

## СЕНСОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПРОГРАММНОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ КАНАЛА ЗАДАНИЯ УГЛА ПОВОРОТА ВАЛА

Рассмотрены вопросы методов управления шаговых двигателей в системах позиционирования, проведен сравнительный анализ существующих разомкнутых и замкнутых систем управления, выявлены преимущества и недостатки. Цель исследования: создание универсального, надежного и сравнительно недорогого устройства на базе шагового двигателя для позиционирования перемещаемого объекта в сенсорном режиме. Разработана универсальная программа управления шаговым двигателем в сенсорном режиме с оптимальной программной фильтрацией канала задания угла поворота вала. Реализовано схемное решение на базе программируемого микроконтроллера ATmega 328. Проведены экспериментальные исследования работы шагового двигателя в сенсорном режиме без фильтрации и с программной фильтрацией канала управления поворота вала двигателя, построены переходные процессы перемещения, скорости, тока и сигнала управления при полном цикле работы двигателя. Даны рекомендации по настройке программного фильтра и регулятора положения. Рассчитана линейная математическая модель шагового двигателя и структурная схема замкнутой системы регулирования по отклонению угла поворота вала. В программе Matlab Simulink построены переходные процессы основных регулируемых координат электропривода в сенсорном режиме работы с фильтрацией и без фильтрации канала задания угла отклонения вала двигателя. Проведен частотный анализ разработанной замкнутой системы управления электроприводом по управляющему воздействию на предмет устойчивости и качества фильтрации помехи управляющего сигнала. Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники в виде учебного лабораторного стенда для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Наладка мехатронных комплексов и систем».

**Ключевые слова:** шаговый двигатель, программируемый микроконтроллер, программа управления, сенсорный режим, программный фильтр, мехатронная система, драйвер.

### ВВЕДЕНИЕ

Шаговые двигатели (ШД) имеют ряд преимуществ по сравнению с двигателями постоянного тока. Они точны в позиционировании и хорошо держат момент на малых оборотах, а также имеют продолжительный срок службы за счет отсутствия щеточно-коллекторного аппарата и изолированных от окружающей среды обмоток [1-3]. Перечисленные положительные свойства ШД определили их сферу применения – устройства точного позиционирования (станки с точной подачей резца, например гравировальные и фрезерные, управление манипуляторами в робототехнике, различные автоматы и т.п.) [4-6].

Сенсорный (следающий) режим управления (ШД) широко внедрен в роботизированные медицинские или лабораторные манипуляторы типа механическая рука [7]. Мехатронные системы такого типа позволяют выполнять задачи захвата и точного позиционирования объекта в пространстве. Сравнительный анализ управления ШД показал, что реализация таких проектов в жизнь довольно затратное мероприятие. И дело не только в дороговизне механического оборудования, но и в создании оптимальных и надежных программ для микроконтроллера, управляющего ШД [8].

Анализ различных систем управления ШД, вкуче с различными алгоритмами управления, показал повышение энергопотребления с усложнением программы управления и использования замкнутых цепей управления с внешними датчиками обратных связей [9]. Реализация сложных алгоритмов работы и контроля ошибок позиционирования ШД заставляет применять

дорогостоящие высокопроизводительные микропроцессорные платформы, покупать лицензию на программное обеспечение для их программирования [10, 11]. Вместе с тем снижается их надежность.

Исходя из вышеизложенного анализа, можно сделать вывод о том, что в настоящее время существует потребность в сравнительно недорогих, универсальных бездатчиковых системах позиционирования на базе ШД, в частности сенсорный с малым энергопотреблением.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДЛЯ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Точное позиционирование объекта в сенсорном режиме работы манипулятора зависит от следующих факторов и задач:

- масса позиционируемого объекта не должна превышать допустимую, чтобы исключить пропуск шагов от чрезмерного статического момента на валу ШД;
- управляющий сигнал должен фильтроваться от помех аппаратным и программным фильтрами, иначе неизбежны колебания объекта;
- ограничение ускорения и случайных рывков позиционируемого объекта.

### ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОГРАММНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Программная фильтрация аналогового сигнала управления может быть реализована по следующим алгоритмам [12, 13]:

1. Среднеквадратичное сглаживание по двум измерениям:

$$U_{y(i)} = \frac{U_{y(i)} + U_{y(i+1)}}{2}, \quad (1)$$

где  $U_{y(i)}$  и  $U_{y(i+1)}$  – значения сигнала управления через промежутки времени;

2. Экспоненциальное сглаживание по двум измерениям:

$$U_{y(i)} = KU_{y(i)} + (1 - K)U_{y(i+1)}, \quad (2)$$

где  $(0 < K < 1)$  – коэффициент глубины фильтрации;

3. Сглаживание по трём измерениям с использованием весовых коэффициентов

$$U_{y(i)} = K1 \cdot U_{y(i-1)} + K2 \cdot U_{y(i)} + K3 \cdot U_{y(i+1)}, \quad (3)$$

где  $(K1 + K2 + K3) = 1$  – весовые коэффициенты фильтрации.

Первый алгоритм фильтрации (1) лишь усредняет колебания сигнала, уменьшая их амплитуду. Наиболее оптимальным по качеству, быстродействию и удобству настройки является программный фильтр с алгоритмом экспоненциального сглаживания по двум измерениям (2). Изменяя коэффициент  $K$  в заданном диапазоне от 0 до 1, можно настраивать глубину фильтрации. Описанный алгоритм особенно эффективен в устранении высокочастотных помех, засоряющих информационный низкочастотный сигнал. Третий алгоритм (3) так же эффективен, как и второй (2), но более сложный в реализации и настройке, а значит, будет занимать больше времени на вычисления процессором.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве управляющей системы ШД применен восьмиразрядный программируемый микроконтроллер ATmega 328 (ArduinoUNO) со встроенным USB-отладчиком.

Функциональная схема лабораторной установки представлена на рис. 1, она включает в себя:

- униполярный двигатель ШДПБМГ 200-265, данные которого приведены в табл. 1;
- лабораторный блок питания БП;
- драйвер ШД;
- микроконтроллер ArduinoUNO (ATmega 328);
- датчик тока ACS712ELC;
- потенциометр  $R4 = 10$  (кОм) в качестве регулятора управляющего сигнала.

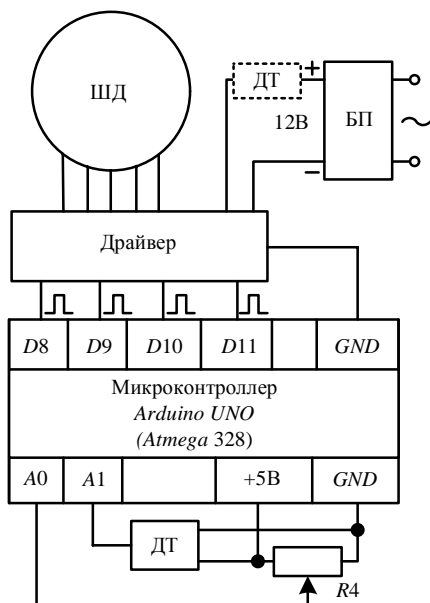


Рис. 1. Функциональная схема лабораторной установки

Таблица 1

Данные униполярного ШДПБМГ 200-265

Характеристика	Значение
Угол поворота за 1 шаг, град.	1,8
Номинальная скорость ШД, об/мин	200
Количество выводов, шт.	6
Напряжение питания, В	12
Сопротивление обмоток, Ом	70
Потребляемый ток, А	0,17

Схема драйвера ШД на базе MOSFIT-транзисторов представлена на рис. 2, а фото лабораторной установки – на рис. 3. Драйвер изготовлен самостоятельно, выбраны транзисторы IRF 3205 ( $VT1$ ) с напряжением затвора  $U_3 = 3-12$  В, защитные диоды Шоттки SB5H100-E3/54 ( $VD1$ ). По цепи управления транзистора: токоограничивающий резистор  $R1 = 100$  Ом, подтягивающий резистор  $R2 = 10$  кОм. Коммутационный фильтр реализован параллельной  $RC$ -цепью:  $R3 = 200$  Ом,  $C1 = 3300$  пФ.

