

УДК 000.31:621.3.049.77

В. В. Осадчий, Е. С. Назарова, кандидаты техн. наук,
С. Ю. Тоболкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ В МИКРОШАГОВОМ РЕЖИМЕ

Аннотация. Удешевление шаговых двигателей расширяет их сферы применения, что требует разработки новых алгоритмов управления с применением микропроцессорной техники. Одним из перспективных режимов управления шаговыми двигателями является микрошаговый режим, позволяющий фиксировать вал в промежуточных положениях между шагами и тем самым обеспечивать при позиционировании более равномерное движение без срыва шага.

Ключевые слова: шаговый двигатель, широтно-импульсная модуляция, собственные колебания, момент инерции, гистерезис, микрошаговый режим, управление, позиционный электропривод

**V. Osadchiy, Ph.D., Ye. Nazarova, Ph.D.,
S. Tobolkin**

INVESTIGATION OF POSITION ELECTRIC DRIVE BASED ON STEPPER MOTOR IN MICROSTEPPING MODE

Abstract. Cheapening stepper motors extends them scope of application which requires developing new control algorithms using of microprocessor technology. One of the most promising modes of stepper motors is microstepping mode that allows fix shaft in intermediate positions between steps, and thus provide for positioning a uniform movement without disruption of step.

Keywords: stepper motor, pulse width modulation, proper vibration, moment of inertia, hysteresis, microstepping mode, control system, positional electric drive

В. В. Осадчий, О. С. Назарова, кандидаты техн. наук,
С. Ю. Тоболкин

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЗИЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВІ КРОКОВОГО ДВИГУНА У МІКРОКРОКОВОМУ РЕЖИМІ

Анотація. Здешевлення крокових двигунів розширює їх сфери застосування, що вимагає розробки нових алгоритмів керування з використанням мікропроцесорної техніки. Одним з перспективних режимів керування кроковими двигунами є мікрокроковий режим, який дозволяє фіксувати вал в проміжних положеннях між кроками і тим самим забезпечувати при позиціюванні більш рівномірний рух без зриву кроку.

Ключові слова: кроковий двигун, широтно-імпульсна модуляція, власні коливання, момент інерції, гістерезис, мікрокроковий режим, керування, позиційний електропривод

Введение. Снижение цены постоянных магнитов и, как следствие, шаговых двигателей (ШД) создает условия для их более широкого применения, в частности для систем с прямым приводом [1]. В то же время, дискретность поворота ротора ШД при значительных моментах инерции исполнительного механизма вызывает колебательные процессы, которые приводят к снижению быстродействия и точности системы. Уменьшение амплитуды колебаний ротора возможно путем управления соотношением токов в фазах ШД в процессе поворота его ротора на один шаг. Поэтому исследование микропроцессорной системы управления позиционным электроприводом на основе ШД [2], обеспечивающей снижение амплитуды колебаний ротора, является актуальной задачей.

Цель – разработка алгоритма управления токами в обмотках ШД, обеспечивающего в пределах одного шага линейную зависимость угла поворота ШД от заданного значения.

Материалы и результаты исследований

Основным применением микрошагового режима является борьба с резонансом, снижение вибрации шагового двигателя и повышение плавности хода. Достигается это благодаря тому, что при использовании микрошагового режима на вал двигателя действуют более кратковременные усилия разгона-торможения, сам вал совершает шаги меньшего размера, в результате чего инерционные явления проявляются слабее. Данный способ управления ШД и гашение колебаний актуален для малогабаритных устройств с большим моментом инерции и прямым приводом.

Известно несколько способов управления шаговым двигателем: полношаговый режим, полушаговый режим и комбинированный.

Первый способ осуществляется попеременной коммутацией фаз, при этом они не перекрываются, в один момент времени включена только одна фаза (рис. 1, а). Точки равновесия ротора для каждого шага совпадают с «естественными» точками равновесия ротора у отключенного двигателя [3]. Недостатком такого способа являются достаточно большая амплитуда колебаний.

