

- 12.1.007-76. – М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1984. – 5 с.
5. Гигиенические критерии оценки и классификации условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряжённости трудового процесса. – М.: Апрохим, 2000. – 162 с.
 6. Цай Ю.Т. Костюм лесного пожарного: испытание ткани с огнезащитными свойствами // Лесное хозяйство. – 2001. – № 6. – С. 41–43.
 3. Orlovskij S.N. Bor'ba s lesnymi, stepnymi i torfjanymi pozharemi. LAMBERT Academic Publishing. – FRG, 2016. – 493 s.
 4. Vrednye veshhestva. Klassifikacija i obshhie trebovanija bezopasnosti GOST 12.1.007-76. – М.: Gos. komitet SSSR po standartam, 1984. – 5 s.
 5. Gigienicheskie kriterii ocenki i klassifikacii uslovij truda po pokazateljam vrednosti i opasnosti faktorov proizvodstvennoj sredy, tjazhesti i naprjazhjonnosti trudovogo processa. – М.: Aprohim, 2000. – 162 s.
 6. Caj Ju.T. Kostjum lesnogo pozharного: ispytanie tkani s ogneshhitnymi svojstvami // Lesnoe hozjajstvo. – 2001. – № 6. – S. 41–43.

Literatura

1. Caj Ju.T. Sistema meroprijatij bezopasnosti zhiznedejatel'nosti lesnyh pozharных. – Krasnojarsk: Platina, 2007. – 358 s.
2. Glavackij G.D., Caj Ju.T. Vozdejstvie temperatury na ljudej, rabotaju-shhih na



УДК 625.096/036:678.492.1

*Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев,
Л.В. Скурихин, Н.А. Сафаров*

УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

*R.T. Yemelyanov, A.P. Prokopyev,
L.V. Skurikhin, N.A. Safarov*

STEPPING MOTOR OPERATION

Емельянов Р.Т. – д-р техн. наук, проф. каф. инженерных систем зданий и сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: ert-44@yandex.ru

Прокопьев А.П. – канд. техн. наук, доц. каф. инженерных систем зданий и сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: prok1@yandex.ru

Скурихин Л.В. – асп. каф. автомобильных дорог и городских сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail:

Yemelyanov R.T. – Dr. Techn. Sci., Prof., Chair of Engineering Systems of Buildings and Constructions, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: ert-44@yandex.ru

Prokopyev A.P. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Engineering Systems of Buildings and Constructions, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: prok1@yandex.ru

Skurikhin L.V. – Post-Graduate Student, Chair of Highways and City Constructions, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: lion@mail.ru

lioon@mail.ru

Сафаров Н.А. – асп. каф. автомобильных дорог и городских сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск. E-mail: cdhx6stsb@mail.ru

Недостатком привода шагового двигателя является возникновение ошибки регулирования. При этом возникает необходимость обеспечения статической и динамической точности процесса позиционирования шагового двигателя. Для проектирования приводов шаговых двигателей необходимо разработать математические модели, позволяющие адекватно описывать переходные процессы, возникающие при изменении режима работы шагового привода. Характер переходного процесса во многом определяется системой управления с ПИД-регулятором. Имитационная модель системы управления с обратной связью шаговым двигателем дорожного принтера разработана в программной среде MATLAB&Simulink. Параметрический синтез регулятора выполнен средствами функционального блока Function Block Parameters: PID Controller среды Simulink. Синтезированные параметры модели непрерывного ПИД-регулятора модели системы управления шаговым двигателем дорожного принтера обеспечивают заданные показатели качества переходного процесса. Время регулирования составляет 0,036 с. Переходный процесс происходит без перерегулирования, что является важным свойством для дорожного принтера. Моделирование динамических процессов в приводе шагового двигателя позволило установить минимальную величину времени срабатывания непрерывного ПИД-регулятора

Ключевые слова: шаговый двигатель, динамическое моделирование, математическая модель, ПИД-регулятор, передаточная функция.