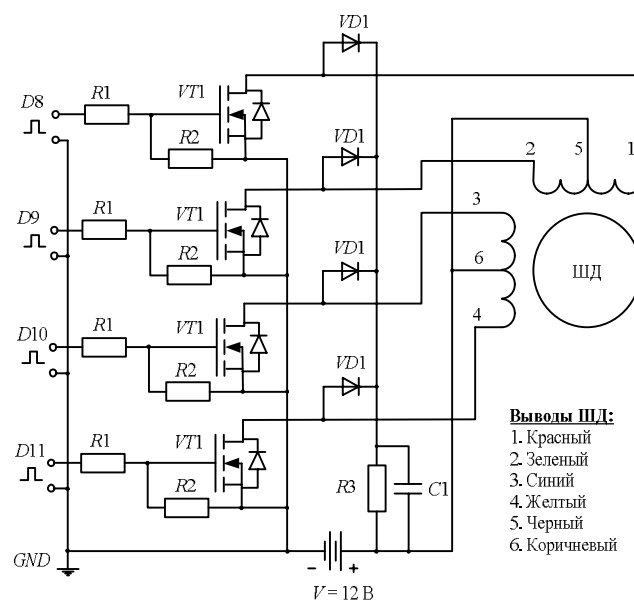


Рис. 2. Схема драйвера ШД

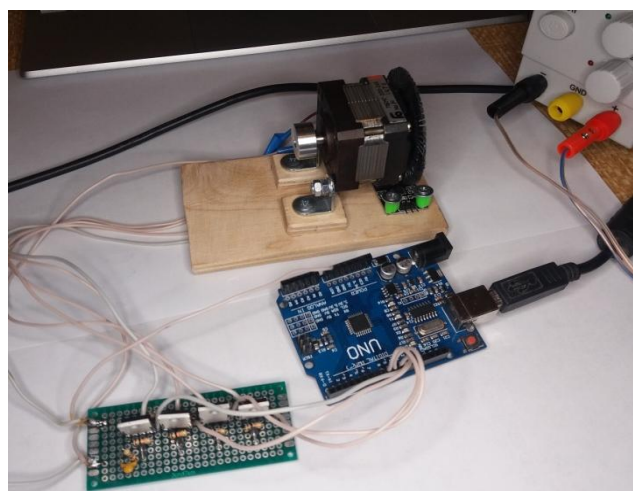


Рис. 3. Лабораторная установка для программного управления ШД

Ниже приведен код основного тела программы с комментариями в программе Arduino 1.8.10 для управления ШД в сенсорном режиме:

```
// Включение библиотеки по управлению ШД
#include<Stepper.h>
// Установка числа шагов ШД при обороте на 360°
#define STEPS 200
// Установка номеров дискретных выходов D8, D9,
D10, D11 для управления ШД
Stepper stepper(STEPS, 8, 9, 10, 11);
// Обозначение A0, как вход для управляющего
сигнала потенциометра R4
#define potent_pin 0
// Обозначение A1, как вход для датчика тока
#define dt_pin 1
// Объявление переменных
float val1;
float val2;
float val3 = 0.0;
float val4 = 0.0;
float val5 = 0.0;
// Обозначение коэффициента П-регулятора ks
float ks = 1;
// Обозначение коэффициентов фильтрации k и n
float k = 0.15;
float n = 0.13;
int previous = 0;
// Установка делителя числа оборотов
int d = 6;
void setup() {
// Установка номинальной скорости ШД 200
(об/мин)
stepper.setSpeed(200);
// Установка программного осциллографа
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
// Считывание управляющего сигнала с потенциометра R4
val1 = analogRead(potent_pin);
// Считывание и обработка сигнала с датчика тока
val2 = analogRead(dt_pin)*70 + 30200;
// Программная фильтрация сигнала управления
val3 = k * val1 + (1 - k) * val3;
val4 = n * val1 + (1 - n) * val4;
// Вычисление скорости двигателя
val5 = (val3 - val4) * 10;
// Вычисление и установка числа шагов двигателя
stepper.step((val3 - previous)/d);
previous = ks*val3;
// Вывод на программный осциллограф:
// - управляющего сигнала с потенциометра
Serial.print(val1);
Serial.print(',');
// - фильтрованного сигнала управления
Serial.print(val3);
Serial.print(',');
// - скорости двигателя
Serial.print(val5);
Serial.print(',');
// - тока двигателя
Serial.println(val2);}
```

Разработанная система по технической реализации следит за управляющим сигналом с выхода потенциометра R4 и пропорционально поворачивает вал двигателя. Угол отклонения можно градуировать переменной  $d$  перед загрузкой программы в контроллер.

Сигнал с потенциометра  $U_y$  без программной фильтрации, засоренный помехой в его составе, неизбежно вызовет «дребезг» вала ШД – положение вала и скорость двигателя ( $n$ ) постоянно колеблется относительно установившегося значения (рис. 4).

Графики переходных процессов ШД с программной фильтрацией (рис. 5) отражают полный цикл работы системы слежения с отклонением вала двигателя на  $360^\circ$  по и против часовой стрелки.

