момент инерции; $M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент, создаваемый протекающими в обмотках ШД токами; $M_{ПМ}$ – момент, создаваемый постоянными магнитами; M_C – момент сопротивления

(табл. 1); $K_{ВТ}$ – коэффициент вязкого трения; I_{A+} , I_{B+} , I_{A-} , I_{B-} – токи в фазах ШД; $N_{Ш}$ – количество шагов двигателя (200); J_0 – неизменяемая часть момента инерции ($2,47 \cdot 10^{-3}$ кг·м²); $J_{ДОБ}$ – варьируемая часть момента инерции; n_{M12} , n_{M10} , n_{M8} , n_{M6} – количество установленных на диск комплектов соответствующего типоразмера; J_{M12} , J_{M10} , J_{M8} , J_{M6} – моменты инерции комплектов (табл. 2)

Таблица 3 – Зависимость коэффициента K_I от тока в фазе двигателя

Ток, А	0,3	0,6	0,9
Амплитуда момента, Н·м	0,096	0,180	0,265
K_I , (Н·м) / А	0,32	0,30	0,30

На основании параметров, определенных экспериментальным путем, и в соответствии с системой уравнений (2) в среде Matlab Simulink [7] создана имитационная модель лабораторного стенда (рис. 8).

Входными координатами являются токи в фазах ШД, а выходными – угловая скорость и положение ротора.

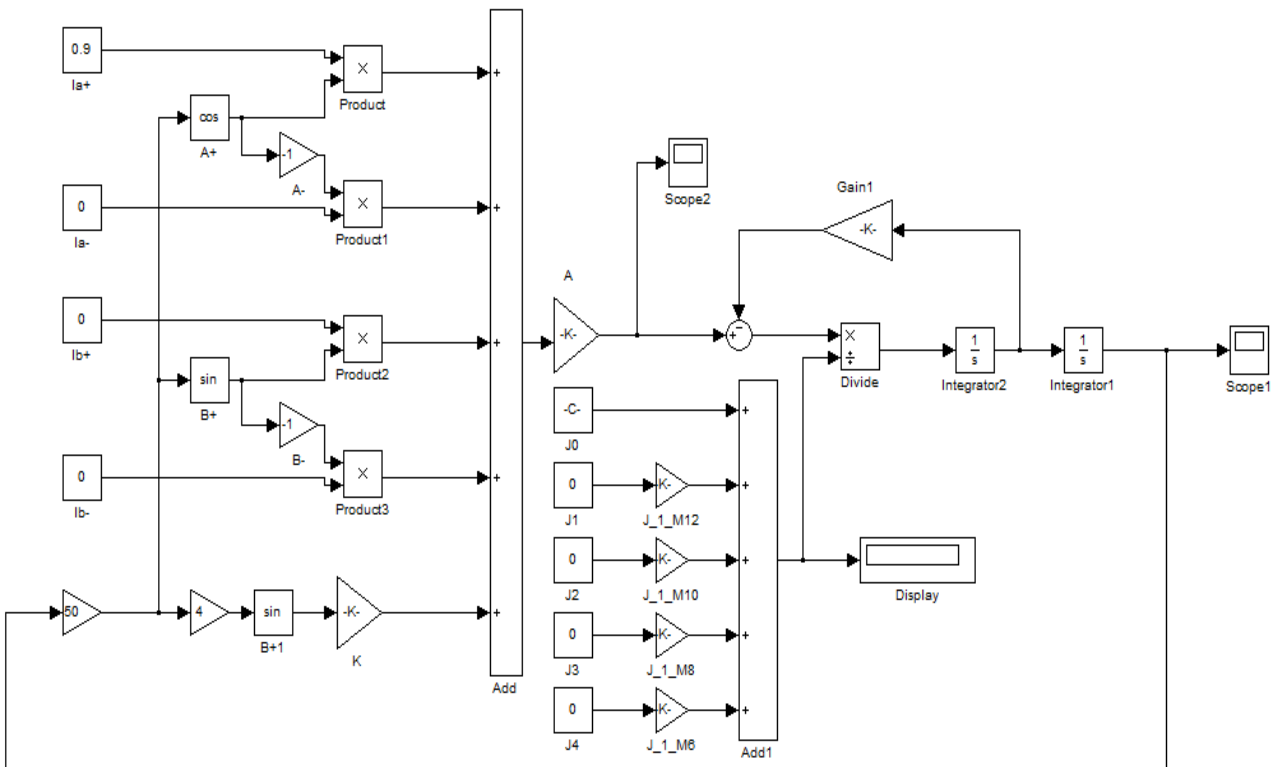


Рисунок 8 – Структура имитационной модели шагового электропривода для исследования алгоритмов управления

Значение коэффициента вязкого трения K_{BT} определено графическим способом. Первоначально проведен математический эксперимент, в ходе которого варьировалось значение K_{BT} и для затухающего колебательного процесса подсчитывалось количество колебаний с амплитудой, более 10 % от величины шага. Результаты приведены в табл. 4. На основании полученных данных построен график зависимости количества колебаний от коэффициента вязкого трения (рис. 9).