© Осадчий В.В., Назарова Е.С.,
Тоболкин С.Ю., 2015

Второй способ – управление фазами с перекрытием: две фазы включены в одно и то же время. При этом способе управления ротор фиксируется в промежуточных позициях между полюсами статора (рис. 1, б) и обеспечивает примерно на 40 % больший момент [4], чем в случае одной включенной фазы. Этот способ управления обеспечивает такой же угол шага, как и первый способ, но положение точек равновесия ротора смещено на полшага.

Для получения более точного позиционирования и уменьшения амплитуды колебаний в самом простом случае используют комбинирование первого и второго способа (рис. 1, в). Это позволяет получить в два раза больше шагов на оборот. Так же снижаются собственные колебания, поскольку между точками переключения фаз имеется промежуточная точка равновесия.

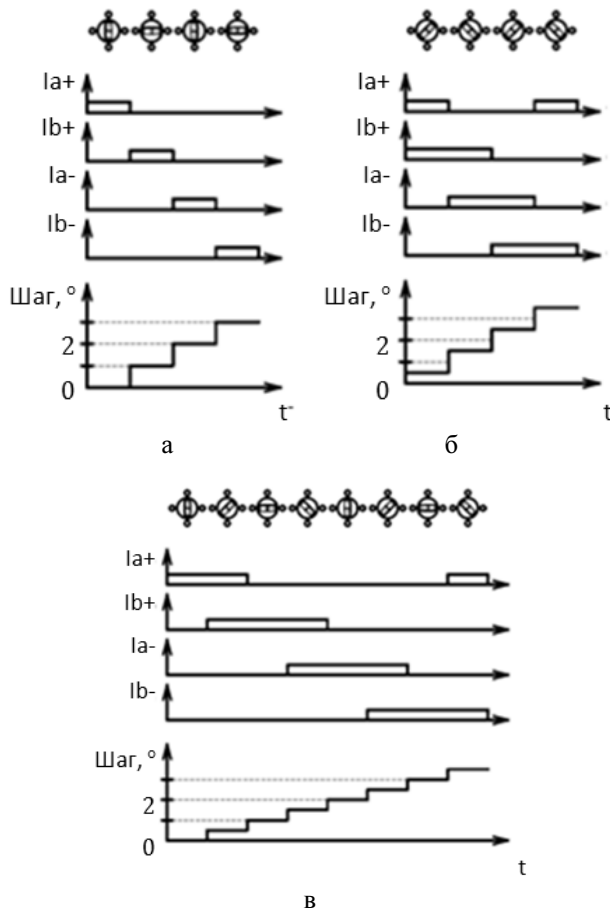


Рис. 1. Способы управления шаговым двигателем:

первый (а), второй (б) и третий (в) способы

Однако, применения *третьего способа* не всегда дает желаемую точность, в таком случае применяют микрошаговый режим [5 – 6]. Суть данного режима состоит в управлении соотношением тока в обмотках ШД. Одним из самых простых способов достижения микрошагового режима является подача в фазы двигателя токов трапециевидной формы так, что в каждый момент времени в одной фазе ток имеет максимальное значение, а во второй спадает либо нарастает (рис. 2) [7].

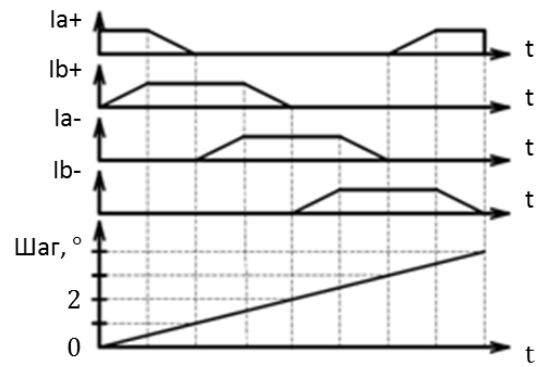


Рис. 2. Микрошаговый способ управления шаговым двигателем

В основе алгоритма формирования токов, подаваемых в фазы двигателя, лежит пилообразный сигнал задания, изменяющийся от 0° до 360°. Период пилообразного сигнала равен четырем шагам ШД. При этом направление вращения ротора определяется знаком наклона пилообразного сигнала.

