

ПОДБОР ДРАЙВЕРОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ КАНАЛОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

И.Г. Дроздов, Е.А. Ищенко, А.А. Болдырев, Е.Д. Егорова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследуется предельная скорость вращения шагового двигателя, которая может быть получена при дроблении шагов на драйверах A4988, DRV8825 и LV8729. Полученные результаты иллюстрируются анализом кода управления, формируемым на Raspberry Pi5 с использованием языка Python и библиотекой RpiMotorLib. Исследование производилось на экспериментальной установке, моделирующей нагрузку и перемещения по программно-управляемой оси подачи установки для лазерной обработки. В процессе исследования был выявлен закон определения скорости перемещения нагрузки с использованием шарико-винтовой передачи. При выполнении измерений были определены скоростные показатели двигателя, токовые характеристики при разных дроблениях шага, температурные показатели. Сформулированы рекомендации для обоснованного подбора моделей драйверов для шаговых двигателей, используемых в приводах подачи станочного оборудования, позволяющих осуществить точные позиционирующие движения, при этом обеспечив на быстрых ходах возможно высокие скорости. Полученные результаты позволяют определить возможность использования моделей драйверов для осуществления движения линейных продольной и поперечной подач при перемещении рабочих органов в устройстве лазерной очистки каналов охлаждения камеры сгорания вблизи критического сечения жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) после лазерной обработки элементов «искусственной шероховатости»

Ключевые слова: искусственная шероховатость, лазерная размерная обработка, лазерная очистка, шаговый двигатель, шарико-винтовая передача, драйвер шагового двигателя, A4988, DRV8825, LV8729

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Специальная установка с ЧПУ» (№ FZGM-2025-0007)

Введение

Перспективным методом нанесения «искусственной шероховатости» в каналах охлаждения ЖРД является размерная лазерная обработка [1]. Однако, в процессе испарения металла образуется металлосодержащая копоть, оседающая возле обработанной поверхности (рис. 1), особенно при обработке вблизи стенок канала. Хорошие результаты по очистке изделий из бронзовых сплавов от подобных загрязнений показывают методы лазерной очистки [2].

Для модернизации лазерного оборудования с целью применения для обработки каналов ЖРД целесообразным является добавление модуля лазерной очистки с автоматическим программно-управляемым перемещением рабочих органов. С учетом требований к точности позиционирования, нагрузкам, скорости (и как следствие, производительности обработки) для обеспечения движения подач выбраны шарико-винтовые передачи с шаговыми двигателями.



Рис. 1. Образцы с «искусственной шероховатостью», нанесенной лазерным методом

Для управления шаговыми двигателями требуется ряд контроллеров, которые обеспечат передачу требуемых сигналов для запитывания обмоток шагового двигателя. Стандартная схе-

ма реализации управления шаговым двигателем включает в свой состав: контроллер (компьютер), драйвер шагового двигателя и сам двигатель [3]. Особенности современных драйверов шаговых двигателей является то, что они позволяют обеспечивать высокую точность позиционирования двигателя путем дробления шага, а также достижения высокой скорости вращения вала шагового двигателя [3, 4]. Однако достижение максимальной скорости шагового двигателя приводит к снижению максимального крутящего момента двигателя, что снижает предельную нагрузку, которую может перемещать двигатель [5]. Поэтому особый интерес вызывает предельно возможная скорость двигателя, которая может быть реализована с использованием драйверов шаговых двигателей для перемещения малых нагрузок. В случае системы лазерной очистки элементов камеры ЖРД нагрузка определяется массой рабочих органов, а максимальная скорость является залогом высокой производительности процесса.

Существует ряд исследований, направленных на определение характеристик наиболее распространенных драйверов шаговых двигателей семейства A4988, которые хорошо себя зарекомендовали в конструкциях станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Большинство таких исследований направлены на исследование драйверов, которые подключаются к одноплатному компьютеру на базе Arduino [6-8], однако вычислительные мощности такого решения ограничены, поэтому особый интерес вызывают исследования, которые направлены на реализацию управления шаговыми двигателями с более мощных контроллеров, например, AVR или Raspberry Pi [9-10]. В данной работе исследуется предельная скорость шагового двигателя, которая может быть достигнута драйверами A4988, DRV8825 и LV8729 при управлении шаговым двигателем Nema 17. На основе проведенных исследований можно сделать вывод о применимости драйверов для управления двигателями в приводах подачи системы лазерной очистки.