Таблица 4 – Количество колебаний в зависимости от коэффициента вязкого трения

K_{BT}	0,002	0,004	0,006	0,008	0,001
Количество колебаний	42	40	26	20	16

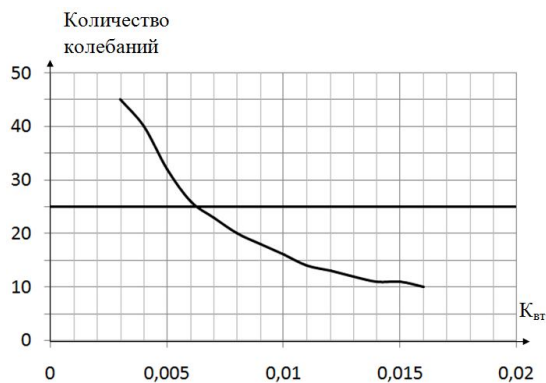


Рисунок 9 – Графическое определение значения коэффициента вязкого трения

Затем путём физического эксперимента определено действительное количество колебаний, равное 25, и проведена соответствующая прямая (рис. 9). Абсцисса точки пересечения (0,0063) является искомым значением K_{BT} .

С целью подтверждения адекватности модели производилось сравнение частот собственных колебаний ротора при повороте на один шаг для различных моментов инерции, полученных экспериментально и путем моделирования. Экспериментально частота собственных колебаний определялась на основании записи переходного процесса, которая производилась следующим образом.

На диске, установленном на валу двигателя, закреплена и сориентирована горизонтально лазерная указка (рис. 10), луч которой направлен на лист бумаги, расположенный на вертикальной стене на расстоянии 8,5 м.

С помощью программы, написанной на языке Assembler [8], ток в фазах двигателя переключался в ручном режиме.

При подаче тока в фазу ШД луч на листе бумаги совершал колебания вдоль вертикальной линии. С началом переходного процесса фотоаппарат, направленный таким образом, чтобы точка от луча

находилась в левой части кадра, поворачивался влево и фиксировал колебания лазерного луча. При этом выдержка затвора составляла порядка 2–3 с.

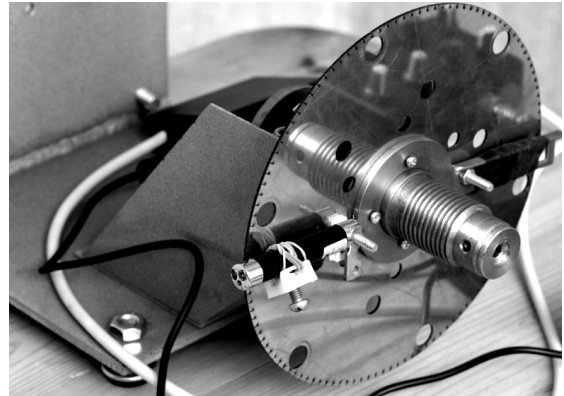


Рисунок 10 – Место крепления лазерной указки

Схематическое изображение регистрации переходного процесса показано на рис. 11.

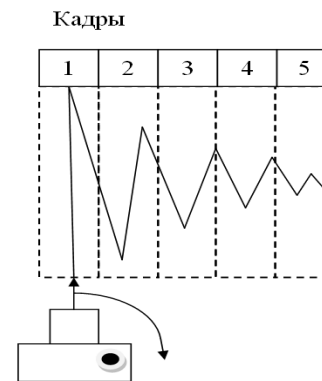


Рисунок 11 – Схематическое изображение регистрации переходного процесса

Полученный таким способом график переходного процесса представлен на рис. 12.

Временные параметры определялись на основании синхрои́мпульсов, поступающих на светодиоды, неподвижно закрепленные на том же листе бумаги, на который попадает лазерный луч. Указанные синхрои́мпульсы представлены двумя пунктирными линиями в нижней части рис. 12.

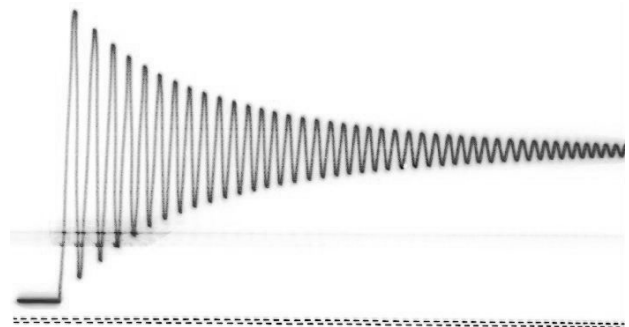


Рисунок 12 – Экспериментальный график переходного процесса

Длина штриха соответствует 20 мс, период – 40 мс. Указанный опыт производился для четырех случаев: без дополнительных комплектов (минимальный момент инерции), с двумя, четырьмя и шестью M12 (максимальный момент инерции).