В процессе исследования проведено математическое моделирование с использованием имитационной модели, реализованной в прикладном пакете моделирования динамических систем Simulink среды MATLAB [8], в ходе которого в две фазы двигателя были поданы трапециевидные сигналы таким образом, чтобы ротор совершал перемещение на один шаг и возвращался в исходную позицию. При этом сигнал задания находился в пределах от 0° до 90°.

Электромеханические процессы в ШД описываются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} J \frac{d^2\phi}{dt^2} = M_{\text{эм}} + M_{\text{пм}} - M_c - K_{\text{вт}} \cdot \frac{d\phi}{dt}; \\ M_{\text{эм}} = K_1 \cdot (I_{A+} \cdot \cos(\phi_{\text{эм}}) + I_{B+} \cdot \sin(\phi_{\text{эм}}) - I_{A-} \cdot \cos(\phi_{\text{эм}}) - I_{B-} \cdot \sin(\phi_{\text{эм}})); \\ M_{\text{пм}} = -K_{\text{пм}} \cdot \sin(4 \cdot \phi_{\text{эм}}); \\ \phi_{\text{эм}} = \frac{N_{\text{ш}}}{4} \cdot \phi; \\ J = J_0 + J_{\text{доб}}; \\ J_{\text{доб}} = n_{M12} \cdot J_{M12} + n_{M10} \cdot J_{M10} + n_{M8} \cdot J_{M8} + n_{M6} \cdot J_{M6}, \end{cases} \quad (1)$$

где J – момент инерции; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент, создаваемый протекающими в обмотках ШД токами; $M_{\text{пм}}$ – момент, создаваемый постоянными магнитами; M_c – момент сопротивления; $K_{\text{вт}}$ – коэффициент вязкого трения; I_{A+} , I_{B+} , I_{A-} , I_{B-} – токи в фазах ШД; $N_{\text{ш}}$ – количество шагов двигателя (200); J_0 – постоянная часть момента инерции ($2,47 \cdot 10^{-3}$ кг·м²); $J_{\text{доб}}$ – 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 дополнительных масс.

Математическое моделирование проводилось для двух случаев – при напряжении питания силового коммутатора напряжением равным 4 и 12 В. Зависимость угла поворота ротора двигателя от сигнала задания для напряжения 4 В приведена на рис. 3а. Данная зависимость имеет существенный гистерезис, который обусловлен влиянием постоянных магнитов.

Регулировочная характеристика при увеличении напряжения питания ШД до 12 В приведена на рис. 3, б. Как видно из графика, увеличение напряжения питания позволило практически полностью исключить гистерезис.

На разработанном лабораторном стенде [9] на языке программирования Assembler [10] реализован алгоритм управления, при котором сигнал задания попеременно линейно нарастал и спадал в пределах от 0° до 90°. Сигнал задания и показания датчика поворота вала ШД записывались двухлучевым осциллографом. Зависимость угла поворота от сигнала задания, полученная путем совместной обработки двух сигналов, представлена на рис. 4.

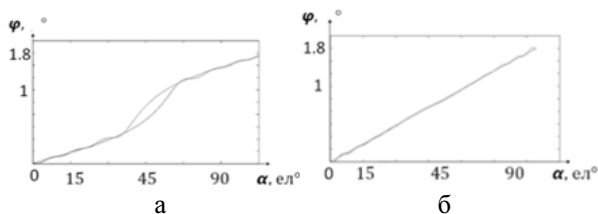


Рис. 3. Зависимость угла поворота ротора от сигнала задания при напряжении 4 В (а) и 12В (б)

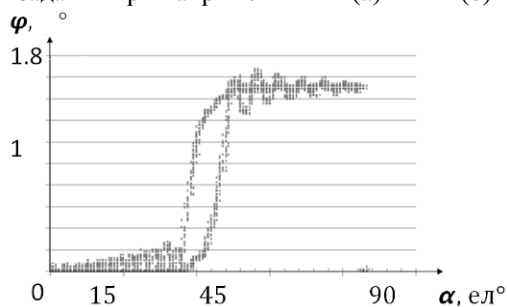


Рис. 4. Регулировочная характеристика при напряжении питания 4 В

На графиках при напряжении питания в 4 В наблюдается значительный гистерезис, аналогичный полученному при моделировании, обусловленный влиянием постоянных магнитов, а также имеются две зоны нечувствительности.