A disadvantage of the drive of the stepping engine is an error of regulation. Thus there is a need in ensuring static and dynamic accuracy of process of stepping engine positioning. It is necessary to develop mathematical models allowing describing adequately transition processes, arising at the

Safarov N.A. – Post-Graduate Student, Chair of Highways and City Constructions, Construction Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk. E-mail: cdhx6stsb@mail.ru

change of operating mode of the step drive for the design of drives of step engines. The nature of transition process in many respects is decided by control system in the PID-regulator. The imitating model of a control system with feedback of the step engine of the road printer was developed in the program MATLAB&Simulink environment. Parametrical synthesis of the regulator was executed by means of functional Function Block Parameters block: Simulink environment PID Controller. The synthesized parameters of model of the continuous PID-regulator of model of a control system of the stepping engine of the road printer provided the set indicators of quality of transition process. The time of regulation made 0.036 s. Transition process was without reregulation, i.e. important property for the road printer. Modeling of dynamic processes allowed installing the minimum size of reaction time of the continuous PID-regulator in the drive of the step engine.

Keywords: stepping motor, dynamic modeling, mathematical model, PID-regulator, transfer function.

Введение. В технике применяется современное высокотехнологическое оборудование на базе шаговых двигателей. Преобразование вращательного движения вала шагового двигателя в поступательное движение подвижной каретки осуществляется ременной передачей [1]. Недостатком привода является возникновение ошибки регулирования. При этом возникает необходимость обеспечения статической и динамической точности процесса позиционирования шагового двигателя [2, 3]. Для проектирования приводов шаговых двигателей необходимо разработать математические модели, позволяющие адекватно описывать переходные процессы, возникающие при изменении режима работы шагового привода. Характер переходного процесса во многом определяется системой управления с ПИД-регулятором [4–6].

Цель работы. Параметрический синтез регулятора системы управления шаговым двигателем.

Методы и результаты исследований. Объектом исследований выбран привод шагового двигателя. Функциональная схема управления приводом шагового двигателя приведена

на рисунке 1.

Модель шагового двигателя (stepper motor) можно описать передаточной функцией второго порядка [7]

$$W_o(s) = \frac{3,9}{0,004s^2 + 0,35s + 1} \quad (1)$$

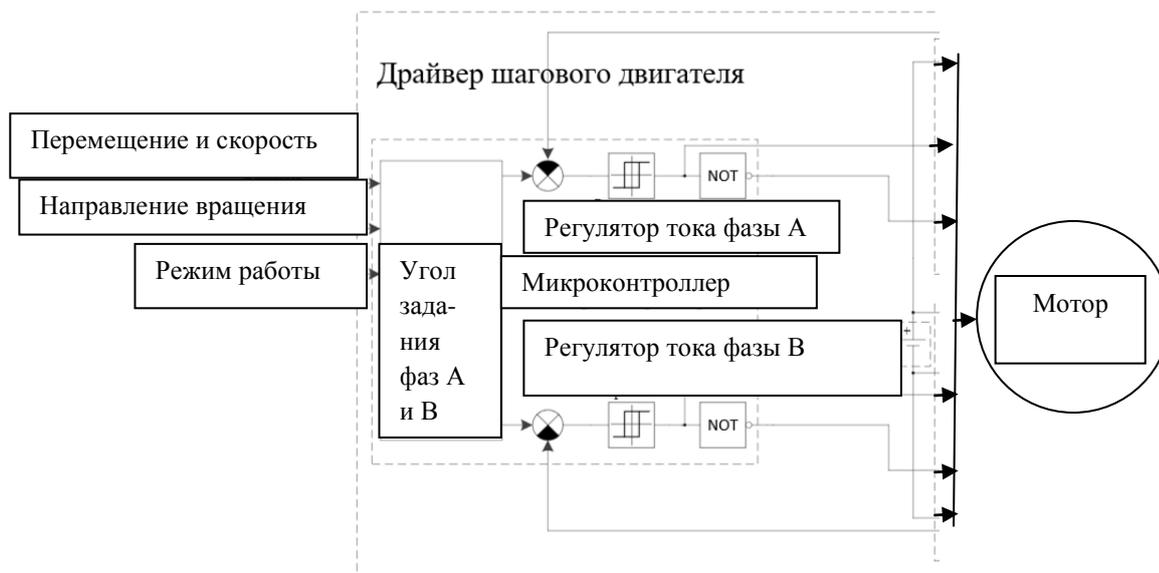


Рис. 1. Функциональная схема управления питанием шагового двигателя

Рассмотрен вариант системы управления с ПИД-регулятором шаговым двигателем. ПИД-регуляторы применяют в системах управления для улучшения как вида переходного процесса, так и точности в установившемся режиме. Передаточная функция идеального ПИД-регулятора $W_{PID}(s)$ имеет вид

$$W_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s, \quad (2)$$

где K_P, K_I, K_D – параметры пропорционального, интегрального и дифференцирующего элемента регулятора соответственно; s – оператор.