Программный фильтр успешно решает проблему «дребезга», сглаживая сигнал управления  $U_{yф}$ , который, в свою очередь, можно считать пропорциональным углу поворота вала, так как механическая характеристика ШД абсолютно жесткая, подобно синхронному двигателю. Это позволяет косвенно вычислить скорость двигателя  $n$  дифференцированием фильтрованного сигнала задания угла поворота вала  $U_{yф}$ .

Ограничение ускорения двигателя можно установить уменьшением максимального числа оборотов функцией «stepper.setSpeed(200);», так как приводной момент ШД, как и синхронного, тем больше, чем ниже скорость двигателя.

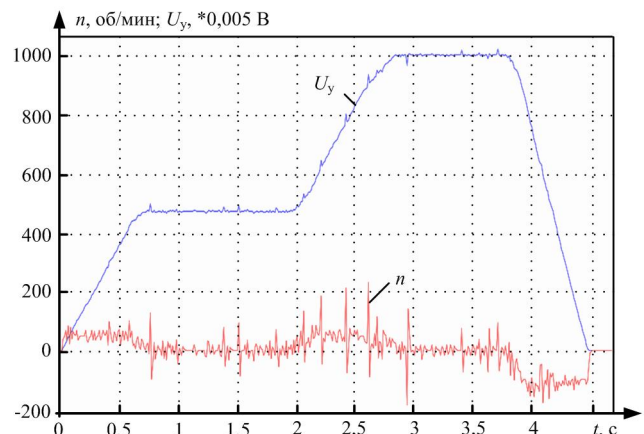


Рис. 4. Переходные процессы ШД без программной фильтрации:  $n$  – скорость;  $U_y$  – напряжение управления

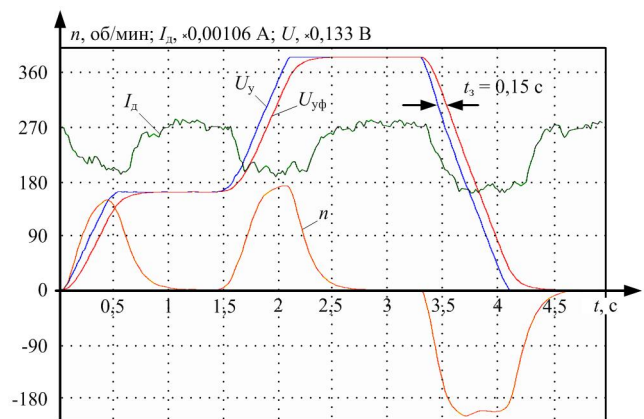


Рис. 5. Переходные процессы ШД с программной фильтрацией:  $n$  – скорость;  $U_y, U_{yф}$  – напряжение управления до и после фильтрации;  $I_d$  – ток

В программном коде реализована замкнутая САУ с П-регулятором «stepper.step((val3 – previous)/d);». Настройку П-регулятора можно осуществлять переменной ks «previous = ks\*val3;», который, в свою очередь, увеличивает или уменьшает разность между сигналами в последующем такте сравнения двух сигналов. Настройка полного угла поворота производится переменной d. Для 360° переменная d=6, таким образом можно регулировать коэффициент редукции (мультипликации) САУ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ШД

Математическое моделирование ШД для исследования динамических режимов угловой скорости и угла поворота вала возможно по упрощенной линейной модели, позволяющей оценивать в динамике основные координаты привода (скорость, угол поворота вала) и проводить частотный анализ [14]. Линейная структурная схема ШД с драйвером (ДР), а также ее преобразованная версия представлена на рис. 6.

Преобразование структурной схемы ШД принято с допущениями: драйвер (ДР) описан безинерционным звеном, т.к. время открытия полевого транзистора  $t_r = 101 \cdot 10^{-9}$  с. Передаточная функция  $W_c(p)$ , описывающая угловую скорость ШД, представлена колебательным звеном:

$$W_c(p) = \frac{1/c}{\frac{R_a}{c^2} J T_a p^2 + \frac{R_a}{c^2} J p + 1}, \quad (4)$$

где  $c$  – поток;  $R_a$  – сопротивление якоря;  $J$  – момент инерции двигателя;  $T_a$  – постоянная времени якоря.

Угол поворота вала ШД  $\theta$  вычисляется интегрированием угловой скорости  $\omega$  с коэффициентом редукции (мультипликации)  $i$ .

