

О параметрическом синтезе регулятора системы управления шаговыми двигателями дорожного принтера

*Р.Т. Емельянов, А.П. Прокопьев, А.С. Климов, К.С. Кравцов,
Е.С. Турышева*

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Аннотация: В статье приведены результаты исследования системы управления шагового двигателя дорожного принтера. Применение шагового двигателя накладывает дополнительные требования к дорожному принтеру по части управления рабочими параметрами. Главным требованием к шаговому двигателю дорожного принтера является обеспечение вращения ротора, на заданный угол, который зависит от режима управления. Дано описание дорожного принтера. Приведены зависимости шагового двигателя как объекта управления. Исследовано на устойчивость системы по Найквисту. Разработана имитационная модель системы управления шаговым двигателем дорожного принтера и приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: дорожный принтер, шаговый двигатель, математическая модель, передаточная функция, моделирование, регулятор.

При проектировании автомобильных дорог важно обеспечить нормативное соответствие разметки и устанавливаемых на дороге знаков, светофоров и других средств организации движения. Согласно стандарту ГОСТ Р 51256-2011 «Разметка дорожная», дорожные знаки выполняются прямой и фигурной формы. Для разметки поверхности автомобильных дорог применяются различные виды оборудования, от ручных мобильных разметчиков до специального оборудования, устанавливаемого на шасси грузовых автомобилей [1]. Недостатками этих технологий является высокая трудоемкость и низкая производительность ручных работ при нанесении фигурных знаков. Нанесение сложных фигурных знаков дорожной разметки может с высокой эффективностью выполняться с использованием автоматизированных дорожных принтеров с системой управления шаговыми двигателями (ШД) [2].

Главным требованием к рабочему процессу шагового двигателя дорожного принтера является обеспечение вращения ротора, на заданный

угол, который зависит от режима управления. Режим полного шага двигателя обеспечивает передачу большего электромагнитного моментом. Однако частота шага ротора ограничивается качеством функционирования применяемой системы управления.

Критерием точности регулирования частоты шага ротора является переходная характеристика, имеющая монотонный характер. Для регулирования шага двигателя могут применяться регуляторы: пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-дифференцирующий (ПД), пропорционально-интегро-дифференцирующий (ПИД). Переходная характеристика П-регулятора выражается колебательным видом с явным перегибом в переходном процессе. Более пологая переходная характеристика при использовании ПИ-регулятора. Монотонный вид характерен для переходной характеристики ПИД-регулятора. В работах [3, 4] приводятся методы параметрической настройки ПИД-регуляторов, подходы к анализу управляющих систем по переходным и частотным характеристикам. Рассматриваются для инженерных приложений вопросы управления нулями и полюсами систем управления [5, 6].

Шаговые двигатели в процессе работы имеют недостатки из-за наличия вибрации, резонанса, высокой температурой, низким коэффициентом полезного действия и точностью позиционирования. Из недостатков привода оборудования с шаговым двигателем можно выделить колебательный процесс при работе, который передается на раму рабочей каретки, что вызывает дополнительные колебания форсунки и уменьшает точность выполнения их движения [7]. Для снижения влияния колебательного процесса шагового двигателя требуется создание эффективной системы управления. Качество управления оценивается по переходной

характеристике САУ привода показателями регулирования, перерегулирования, колебательности.

Решается задача усовершенствования системы управления шаговым двигателем дорожного принтера за счет параметрического синтеза регулятора.

Описание объекта исследования.

Общий вид экспериментального образца дорожного принтера показан на рис. 1. Дорожный принтер выполнен на специальной платформе 1 по размеру дорожной полосы. Платформа 1 имеет электрический привод с шаговым двигателем. На платформе 1 смонтирована поперечная рама 2 с набавляющими рабочей каретки 3. К рабочей каретке 3 крепится вертикальная направляющая 4, на которой установлена форсунка 5 для подачи краски на полотно дороги. На платформе 1 также установлены бак с краской 6 и блок управляющей системы 7. Приводом рабочей платформы служит шаговый двигатель 8. Геометрическая точность печати форсункой составляет ± 10 мм.



Рис. 1. Дорожный принтер

Движущим параметром шагового двигателя является электромагнитный момент (ЭМ), зависящий от напряжения и частоты шага. При работе шагового двигателя с напряжением на 220 В электромагнитный момент возрастает до частоты шага 500 шаг/с. Для ШД, работающего на напряжении 72 В, ЭМ возрастает аналогично как у ШД, работающего на 220 В. С увеличением частоты шага до 5000 шаг/с ЭМ у двигателя на напряжении в 72 В резко падает. Более плавное снижение ЭМ наблюдается у двигателей на 220 В [8].