Имитационная модель системы управления с обратной связью шаговым двигателем дорожного принтера разработана в программной среде MATLAB&Simulink (рис. 2). Новизна определяется современной технологией 3D печати.

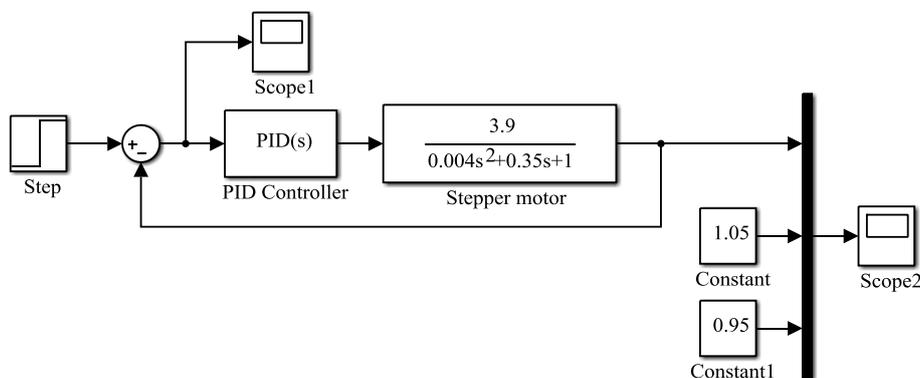


Рис. 2. Имитационная модель системы управления с ПИД-регулятором на языке MATLAB&Simulink

Пример исследования системы управления
Задание показателей качества переходного процесса:

- аperiodический процесс без перерегулирования;
- время регулирования – меньше 0,05 с.

Выполнено исследование устойчивости системы в разомкнутом состоянии на основе критерия Найквиста (рис. 3).

Параметрический синтез регулятора выпол-

нен средствами функционального блока Function Block Parameters: PID Controller среды Simulink. Результаты параметрического синтеза модели непрерывного ПИД-регулятора средствами программы MATLAB&Simulink представлены на рисунке 4.

Результаты моделирования переходного процесса модели системы управления объектом приведены на рисунке 5.