Построение и настройка контура регулирования угла поворота вала ШД, а также синтез регулятора, возможно на основе анализа частотных характеристик объекта регулирования, [15]. После расчета коэффициентов структурной схемы объекта регулирования (рис. 7, а), основанного на паспортных данных ШД, в программе Matlab построены частотные характеристики скорости  $L_1(\omega)$  и угла поворота вала ШД  $L_2(\omega)$  (рис. 7, б). Полоса пропускания частот угловой скорости ШД ограничена паспортными данными  $\omega_{max} = 21$  рад/с при номинальном моменте. При увеличении частоты напряжения  $U_d$  выше  $\omega_{max}$ , амплитуда скорости уменьшается. В реальности ШД начинает выпадать из синхронизма и «терять» шаги, что также проверено экспериментально. Рассчитанная передаточная функция объекта регулирования (4) в диапазоне рабочих частот проявляет свойства аperiодического звена.

Частотная характеристика основной регулируемой координаты – угла поворота вала  $L_2(\omega)$  – в зоне рабочих частот имеет наклон -20 дБ/дек с последующим увеличением наклона -40 дБ/дек. Синтез регулятора замкнутой системы для такого типа ЛАЧХ объекта регулирования, предполагает ПИД-структуру. Реализация ПИД-регулятора на программируемом контроллере возможна, но это потребует немалых

ресурсов микропроцессора. Изначально такой задачи не ставилось. В программе Matlab промоделирована замкнутая САУ с П-регулятором угла отклонения вала ШД с фильтрацией канала задания напряжения  $U_d$  и без фильтрации, (рис. 8). Построены частотные характеристики исследуемых САУ (рис. 9) и переходные процессы (рис. 10), идентичные экспериментальным на реальной установке.

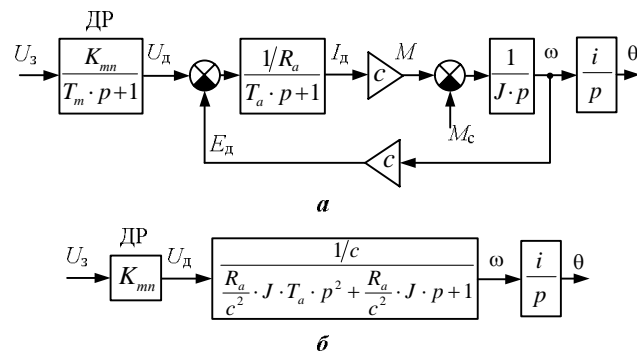


Рис. 6. Линейная структурная схема ШД: а – исходная, б – преобразованная

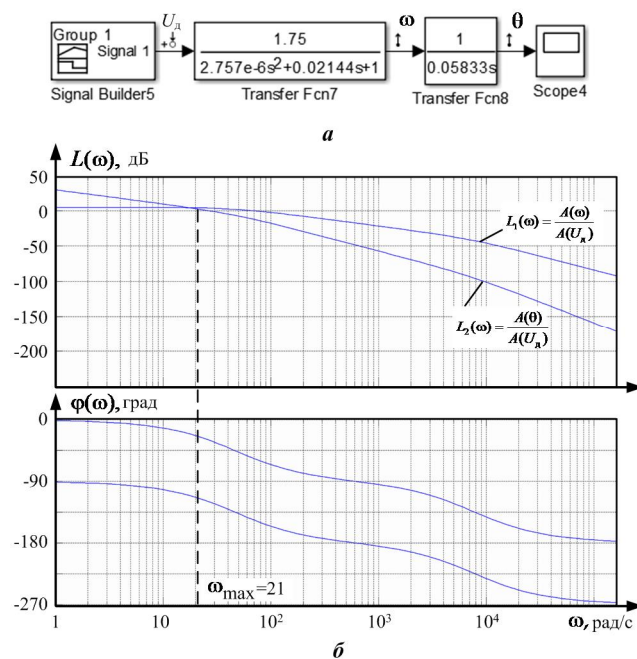


Рис. 7. Структурная схема объекта регулирования (ШД) (а), ЛАЧХ и ЛФЧХ скорости и угла поворота ШД (б)