Конструкция установки

Для проведения эксперимента была составлена схема, которая состояла из следующей схемы: главный контроллер Raspberry Pi 5, который передает сигнал на драйвер шагового двигателя, обеспечивающий управление Nema17 17HS4023, вращающего шариковую передачу (ШВП) SFU1204 550 мм

1204 (диаметр 12 мм, шаг 4 мм) с опорами BK/BF10 и муфтой D19L25. Запитывание драйвера выполнялось лабораторным источником питания Rigol DP2031 с ограничением по напряжению 12 В и током 2 А, чего достаточно для выбранной модели шагового двигателя. Вид экспериментальной установки приводится на рис. 2.

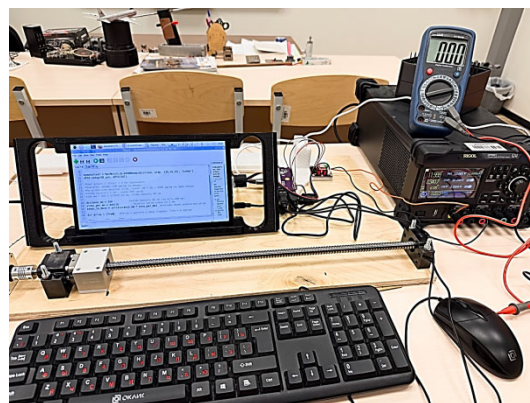


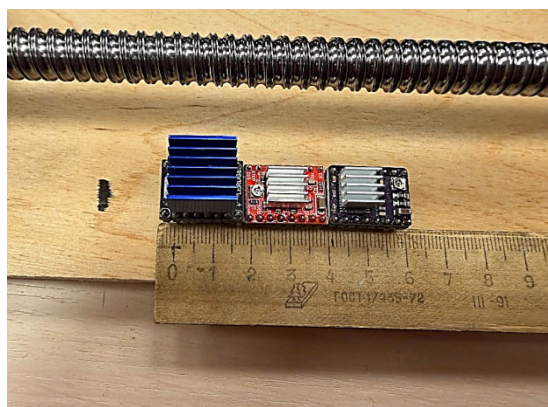
Рис. 2. Исследуемая установка из ШВП и компьютера-контроллера

В процессе исследования рассматривались драйверы шагового двигателя A4988, DRV8825, LV8729, которые используются во многих ЧПУ-станках и 3D-принтерах. Основные характеристики драйверов приводятся в табл. 1.

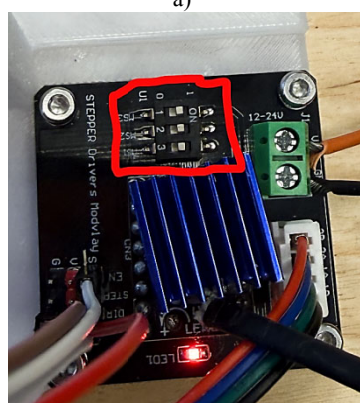
Таблица 1
Характеристики драйверов шаговых двигателей

Драйвер	A4988	DRV8825	LV8729
Производитель	Allegro A4988	TI DRV8825	ONS LV8729
Напряжение питания, В	8...35	8.2...45	6...36
Шаг (мин)	1/16	1/32	1/128
Максимальный ток, А	1 (2 с охлаждением)	1.5 (2.5 с охлаждением)	1.5

Как видно, драйверы реализуют разное дробление шага, что определяет предельную точность позиционирования вала двигателя. Определение уровня дробления шага двигателя определяется путем установки уровней сигналов на входе драйвера MS1-MS3 – рис. 3. Дробные значения шагового двигателя, которые могут быть сформированы драйвером, приводятся в табл. 2.



а)



б)

Рис. 3. Исследуемые драйверы: а) виды драйверов LV8729, A4988, DRV8825; б) установка уровней входов MS1-MS3 (выделены)

Таблица 2

Дробление уровней поворота вала шагового двигателя Nema17

Тип дробления шага	Угол поворота двигателя на шаг, °	Количество шагов на оборот двигателя
Полный (Full)	1.8	200
Половина (Half)	0.9	400
1/4	0.45	800
1/8	0.225	1600
1/16	0.1125	3200
1/32	0.05625	6400
1/64	0.028125	12800
1/128	0.0140625	25600

Как видно, с ростом дробления наблюдается кратный рост количества шагов, необходимый для поворота двигателя на полный оборот, а следовательно, будет снижаться и максимальная скорость работы двигателя, чем формируется баланс на этапе проектирования точности и скорости. Так как для управления двигателем используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 5, то следует уделить внимание программной части, которая реализует управление драйвером и шаговым двигателем.