Аналогичные переходные процессы получены также путем математического моделирования (рис. 13).

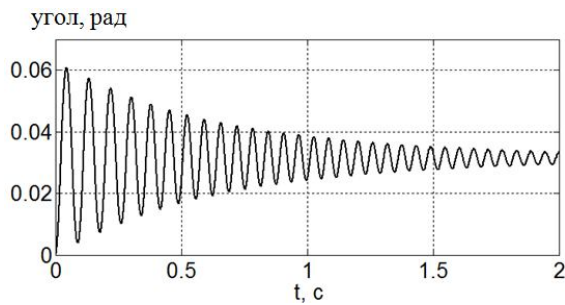


Рисунок 13 – График переходного процесса, полученный путем моделирования

Учитывая связанную с нелинейностью системы зависимость периода колебаний от их амплитуды, сравнение результатов физического эксперимента и математического моделирования производилось на основании среднего периода пяти колебаний на участке, где амплитуда составляет около 10 % от величины шага, а именно, начиная с 23-го колебания. Результаты эксперимента и математического моделирования приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Сравнение периодов колебаний, полученных экспериментально и в модели

Количество комплектов M12, шт		0	2	4	6
Период колебаний, мс	эксперимент	54	62	68	79
	модель	57	66	74	81

Близость полученных результатов подтверждает адекватность предложенной модели.

В ходе исследования получен график угла поворота ротора ШД при последовательной подаче трёх управляющих импульсов величиной 1,2 А и длительностью 2 с (рис. 14,а). При сокращении длительности шага колебательные процессы могут приводить к такому нежелательному явлению, как срыв шага. В частности, для длительности импульсов 0,11 с график угла поворота ротора представлен на рис. 14,б. Указанное явление исключает применение простых алгоритмов управления шаговыми двигателями для реализации широкого диапазона регулирования скорости при значительных моментах инерции. В то же время подача управляющих импульсов различной длительности в определённые моменты времени обеспечивает поворот ротора без колебаний (рис. 14,в).

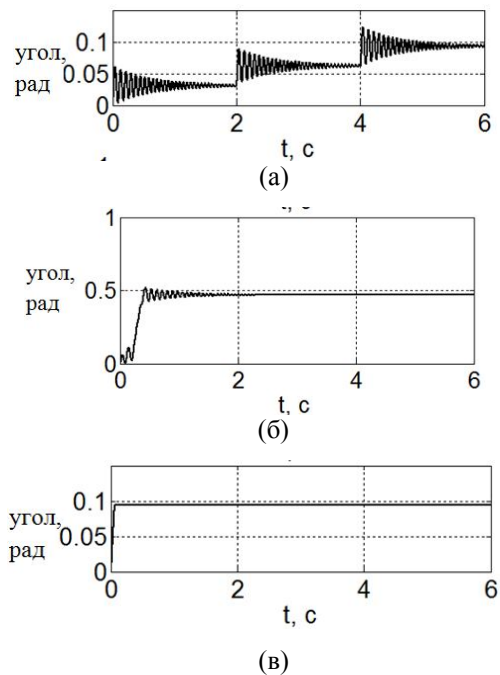


Рисунок 14 – Переходные процессы для трёх шагов

На рис. 15 представлен режим управления, при котором поворот ротора на три шага, несмотря на значительный момент инерции, осуществляется без срыва шага и без колебаний. Временные параметры управляющих импульсов следующие: первый импульс – с 0 до 0,014 с, второй – с 0,056 до 0,068 с, третий – с 0,069 до 0,1 с.

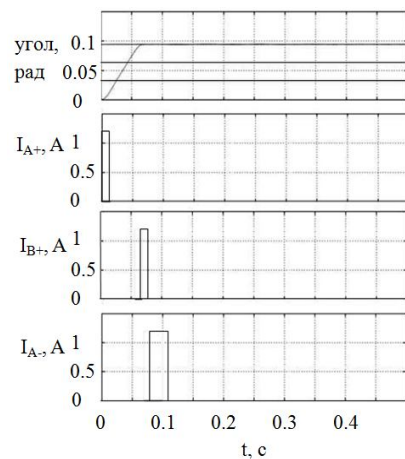


Рисунок 15 – Режим управления без колебаний

Дальнейшие исследования планируется осуществлять в направлении поиска зависимостей временных параметров управляющих импульсов, обеспечивающих поворот ротора без колебаний, от электромеханических параметров подсистемы «ШД–исполнительный механизм», а также экспериментального подтверждения работоспособности алгоритмов управления, основанных на указанных зависимостях.