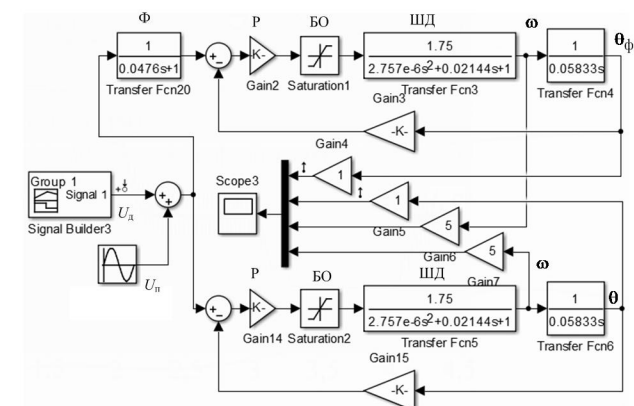


Рис. 8. Структурная схема замкнутой САУ угла поворота вала ШД

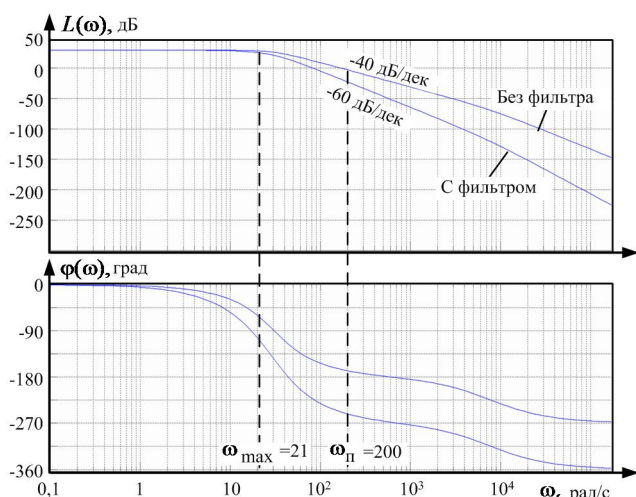


Рис. 9. ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутой САУ ШД с фильтрацией и без фильтрации управляющего канала

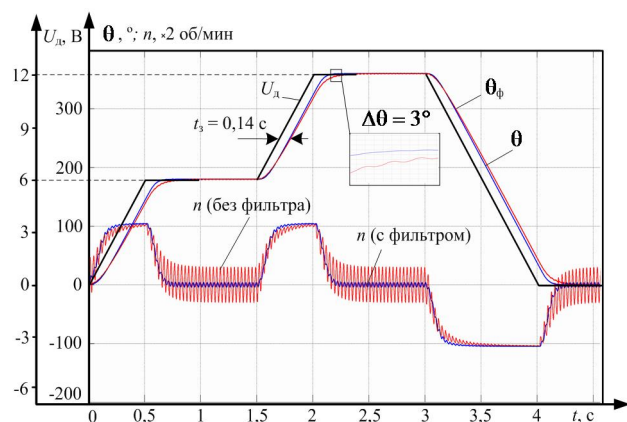


Рис. 10. Переходные процессы замкнутой САУ ШД с фильтрацией и без фильтрации управляющего канала

К сигналу задания прибавляется синусоидальный сигнал, моделирующий помеху  $U_n$  с частотой  $\omega_n = 200$  рад/с и амплитудой  $U_n = 1$  В. Частота сопряжения фильтра  $\Phi$  устанавливается равной частоте  $\omega_{max} = 21$  рад/с, чтобы не уменьшать полосу пропускания САУ. Коэффициент обратной связи угла поворота вала рассчитан для одного полного оборота на  $360^\circ$  для  $U_d = 12$  В.

Анализ частотных характеристик замкнутой САУ ШД показывает устойчивую работу системы в рабочем диапазоне частот от 0 до 21 рад/с (см. рис. 9). Причем программный фильтр не ограничивает полосу рабочих частот ШД, но эффективно уменьшает амплитуду помехи уже при частоте  $\omega_n = 200$  рад/с, что видно на переходных процессах (см. рис. 10). Общая задержка по времени сигнала угла  $\theta$  от  $U_d$  составляет  $t_3 = 0,14$  с. Ошибка регулирования угла поворота вала САУ без фильтрации канала управления составляет  $\Delta\theta = 3^\circ$ . Данное отклонение превышает один шаг двигателя в  $1,8^\circ$ . Фильтрация канала сигнала управления устраняет данную ошибку («дребезг»).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система управления обладает следующими преимуществами, по сравнению с известными системами позиционирования:

- возможность работы без использования датчика положения ротора в качестве реализации обратной связи по углу отклонения вала ШД, что значительно уменьшает капитальные затраты изделия и увеличивает его надежность;

- оптимизированный алгоритм работы программы управления ШД в сенсорном режиме работы позволяет разгрузить процессор и использовать микроконтроллер с небольшой производительностью, а значит, более дешевый с малым энергопотреблением;

- использование оптимизированного программного фильтра по каналу управления полностью исключает «дребезг» вала ШД, что подтверждается экспериментальными исследованиями и моделированием САУ.

Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники в виде учебного лабораторного стенда для проведения лабораторных занятий по дисциплине «Наладка мехатронных комплексов и систем».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективные методы управления шаговыми двигателями / С.П. Крючков, Р.Д. Каримов, И.И. Ямалов, А.С. Горбунов // Вестник современных исследований. 2018. №10.1(25). С. 313-315.
2. Севцов И.А., Тюрин С.А., Трусов В.А. Сравнительный анализ методов управления шаговым двигателем // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2020. Т. 2. С. 103-104.
3. Elsodany N.M., Rezeki S.F., Maharem N.A. Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor // AEJ - Alexandria Engineering Journal. 2011. Vol. 50(2). Pp. 127-136. doi: 10.1016/j.aej.2010.08.002
4. Киященко А.В. Управление шаговыми двигателями манипулятора в режиме реального времени // Решетневские чтения. 2016. Т. 1. С. 563-564.
5. Лабораторный стенд для изучения микропроцессорной системы управления параллельной работой шаговых двигателей / М.Д. Хорошевский, А.М. Макаров, Н.С. Гришанкова, Т.В. Андронов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 12(207). С. 87-90.
6. Intelligent speed control of hybrid stepper motor considering model uncertainty using brain emotional learning / A.M. Yazdani, A. Mahmoudi, S.A. Mahmoudzadeh, P. Ghanouni, S. Mahmoudzadeh, S. Buyamin // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. 2018. Vol. 41. No 2. Pp. 95-104. doi: 10.1109/CJECE.2018.2849357
7. Горячев О.В., Степochкин А.О. Электрический следящий привод высокой точности на основе гибридного шагового двигателя с векторным управлением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 147-157. doi: 10.24411/2071-6168-2020-00026
8. Анализ направлений аппаратно-программных разработок по управлению шаговыми двигателями для использования в учебном процессе вузов / К.Д. Боскебеев, Т.Х. Куаншкалиев, Ж.К. Алимсеитова, В.Н. Ничков, М.А. Ильменский, И.В. Колесников // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 4(36). С. 111-127.
9. Кузнецов И.Ю. Статистический анализ энергопотребления устройства управления шаговыми двигателями // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 7-2(63). С. 91-94.

10. Пашенко А.Н., Копычев М.М. Система управления положением динамического объекта на подвижной плоскости // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова. 2019. Т. 1. С. 28-30.
11. Каменев А.Р., Зрюмова А.Г. Разработка инструментов для управления драйверами шаговых двигателей в микропроцессорных системах // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции. Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2018. С. 192-195.
12. Чирков Д.Г., Стоцкая А.Д. Методы программной фильтрации данных для работы с ультразвуковыми датчиками в области робототехники // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2020). СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. Т. 1. С. 155-158.
13. Фокин Г.А. Моделирование формирующего и согласованного фильтров // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 2. С. 77-94. doi: 10.31854/2307-1303-2021-9-2-77-94
14. Регулирование угловой скорости шагового двигателя / Р.Т. Емельянов, С.А. Аринчин, Е.С. Турьшева, В.В. Макеев // Вестник КрасГАУ. 2017. № 11(134). С. 141-146.
15. Фомин Н.В. Системы подчиненного регулирования координат в электроприводах постоянного тока: учебное пособие. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2010. 199 с.

Поступила в редакцию 30 ноября 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### STEPPER MOTOR SENSOR CONTROL WITH PROGRAM FILTERING OF THE SHAFT ROTATION ANGLE REFERENCE CHANNEL

Sergey A. Linkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, xx\_linkov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0774-3910>

Oleg S. Malakhov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, osmalahov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2716-004X>

This paper is devoted to the positioning systems of stepper motors control methods. Comparative analysis of the existing open- and closed-loop systems was carried out; their advantages and disadvantages are identified. The research purpose is the design of the universal reliable and cheap device based on stepper motor for the moving object sensor mode positioning. A stepper motor universal control program with optimal filtering of the shaft rotation angle reference channel was developed. A schematic diagram based on ATmega328 microcontroller was designed. The experimental research of the sensor mode operating stepper motor with and without program filtering was conducted. Transient processes of motion, speed, current and reference signal graphics were built. A linear mathematical model of a stepper motor and a block diagram of a closed-loop control system for the shaft rotation angle deviation have been calculated. The main adjustable coordinates transient processes of the electric drive operating in the sensor mode are built with Matlab Simulink with filtering and without filtering the motor shaft deflection angle specifying channel. A frequency analysis of the developed closed-loop electric drive control action control system is carried out for the stability and quality of filtering interference of the control signal. The research results are applied to the studying process of the Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University as a laboratory stand for Adjustment of mechatronic complexes and systems course.