Анализ кода-управления шагового двигателя

Для управления шаговым двигателем были использованы язык программирования Python и открытая библиотека RpiMotorLib. В процессе реализации управления с использованием Raspberry Pi необходимо определить, какие выходы GPIO будут отвечать за управление драйвером. Для работы двигателя необходимо использование трех выходов, которые определяют направление (DIR), дают команду на включение (EN) и передают сигналы шагов (STEP):

direction = 21 # Контакт, который определяет направление движения

step = 20 # Контакт, который подает импульсы и управляет драйвером

EN_pin = 16 # Контакт включения драйвера

Следующим шагом определяется тип драйвера и двигателя, а также тип деления шага:

```
mymotortest = RpiMotorLib.A4988Nema(direction, step, (19,19,19), "A4988")
```

где в скобках определяется по порядку – контакт направления (*direction*), шага (*step*), комбинация положения ключей деления шага MS1-3 (в нашем случае все контакты были выбраны низкого уровня «0,0,0»), определение типа драйвера "A4988" (или DRV8825, LV8729).

Следующая строка устанавливает контакт включения как выходной тип:

```
GPIO.setup(EN_pin, GPIO.OUT)
```

Далее в код передается команда на вращение двигателя на нужное количество шагов (в нашем случае для перемещения на 300 мм):

```
distance_mm = 300 # дистанция перемещения в 300 мм
```

```
steps_per_mm = 50 # количество шагов для перемещения на 1 мм
```

```
steps_to_move = int(distance_mm * steps_per_mm) # количество шагов
```

Далее определяем направление вращения:

```
dir_array = [True] # False = крутится в одну сторону, True = в другую
```

Следующим шагом устанавливается низкий уровень на выходе EN, что включает драйвер, так как этот выход инвертирован:

```
GPIO.output(EN_pin, GPIO.LOW)
```

Далее выполняется вращение двигателя:

```
for i in range(1):
```

```
    mymotortest.motor_go(dir_array[i],
```

```
        "Full", # тип деления Full, Half, 1/4, 1/8 и т.д.
```

```
        steps_to_move, # количество шагов
```

```
        0.0005, # задержка между шагами (с) – скорость вращения
```



```
False, # подробная телеметрия в консоль
0.0005) # задержка запуска двигателя
time.sleep(1)
```

С учетом данного кода в режиме полного шага было исследовано, как формируется скорость вращения шагового двигателя. С учетом формируемого сигнала скорости перемещения каретки определяется по формуле:

$$v = \frac{L_{dist}}{N_{step} \cdot 2t_{d1}}, \quad (1)$$

где L_{dist} – дистанция перемещения ШВП;
 N_{step} – количество шагов, необходимых для перемещения на L_{dist} ;

t_{d1} – задержка между шагами (с) (в нашем случае по коду выше 0.0005 с);

v – скорость перемещения каретки по ШВП.

Или же если получить значение в оборотах в минуту:

$$RPM = \frac{60}{N_{RPM} \cdot 2t_{d1}}, \quad (2)$$

где RPM – количество оборотов в минуту;
 $N_{RPM} = \frac{N_{eng}}{P}$, N_{eng} – количество шагов двигателя на оборот без деления, P – дробление шага двигателя драйвером.

Для оценки базовых характеристик скорости и зависимости от параметра t_{d1} был исследован драйвер A4988, при выставленных уровнях напряжения $V_{ref} = 1.025$ В ($I_{cur} = 0.5$ А). В табл. 3 приводятся характеристики драйвера A4988 при управлении параметром t_{d1} (режим шага полный). На рис. 4 приводятся графические зависимости основных параметров скорости от задержки шага.

Таблица 3
 Скоростные режимы драйвера A4988
 на полном шаге

t_{d1} , с	v_{calc} , мм/с	v_{meas} , мм/с	I_{cur} , А	RPM_{meas} , об/мин
0.0010	10.00	09.35	0.57	140
0.0009	11.10	10.28	0.58	154
0.0008	12.50	11.47	0.63	172
0.0007	14.29	12.96	0.62	194
0.0006	16.67	14.77	0.60	221
0.0005	20.00	17.19	0.54	258
0.0004	25.00	20.79	0.47	312
0.0003	33.33	26.59	0.40	399