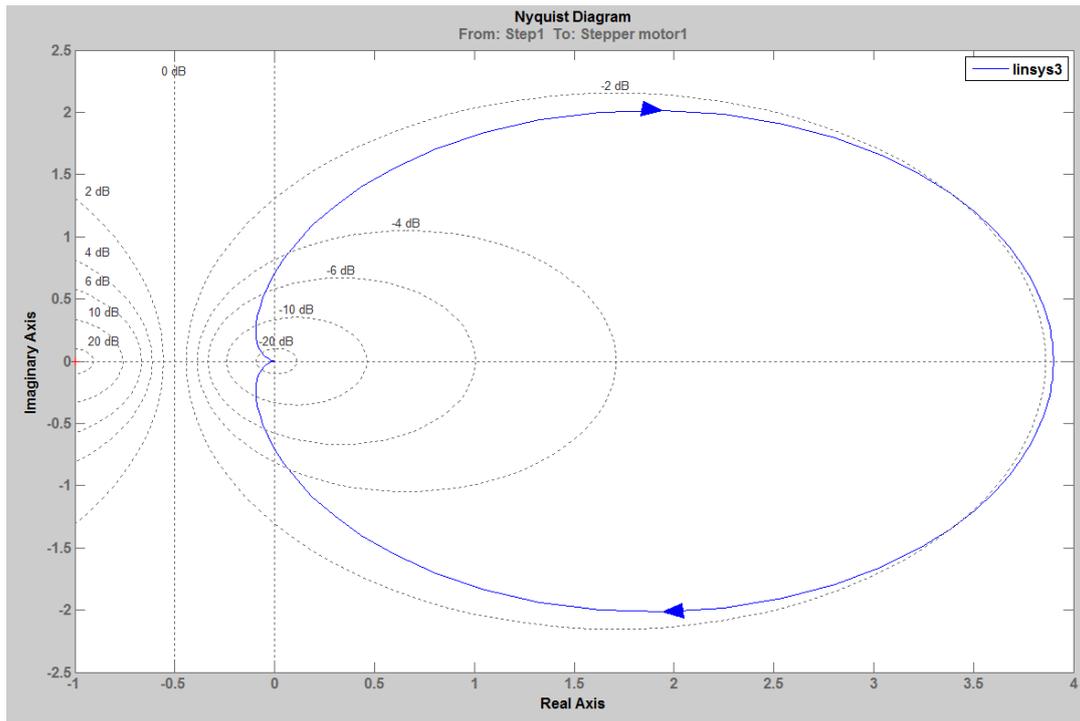


Рис. 3. Годограф Найквиста (система устойчива)

Function Block Parameters: PID Controller

PID Controller

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:
 Continuous-time
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Proportional (P):	4.81723989323288	$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$
Integral (I):	16.7966151378059	
Derivative (D):	0.0250608519060764	
Filter coefficient (N):	75.8604624615361	

Tune...

Рис. 4. Панель функционального блока *Function Block Parameters* среды *Simulink*

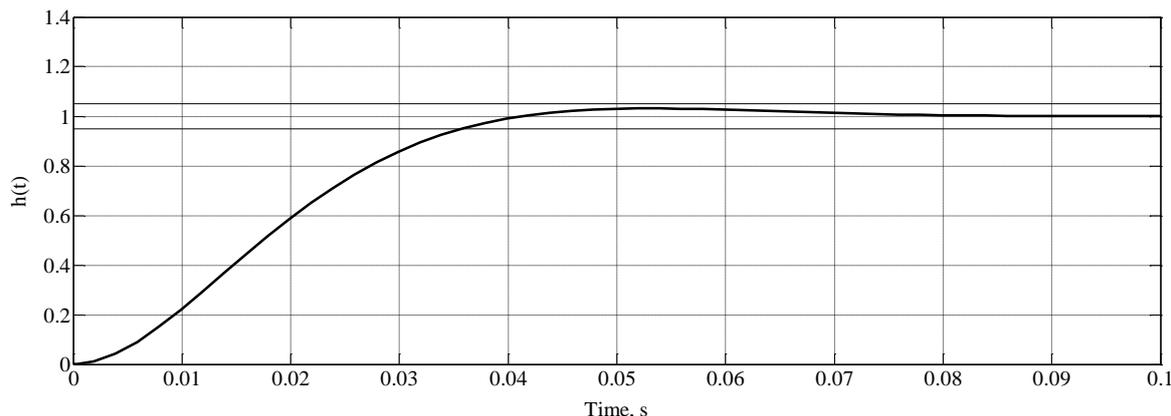


Рис. 5. Переходная характеристика процесса управления

Синтезированные параметры модели непрерывного ПИД-регулятора модели системы управления шаговым двигателем дорожного принтера обеспечивают заданные показатели качества переходного процесса. Время регулирования составляет 0,036 с. Переходный процесс происходит без перерегулирования, что имеет большое значение для приводов систем с высокой точностью движения исполнительных органов и является важным свойством для дорожного принтера.

Заключение. Проведенные исследовательские работы являются этапом теоретических исследований системы управления «Шаговый двигатель» с реализацией моделей объекта средствами имитационного моделирования MATLAB&Simulink. Моделирование динамических процессов в приводе шагового двигателя позволило установить минимальную величину времени срабатывания непрерывного ПИД-регулятора при дифференциальном подключении к шаговому двигателю и выполнении условия, когда время регулирования меньше 0,05 с. Система по критерию Найквиста устойчива.

Литература

1. Емельянов А.В., Шилкин А.Н. Шаговые двигатели. – Волгоград, 2005. – 48 с.
2. Tony R. Kuphaldt. Lessons In Electric Circuits. – V. II. – AC, Sixth Edition, 2007. – 561 с.
3. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / под общ. ред. М.Г. Чиликина. – М.: Энергия, 1971. – 624 с.