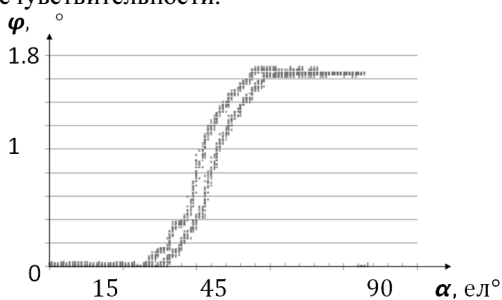


Рис. 5. Регулировочная характеристика при напряжении питания 12 В

Увеличение напряжения питания (рис. 5) позволило уменьшить гистерезис, но, как и при напряжении питания в 4 В, остались две зоны нечувствительности. Данное расхождение результатов моделирования и эксперимента обусловлено тем, что в модели не учитывались процессы в силовом коммутаторе при применении широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Оценка эффективности применения предложенного алгоритма проводилась путем сравнения графиков поворота ротора ШД для одиночной коммутации (рис. 6) и для микрошагового режима (рис. 7).

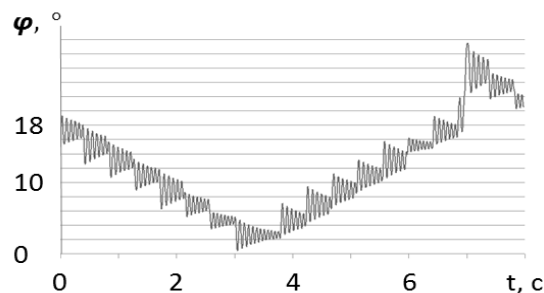


Рис. 6. Переходные процессы ШД без применения микрошага

Перемещение ротора без микрошага характеризуется большой амплитудой колебаний и срывом шага, что крайне негативно сказывается на рабочем механизме.



Рис. 7. Переходные процессы ШД с применением микрошага

Переходной процесс при использовании микрошага характеризуется более низкой амплитудой колебаний и отсутствием такого негативного явления, как срыв шага.

Выводы

Существенный гистерезис зависимости угла поворота ротора ШД от задания при низких напряжениях питания силового коммутатора обусловлен моментом, создаваемым постоянными магнитами.

Применение широтно-импульсной модуляции для реализации микрошага при управлении ШД в системах с прямым приводом и большими моментами инерции позволяет снизить амплитуду колебаний и исключить потерю шага.

Отличия в зависимостях, полученных экспериментально и путем моделирования, требуют дальнейших исследований в направлении определения взаимосвязи тока в фазе ШД с коэффициентом заполнения ШИМ.

Список используемой литературы

1. www.robotoid.com (2001), “Working with Stepper Motors”, available at: http://www.robotoid.com/bonus-chapters/rbb2-ch19-Working_with_Stepper_Motors.pdf (accessed May, 2015).

2. Бушер В. В. Учебно-исследовательский макет причального контейнерного перегружателя с шаговым электроприводом / В. В. Бушер, А. Г. Калинин, Д. И. Акшинцев, Д. В. Бичев // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К. : Техніка, 2014. – № 15 (91). – С. 441 – 444.

3. www.solarbotics.net “Industrial Circuits Application Note Stepper Motor Basics”, available at: <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf> (accessed May, 2015)

4. <http://shinano.com> “Operation and Theory. Stepper Motor”, available at: http://shinano.com/motors/docs/SKC_stepper_operation.pdf (accessed May 2015)

5. Ридико Л. И. Раз шажок, два шажок... / Л. И. Ридико // *Схемотехника*. – 2001. – № 6. – С. 13 – 15.

6. Ридико Л. И. Раз шажок, два шажок... / Л. И. Ридико // *Схемотехника*. – 2001. – № 7. – С. 26 – 29.