Дифференциальное уравнение для ШД (stepper-motor) можно записать в следующем виде [8]:

$$J \frac{d^2 \beta}{dt^2} + D \frac{d\beta}{dt} + M_{\text{сопр}} = M_{\text{дв}}, \quad (1)$$

где J – суммарный момент инерции электромеханического привода; β – угол поворота ротора от направления суммарной намагничивающей силы; D – коэффициент демпфирования электромеханической системы; $M_{\text{сопр}}$ – статический момент сопротивления на валу двигателя; $M_{\text{дв}}$ – ЭМ, создаваемый двигателем.

Будем рассматривать класс одноконтурных линейных стационарных систем автоматического управления (САУ), структурная схема которых представлена на рис. 2. Приняты обозначения: u и y – регулируемый вход и регулируемый выход объекта соответственно; g – задание; e – ошибка регулирования: $e = g - y$; f – возмущающее воздействие, приложенное к входу объекта; $W_R(s)$ и $W_0(s)$ – ПФ регулятора и объекта управления соответственно. Считаем, что порядок модели объекта равен n_0 , и его ПФ является правильной рациональной дробью:

$$W_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)}, \quad (2)$$

где $B_0(s)$ и $A_0(s)$ – полиномы вида:

$$A_0(s) = s^{n_0} + \sum_{i=0}^{n_0-1} a_i^0 s^i, B_0(s) = \sum_{j=0}^{m_0} b_j^0 s^j, \quad (3)$$

$m_0 < n_0$; a_i^0, b_j^0 – постоянные коэффициенты, причем $b_0^0 \neq 0$.

Допускаем, что объект вполне управляем и наблюдаем, так что дробь (3) несократимая.

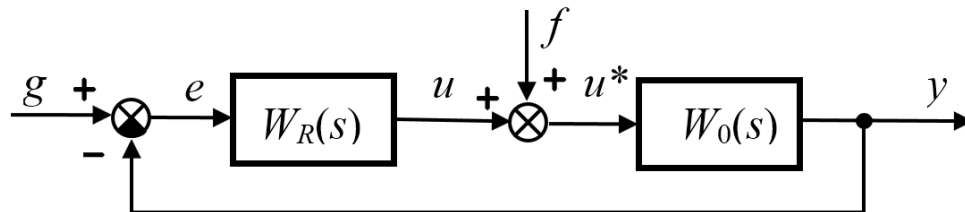


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления

Модель ШД описывается передаточной функцией (ПФ) второго порядка [9]:

$$W_p(s) = \frac{3,839}{0,004 \cdot s^2 + 0,34 \cdot s + 1}. \quad (4)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора $W_{PID}(s)$ имеет следующий вид:

$$W_{PID}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s, \quad (5)$$

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

В работе выполнено исследование устойчивости САУ на основе критерия Найквиста, рис. 3. Система управления устойчива, так как амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы, построенная при частоте $-\infty \leq \omega \leq +\infty$, не охватывает точку с координатами $[-1, 0j]$ (рис. 3).

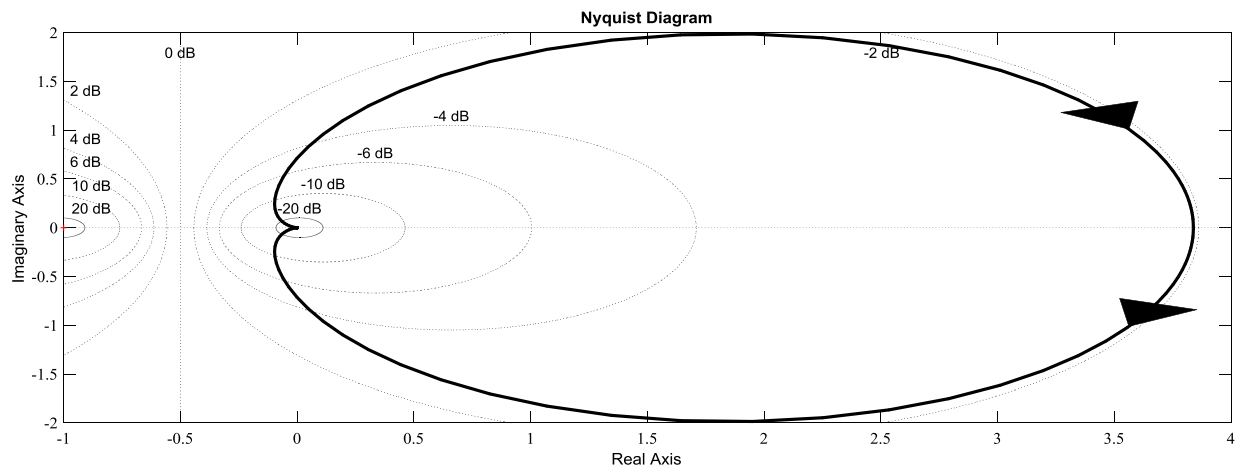


Рис. 3. Годограф Найквиста (система устойчива)