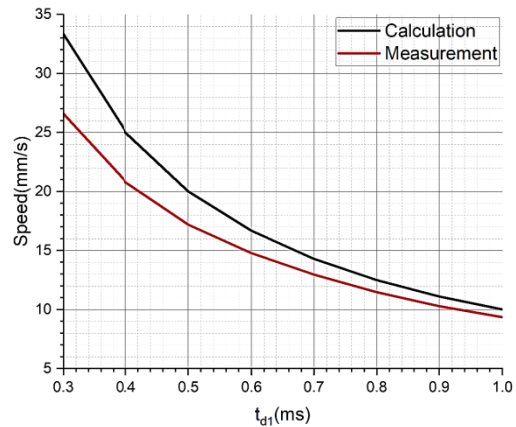
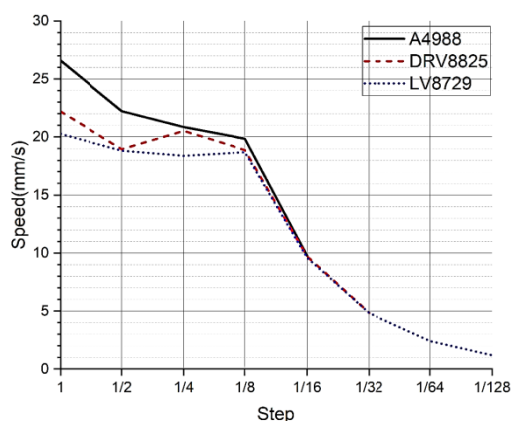


Рис. 4. Зависимость скорости движения нагрузки ШВП от задержки между шагами

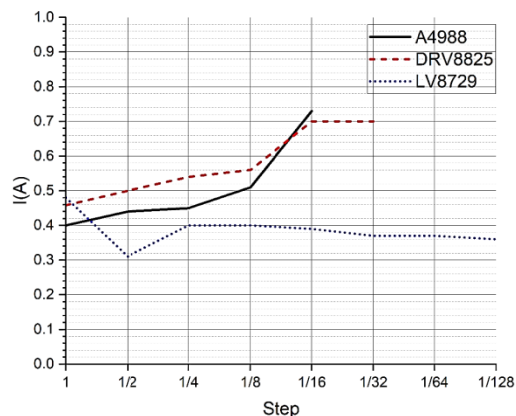
Таким образом, видно, что полученная на практике скорость вращения шагового двигателя ниже теоретического (расчетного) значения, что может быть вызвано скоростью реакции секундомера при измерениях, а также сопротивлением линии при вращении и задержками сигналов. На основании полученных значений особый интерес вызывает наивысшая скорость, которая может быть получена при дроблении шагов драйверов.

Экспериментальные измерения предельных скоростей вращения вала при дроблении шага

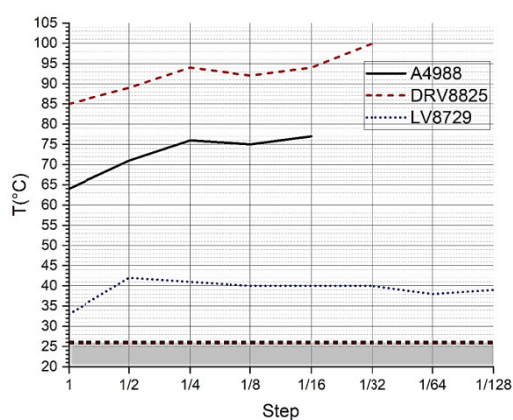
В процессе исследования рассматривались три драйвера, а на винт ШВП была установлена нагрузка 113 грамм. Измерения выполнялись до момента, когда вращение двигателя прекращалось и не позволяло перемещать нагрузку по ШВП. В табл. 4-6 приводятся основные характеристики, полученные при измерении разных драйверов, а на рис. 5 приводятся основные графические зависимости параметров от величины дробления шага.



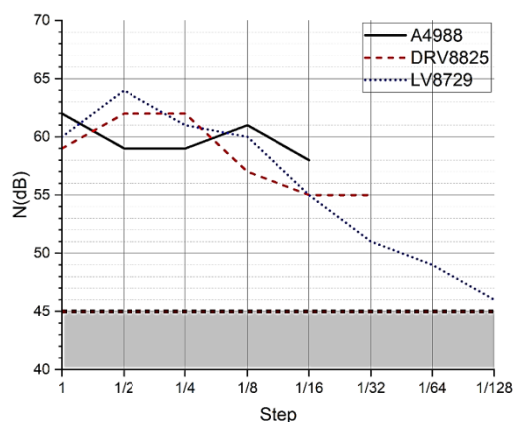
а) зависимость максимальной скорости от шага



в) зависимость тока от шага



б) зависимость температуры от шага



г) зависимость шума от шага

Рис. 5. Зависимость характеристик системы драйвер/двигатель от дробления шага

Таблица 4

Максимальные скоростные режимы драйвера A4988 при дроблении шагов

Положение ключей			Дробление шага	v_{meas} , мм/с	t_{d1} , мс	I_{cur} , А	T_d , °C	N, дБ
MS1	MS2	MS3						
0	0	0	Full	26.59	0.300	0.40	64	62
1	0	0	Half	22.22	0.130	0.44	71	59
0	1	0	1/4	20.86	0.055	0.45	76	59
1	1	0	1/8	19.85	10^{-3}	0.51	75	61
1	1	1	1/16	09.79	$5 \cdot 10^{-9}$	0.73	77	58