**Keywords:** stepper motor, programmable microcontroller, control program, sensor mode, program filter, mechatronic system, driver.

#### REFERENCES

1. Kryuchkov S.P., Karimov R.D., Yamalov I.I., Gorbunov A.S. Advanced Stepper Motor Control Methods. *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of Contemporary Research], 2018, no 10.1(25), pp. 313-315. (In Russian)
2. Sevtsov I.A., Tyurin S.A., Trusov V.A. Comparative Analysis of Stepper Motor Control Methods. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"], 2020, vol. 2, pp. 103-104. (In Russian)
3. Elsodany N. M., Rezekha S. F., Maharem N. A. Adaptive PID control of a stepper motor driving a flexible rotor. *A EJ - Alexandria Engineering Journal*, 2011, vol. 50, no. 2, pp. 127-136. doi: 10.1016/j.aej.2010.08.002
4. Kiyashchenko A. V. Real-time manipulator stepper motors control. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev readings]. Krasnoyarsk, Reshetnev University Publ., 2016, pp. 563-564. (In Russian)
5. Khoroshevskiy M.D., Makarov A.M., Grishankova N.S., Andronov T.V. Laboratory stand for studying the microprocessor control system for parallel operation of stepper motors. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Volgograd State Technical University], 2017, no 12(207), pp. 87-90. (In Russian)
6. Yazdani A. M., Mahmoudi A., Mahmoudzadeh S. Intelligent speed control of hybrid stepper motor considering model uncertainty using brain emotional learning [et al.]. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 95-104. doi: 10.1109/CJECE.2018.2849357
7. Goryachev O.V., Stepochkin A.O. High precision electric servo drive based on hybrid vector stepper motor. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical sciences], 2020, no. 4, pp. 147-157. doi 10.24411/2071-6168-2020-00026. (In Russian)
8. Boskebeev K.D., Kuanshkaliev T.Kh., Alimseitova Zh.K., Nichkov V.N., Il'menskiy M.A., Kolesnikov I.V. Analysis of the directions of hardware and software developments for the control of stepper motors for use in the educational process of universities. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2016, no. 4(36), pp. 111-127. (In Russian)

9. Kuznetsov I.Yu. Statistical analysis of power consumption of a stepper motor controller. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremenom mire* [Actual scientific research in the modern world], 2020, no. 7-2(63), pp. 91-94. (In Ukrainian)
10. Pashchenko A. N., Kopychev M. M. Control system for the position of a dynamic object on a moving plane. *Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova* [Vavilov Youth School-Seminar on Management Problems in Technical Systems]. Saint Petersburg, ETU "LETI" Publ., 2019, vol. 1, pp. 28-30. (In Russian)
11. Kamenev A.R., Zryumova A.G. Development of tools for controlling stepper motor drivers in microprocessor systems. *Programmno-tekhnicheskoe obespechenie avtomatizirovannykh sistem: Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Software and hardware support of automated systems: Materials of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference], Barnaul, AltSTU Publ., 2018, pp. 192-195. (In Russian)
12. Chirkov D.G., Stotskaya A.D. Software data filtering methods for working with ultrasonic sensors in the field of robotics. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [International Conference on Soft Computing and Measurements]. Saint Petersburg, ETU "LETI" Publ., 2020, vol. 1, pp. 155-158. (In Russian)
13. Fokin G.A. Modeling Shaping and Matched Filters. *Informatsionnye tekhnologii i telekommunikatsii* [Information technology and telecommunications], 2021, vol. 9, no. 2, pp. 77-94. doi: 10.31854/2307-1303-2021-9-2-77-94 (In Russian)
14. Emelyanov R.T., Arinchin S.A., Turisheva E.S., Makevich V.V. Stepper motor angular speed control. *Vestnik KrasGAU* [The Bulletin of KrasGAU], 2017, no. 11(134), pp. 141-146. (In Russian)
15. Fomin N.V. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya koordinat v elektroprivodakh postoyannogo toka* [Slave coordinate control systems in DC electric drives]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2010. 199 p. (in Russian)

---

Линьков С.А., Малахов О.С. Сенсорное управление шаговым двигателем с программной фильтрацией канала задания угла поворота вала // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1(54). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-4-10)

Linkov S.A., Malakhov O.S. Stepper Motor Sensor Control with Program Filtering of the Shaft Rotation Angle Reference Channel. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 1(54), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-4-10)

---