Получена передаточная функция замкнутой системы управления с шаговым двигателем:

$$W_{fsc}(s) = \frac{0,01536 \cdot s^2 + 1,305 \cdot s + 3,839}{0,000016 \cdot s^4 + 0,00272 \cdot s^3 + 0,139 \cdot s^2 + 1,985 \cdot s + 4,839} \cdot (6)$$

С использованием инструментов функционального блока PID Controller библиотеки Simulink программы MATLAB выполнен параметрический синтез ПИ-, ПД-, ПИД-регулятора. Эти инструменты реализуют модели:

ПИ-регулятор

$$W_{PI}(s) = K_P + K_I \cdot \frac{1}{s}, \quad (7)$$

ПД-регулятор

$$W_{PD}(s) = K_P + K_D \cdot \frac{N}{1 + N/s}, \quad (8)$$

ПИД-регулятор

$$W_{PID}(s) = K_P + K_I \cdot \frac{1}{s} + K_D \cdot \frac{N}{1 + N/s}, \quad (9)$$

где N – производный коэффициент фильтра.

Для создания САУ заданы показатели переходного процесса:

- монотонный или апериодический процесс без перерегулирования;
- время регулирования – меньше 0,5 с.

С учетом принятого параметра Continuous-time, местоположение полюса фильтра $s = -N$. В результате параметрического синтеза получены значения коэффициентов регуляторов. Передаточные функции регуляторов с синтезированными параметрами:

$$\begin{aligned} W_{PI}(s) &= 0,0927 + 0,454 \cdot \frac{1}{s}; \\ W_{PD}(s) &= 44,22 + 0,4615 \cdot \frac{51009,42}{1 + 51009,42/s}; \\ W_{PID}(s) &= 0,484 + \frac{1,697}{s} + 0,0146 \cdot \frac{10,123}{1 + 10,123/s}. \end{aligned} \quad (10)$$

Разработана имитационная модель системы управления ШД с ПИД-регулятором на языке программы MATLAB/Simulink, рис. 4.

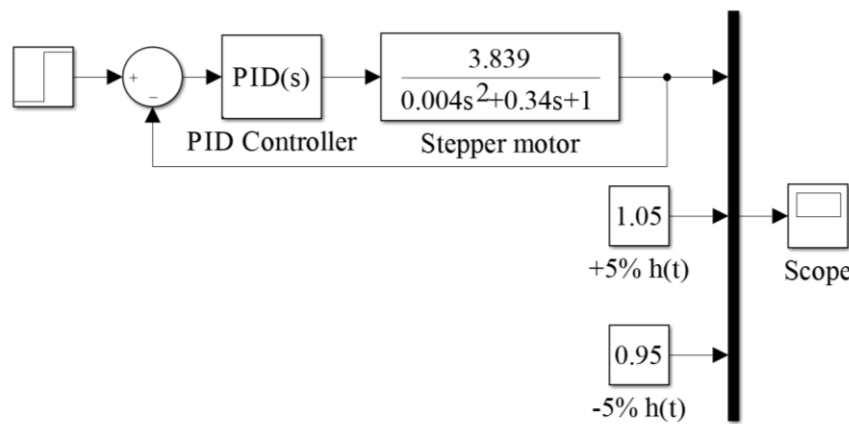


Рис. 4. Имитационная модель системы управления с ПИД-регулятором

В результате моделирования получена переходная характеристика процесса управления системы с различными типами регуляторов, рис. 5.