4. Ion Boldea. Electric drives. – Lexington, KY, USA, 2005. – 549 с.
5. Ryzhakov I., Nikolenko K. Dreszer. Selection of discretely adjustable pump parameters for hydraulic drives of mobile equipment // TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL. PAN, 2009. – V. IX. – P. 267–276.
6. Скурехин Л.В. Выбор шагового двигателя для дорожного принтера // Мат-лы Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/mn2015/?q=направления-и-секции/строительство-формирование-среды-для-жизни-механизация-и-автоматизация>.
7. Aniket B. Kabde, A. Dominic Savio. Position Control of Stepping Motor // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – V. 3, № 4. – URL: ijareeie.com/upload/2014/april/64_Position.pdf

Literatura

1. Emel'janov A.V., Shilkin A.N. Shagovye dvigateli. – Volgograd, 2005. – 48 s.
2. Tony R. Kuphaldt. Lessons In Electric Circuits. – V. II. – AC, Sixth Edition, 2007. – 561 s.
3. Diskretnyj jelektroprivod s shagovymi dvigateljami / pod obshh. red. M.G. Chilikina. – M.: Energija, 1971. – 624 s.
4. Ion Boldea. Electric drives. – Lexington, KY, USA, 2005. – 549 s.
5. Ryzhakov I., Nikolenko K. Dreszer. Selection of discretely adjustable pump parameters for hydraulic drives of mobile equipment // TEKA

- Kom. Mot. Energ. Roln. – OL. PAN, 2009. – V. IX. – P. 267–276.
6. Skurihin L.V. Vybor shagovogo dvigatelja dlja dorozhnogo printera // Mat-ly Mezhdunar. nauch. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchjonyh. – URL: <http://conf.sfu-kras.ru/mn2015/?q=napravlenija-i-sekcii/stroitelstvo-formirovanie-sredy-dlja-zhizni-mehanizacija-i-avtomatizacija>.
7. Aniket B. Kabde, A. Dominic Savio Position Control of Stepping Motor // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – V. 3, № 4 – URL: ijareeie.com/upload/2014/april/64_Position.pdf.



УДК 621.365.5:621.319.4

А.Н. Качанов, Д.А. Коренков

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛОСКОМ КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

А.Н. Качанов, Д.А. Коренков

ELECTROMAGNETIC FIELD DESCRIPTION IN THE FLAT CAPACITOR AT LENGTHY DIELECTRICS HIGH FREQUENCY HEATING

Качанов А.Н. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. электрооборудования и энергосбережения Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, г. Орел. E-mail: kan@ostu.ru

Коренков Д.А. – ст. преп. каф. электрооборудования и энергосбережения Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, г. Орел. E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

Kachanov A.N. – Dr. Techn. Sci., Prof., Head, Chair of Electric Equipment and Energy Saving, Oryol State University named after I.S. Turgenev. Oryol. E-mail: kan@ostu.ru

Korenkov D.A. – Asst, Chair of Electric Equipment and Energy Saving, Oryol State University named after I.S. Turgenev. Oryol. E-mail: dimas.corenkov@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы высокочастотного нагрева. Исследование посвящено неравномерности нагрева, главной причиной которой является волновой характер распределения электромагнитного поля в материале. Неравномерность повышается с увеличением частоты поля и габаритов материала. Данная проблема особенно актуальна для высокочастотных аппаратов для сушки древесины, длина загрузки которых может достигать 8 м. Для демонстрации неравномерности производятся расчеты распределения напряженности электрического поля на разных частотах. Задача рассматривается в одномерной постановке. В качестве диэлектрика выбрана древесина. Вычисления осуществляются 3 способами математического описания волновых явлений. Первый способ

основывается на системе уравнений Максвелла и после ряда преобразований приводится к косинусоидальному виду. Вторым описывается распределение электромагнитного поля в многослойной среде. Последний способ предложен авторами и включает волновое уравнение Гельмгольца и граничные условия симметрии на свободном конце конденсатора и третьего рода в точке подключения токопровода. Для проверки корректности каждой из рассмотренных математических моделей приводятся ранее полученные экспериментальные данные распределения напряжения по длине электродов рабочего конденсатора. На основе анализа расчетных и экспериментальных результатов делаются выводы, что первый способ наименее точный. Это объясняется пренебрежением коэффициента затухания,