ВЫВОДЫ. Разработанный лабораторный стенд позволяет исследовать алгоритмы управления гибридными шаговыми двигателями при изменении момента инерции и статического момента сопротивления как для систем с обратной связью, так и без таковой.

Использование лабораторного стенда в совокупности с адекватной ему имитационной моделью, который является комплексным инструментом по разработке, отладке и оценке эффективности систем управления гибридными шаговыми двигателями, позволяет снизить трудоемкость разработки систем управления ШД для практических применений.

Для известных значений электромеханических параметров системы управления ШД можно найти такие временные параметры импульсов управления, при которых поворот вала ШД происходит практически без колебаний.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ридико Л.И. Раз шагок, два шагок... // Схемотехника. – 2001. – № 6. – С. 13–15.
2. Ридико Л.И. Раз шагок, два шагок... // Схемотехника. – 2001. – № 7. – С. 26–29.

3. Чиликин М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. – М.: Энергия, 1971. – 624с.

4. Кенио Т. Шаговые двигатели и микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

5. Калинов А.П., Гладырь А.И. Универсальное учебно-исследовательское оборудование для электромеханических лабораторий // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 1/2007 (1). – С. 14–19.

6. Черный А.П., Лашко Ю.В., Коваль Т.П., Черная О.А. Виртуальные лабораторные комплексы – технология качества подготовки специалистов // Научно-технический прогресс в металлургии (Сборник научных трудов). – Казахстан, Алматы, 2013. – Том. 2. – С. 370–376.

7. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

8. Ткачов В., Грулер Г., Нойбергер Н. та ін. Мікропроцесорна техніка: навч. посібник. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012. – 188 с.

LABORATORY BENCH FOR THE RESEARCH OF ALGORITHMS MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEMS OF STEPPER MOTORS

V. Osadchiy, Ye. Nazarova, S. Tobolkin

Zaporozhye National Technical University

ul. Zhukovskogo, 64, Zaporozhye, 69063, Ukraine. E-mail: w.osadchiy@gmail.com

Electric drives based at stepping motor give high torque at low angular speed of the rotor and realize positioning without feedback sensors. At the same time, the oscillatory processes may lead to adverse events, when the rotor turns by one step, in particularly, to reduction of torque and loss of step. With the development of microprocessor and semiconductor technology there are new algorithms for controlling stepper motors, which should be checked, debugged and evaluated the effectiveness of their application. Therefore, it is actual task to develop a universal laboratory bench allows to investigate working capacity and the effectiveness of the control algorithms stepper motor previously on the model and after on the real object. Research methods are mathematical modeling and physical experiment. Designed experimental unit allows to investigate stepping motor control algorithms when changing moment of inertia and static moment of resistance for open and feedback control systems. Received simulation model and proved its adequacy. That simulation model takes into account the moment due to the magnetic field of the rotor, allowing to explore new control algorithms based on the current control in stepping motor phases.

Key words: stepping motor, moment of inertia, own oscillations.

REFERENCES

1. Ridiko, L.I. (2001), "Once a small step, a small step two", *Shemotekhnika*, no. 6, pp. 13–15. (in Russian)
2. Ridiko, L.I. (2001), "Once a small step, a small step two", *Shemotekhnika*, no. 7, pp. 26–29. (in Russian)
3. Chilikin, M.G. (1971), *Diskretnyy elektroprivod s shagovymi dvigatelyami* [Discrete electric drive with stepper motor], Energiya, Moscow. (in Russian)
4. Kenio, T. (1987), *Shagovye dvigateli i mikroprotsessornye sistemy upravleniya* [Stepper motors and microprocessor control systems], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
5. Kalinov, A.P. and Gladir, A.I. (2007), "Universal teaching and research equipment for electromechanical laboratories", *Elektromekhanichni i energosberigayuchi sistemi*, no. 1, pp. 14–19. (in Russian)

6. Chorny, A.P., Lashko, Yu.V., Koval, T.P. and Chernaya, O.A. (2013), "Virtual laboratory complexes – quality technology training", *Nauchno-tehnicheskiiy progress v metallurgii*, Vol. 2, pp. 370–376. (in Russian)

7. Dyakonov, V.P. (2005), *MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii* [MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 in mathematics and modeling], SOLON-Press, Moscow. (in Russian)

8. Tkachov, V., Gruler, G. and Noyberger, N. (2012), *Mikroprocesorna tekhnika* [Microprocessor technology], National Mining University, Dnipropetrovsk. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 21.05.2014.