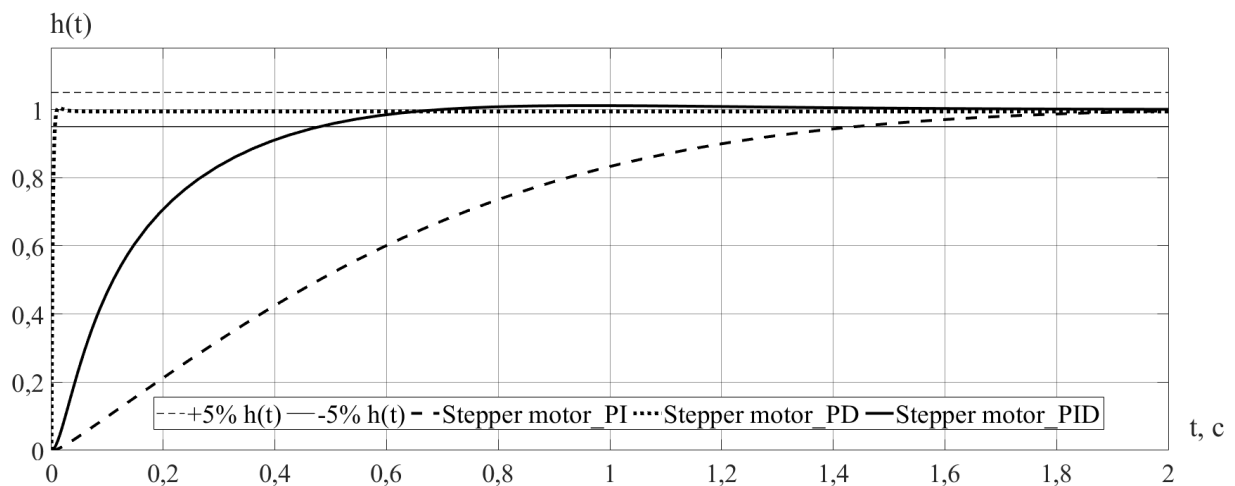


Рис. 5. Переходная характеристика процесса управления системы с различными типами регуляторов

По результатам моделирования наибольшее быстродействие показала САУ с ПД-регулятором, наименьшее – с ПИ-регулятором. Лучшие результаты на соответствие заданию по проектированию показала САУ с ПИД-регулятором. Переходные характеристики САУ с различными типами регуляторов являются монотонными, без перерегулирования. Время регулирования t_p переходной характеристики САУ с ПД-, ПИД регуляторами удовлетворяют заданным условиям на синтез параметров, то есть 0,01 с и 0,48 с, соответственно. Время регулирования переходной характеристики САУ с ПИ-регулятором $t_p = 1,4$ с значительно превышает заданные условия.

Результаты теоретических исследований сопоставлялись с экспериментальными исследованиями [10, 11]. На рис. 6 приведена зависимость спектра тока в течение 15 мин. Пусковой ток ШД имеет колебательный характер. В пусковом режиме величина тока достигает величины 10А, в штатном – величина тока составляет 2А (рис. 6).

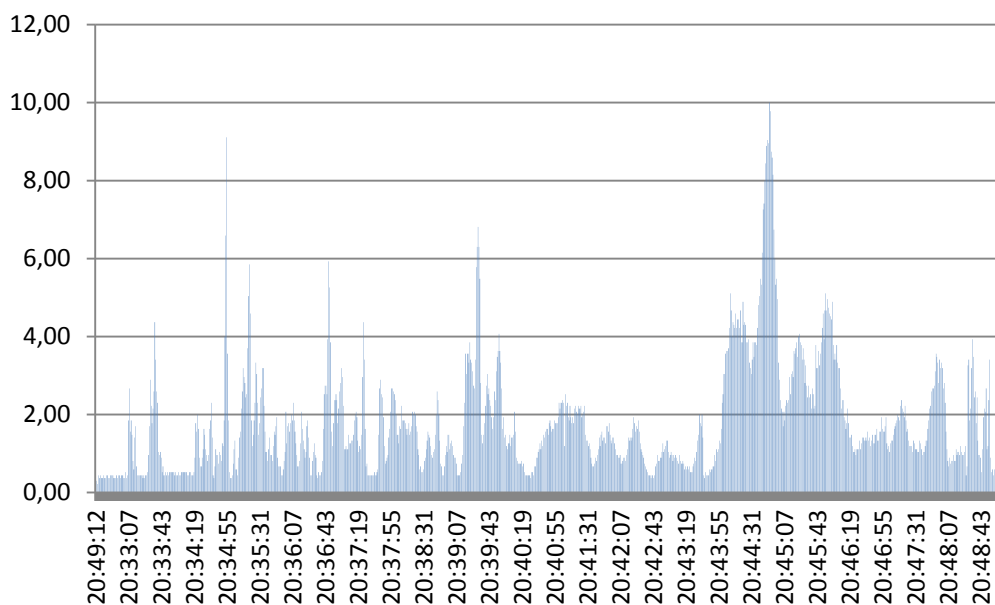


Рис. 6. Экспериментальная зависимость изменения спектра тока при работе шагового двигателя

Применение ПИД-регулятора обеспечивает высокую точность в установившихся режимах, а при определённом соотношении коэффициентов K_p и K_i обеспечивает требуемые показатели и в переходных процессах.