7. Douglas W. Jones, (2015), “Microstepping of Stepping Motors”, available at: <http://homepage.cs.uiowa.edu/~jones/step/micro.html> (accessed May, 2015)

8. Михайлов Е. MatLab. Руководство для начинающих / Е. Михайлов, А. Померанцев – Режим доступа: <http://chemometrics.ru/materials/textbooks/matlab.htm>

9. Осадчий В. В. Лабораторный стенд для исследования алгоритмов микропроцессорных систем управления шаговыми двигателями / В. В. Осадчий, Е. С. Назарова, С. Ю. Тоболкин // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск науково-виробничого журналу*. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014(26). – С. 102 – 108.

10. www.ic.unicamp.br “The Art of Assembly Language”, available at: <http://www.ic.unicamp.br/~pannain/mc404/aulas/pdfs/Art%20Of%20Intel%20x86%20Assembly.pdf> (accessed May, 2015)

Получено 20.05.2015

References

1. www.robotoid.com, (2001), “Working with Stepper Motors” (In English) available at: http://www.robotoid.com/bonus-chapters/rbb2-ch19-Working_with_Stepper_Motors.pdf (accessed May, 2015)

2. Busher V.V., Kalinin A.G., Akshintsev D.I., and Bichev D.V. Uchebno-issledovatel'skiy maket prichalnogo konteynernogo peregruzhatelya s shagovim elektroprivodom [Educational and Research Layout Berthing Container Cranes with Stepper Electric Drive], (2014), *Elektrotehniicheskiye i Komputernir Sistemi*. Kiev, Ukraine, *ТЕХНИКА*, No. 15 (91), pp. 441 – 444 (In Russian).

3. www.solarbotics.net “Industrial Circuits Application Note Stepper Motor Basics” (In English) available at: <http://www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf> (accessed May, 2015)

4. <http://shinano.com> “Operation and Theory. Stepper Motor”, (In English) available at: http://shinano.com/motors/docs/SKC_stepper_operation.pdf (accessed May, 2015)

5. Ridiko L.I., (2001), “Once a Small Step, a Small Step two”, *Shemotehnika*, No. 6, pp. 13 – 15 (In Russian).

6. Ridiko L.I.m., (2001), “Once a Small Step, a Small Step two”, *Shemotehnika*, No. 7, pp. 26 – 29 (In Russian).

7. Douglas W. Jones “Microstepping of Stepping Motors”, (In English) available at: <http://homepage.cs.uiowa.edu/~jones/step/micro.html> (accessed May, 2015)

8. Mihailov Ye., and Pomerantsev A. MatLab. Rukovodstvo dlya nachinaushih [MatLab. A Beginner's Guide], (In Russian) available at: <http://chemometrics.ru/materials/textbooks/matlab.htm> (accessed May, 2015).

9. Osadchiy V.V., Nazarova E.S., and Tobolkin S.Yu. Laboratornyi stend dlya issledovaniya algoritmov mikroprocessornykh system upravleniya shagovym dvigatelem [Laboratory Stand for Research of Algorithms of Microprocessor Control Systems Stepper Motors], (2014), *Elektromehaniichni i Energozberigauchi Systemy. Shokvartalnyi Naukovo-vyrobnychii Zhurnal*. Kremenchug, Ukraine, *KrNU*, No. 2/2014(26), pp.102 – 108 (In Russian).

10. www.ic.unicamp.br, “The art of Assembly Language”, (In English) available at: <http://www.ic.unicamp.br/~pannain/mc404/aulas/pdfs/Art%20Of%20Intel%20x86%20Assembly.pdf> (accessed May, 2015)



Осадчий

Владимир Владимирович, канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизация промышленных установок Запорожского нац. технич. ун-та. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел. (061) 7698313. E-mail:w.osadchiy@gmail.com



Назарова

Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доц. каф. электропривода и автоматизация промышленных установок Запорожского нац. технич. ун-та. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел. (061) 7698313. E-mail:nazarova16@gmail.com



Тоболкин

Сергей Юрьевич, магистрант каф. электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского нац. технич ун-та. 69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64, тел. 0973580368. E-mail: 6at9lodi@gmail.com