Выводы. В результате исследования определены параметры модели непрерывного ПИ-, ПД- и ПИД-регулятора. Наибольшее быстродействие показала САУ с ПД-регулятором, наименьшее – с ПИ-регулятором. Переходная характеристика САУ шаговым двигателем с ПИД-регулятором обеспечивает заданные показатели качества переходного процесса, без перерегулирования, время регулирования - 0,48 с. Такие результаты необходимы для приводов систем с высокой точностью движения исполнительных органов, что является важным свойством для дорожного принтера.

Литература

1. Bhaiswar A., Francis V. and Raut L. Manual applicator road marking machine: A review. Manual applicator road marking machine: A review // I. J. Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, 2019, 5(2), pp. 1518-1519.

2. Ali M., Mailah M., Moiduddin K., Ameen W., & Alkhalefah H. Development of an Autonomous Robotics Platform for Road Marks Painting Using Laser Simulator and Sensor Fusion Technique // Robotica, 2021, 39(3), pp. 535-556.

3. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd ed.). London: Imperial College Press, 2009. URL: cuxtp.ucoz.ru/pdf/Aidan_O_Dwyer_Handbook_of_PI_and_PID_Controller_Tuning_Rules.pdf.

4. Любишев А.А., Сафаров И.М., Филиппов Е.Л. Конструкция ПИД-регулятора на основе прямого синтеза для нестабильных процессов // Инженерный вестник Дона. 2021. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7071.

5. Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Управление нулями и полюсами в задачах синтеза систем регулирования. Часть I. Компенсационный подход // Мехатроника, автоматизация, управление. 2020, 21(8), с. 443-452.

6. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Method of analytical synthesis of coording control systems // J. Phys.: Conf. Ser., 2021, 2094. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/3/032063/pdf.

7. Ярцев А.В., Синютин С.А. Изучение энергопотребления в модели шагового двигателя // Инженерный вестник Дона, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7283.

8. Красовский А.Б. Способ повышения быстродействия шагового электропривода // Наука и образование, 2013, 9, с. 511-518.

9. Kabde A.B. and Savio A.D. Position Control of Stepping Motor // J. Adv. Res. Elec., Electr. Instr.Eng., 2014, 3, pp. 8974-8981.

10. Emelyanov R.T., Klimov A.S., Olenov I.B., Turysheva E.S., Avlasevich A.I. Investigation of the dynamics of the manipulator drive with a stepper motor // J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1515(4). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/4/042043/pdf.

11. Emelyanov R.T., Prokopenov A.P., Turysheva E.S., Terehova I.I., Pindur S.V. Influence of a 3d printer dynamic characteristics on building products printing accuracy // J. Phys.: Conf. Ser., 2020, 1679(4). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/4/042072/pdf.

References

1. Bhaiswar A., Francis V. and Raut L. I. J. Advance Research, Ideas and Innovations in Technology, 2019, 5(2), pp. 1518-1519.

2. Ali, M., Mailah, M., Moiduddin, K., Ameen, W., & Alkhalefah, H. Robotica, 2021, 39(3), pp. 535-556.

3. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd ed.). London: Imperial College Press, 2009. URL: cyxtp.ucoz.ru/pdf/Aidan_O_Dwyer_Handbook_of_PI_and_PID_Controller_Tuning_Rules.pdf.

4. Lyubishev A.A., Safarov I.M., Filippov E.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7071.

5. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2020, 21(8), pp. 443-452.

6. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Method of analytical synthesis of coording control systems. J. Phys.: Conf. Ser., 2021, 2094. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/3/032063/pdf.

7. Yarcev A.V., Sinyutin S.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7283.



8. Krasovskij A.B. Nauka i obrazovanie, 2013, 9, pp. 511-518.

9. Kabde A.B. and Savio A.D. J. Adv. Res. Elec., Electr. Instr. Eng., 2014, 3, pp. 8974-8981.

10. Emelyanov R.T., Klimov A.S., Olenev I.B., Turysheva E.S., Avlasevich A.I. J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1515(4). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1515/4/042043/pdf.

11. Emelyanov R.T., Prokopev A.P., Turysheva E.S., Terehova I.I., Pindur S.V. J. Phys.: Conf. Ser., 2020, 1679(4). URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/4/042072/pdf.