Примечания:
 Фоновый шум 45 дБ
 Температура окружающей среды 26°C
 $V_{ref}=1.025$ В
 T_d – температура радиатора драйвера шагового двигателя
 Направление движения вперед True

Таблица 5

Максимальные скоростные режимы драйвера DRV8825 при дроблении шагов

Положение ключей			Дробление шага	v_{meas} , мм/с	t_{d1} , мс	I_{cur} , А	T_d , °C	N, дБ
MS1	MS2	MS3						
0	0	0	Full	22.19	0.400	0.458	85	59
1	0	0	Half	18.95	0.250	0.500	89	62
0	1	0	1/4	20.53	0.060	0.540	94	62
1	1	0	1/8	18.87	$2 \cdot 10^{-3}$	0.560	92	57
0	0	1	1/16	09.72	$5 \cdot 10^{-9}$	0.700	94	55
1	1	1	1/32	04.85	$5 \cdot 10^{-9}$	0.700	100	55

Примечания:
 Фоновый шум 45 дБ
 Температура окружающей среды 26°C
 $V_{ref}=0.689$ В
 T_d – температура радиатора драйвера шагового двигателя
 Направление движения вперед True

Таблица 6

Максимальные скоростные режимы драйвера LV8729 при дроблении шагов

Положение ключей			Дробление шага	v_{meas} , мм/с	t_{d1} , мс	I_{cur} , А	T_d , °С	N, дБ
MS1	MS2	MS3						
0	0	0	Full	20.26	0.45	0.48	33	60
1	0	0	Half	18.82	0.20	0.31	42	64
0	1	0	1/4	18.38	0.07	0.40	41	61
1	1	0	1/8	18.69	10^{-3}	0.40	40	60
0	0	1	1/16	09.60	10^{-9}	0.39	40	55
1	0	1	1/32	04.83	10^{-17}	0.37	40	51
0	1	1	1/64	02.42	10^{-37}	0.37	38	49
1	1	1	1/128	01.20	10^{-77}	0.36	39	46

Примечания:
 Фоновый шум 45 дБ
 Температура окружающей среды 26°C
 $V_{ref}=0.925$ В
 T_d – температура радиатора драйвера шагового двигателя
 Направление движения вперед False

Полученные результаты показывают, что повышение дробления шага приводит к снижению скорости вращения центрального вала, однако при снижении шага удается повысить точность позиционирования, а также уменьшить шум работы системы. При использовании драйвера LV8729 можно заметить, что предельная скорость вращения достигается при уровне тока, который близок к уровню 0.4 А. Особое внимание стоит также уделить температурным режимам драйверов. Видно, что драйвер DRV8825 работает в очень высокотемпературном режиме, что также можно заметить и по уровню тока, который нарастает вместе с температурой, при этом предельная температура кристалла по информации производителя составляет 150°C, при этом для A4988 такая температура равна 85°C, как и для LV8729. Поэтому в случае выбора драйвера DRV8825 необходимо продумывать возможность активного охлаждения драйвера, чтобы обеспечить рассеяние тепла.

На основании всех полученных результатов можно отметить, что в случае необходимости работы только в режимах Full и Half оптимальным выбором является драйвер A4988, но в случае необходимости увеличения дробления шагов следует выбирать драйвер LV8729, который обеспечивает большее деление шага, меньшую температурную нагрузку, а также меньший ток потребления при близких скоростях.

Заключение

В статье был произведен анализ предельных скоростных режимов работы шагового двигателя при использовании разных драйверов с возможностью дробления шагов. Проведенные исследования показывают, что выбор драй-

веров шаговых двигателей следует выполнять на основе анализа нескольких показателей: нагрев драйвера, шумность двигателя, возможность обеспечения минимального дробления шага, при этом стоит помнить, что с уменьшением микрошага при дроблении снижается также и скорость вращения винта, но при этом значительно повышается точность. Полученные результаты показали, что лучшими характеристиками обладает драйвер LV8729, однако в случае использования полного или половинного микрошага можно использовать драйвер A4988, который позволяет обеспечить высокую скорость перемещения, а также малые температуры нагрева, особенно по сравнению с драйвером DRV8825. Таким образом, выбор драйвера управления двигателями подачи устройства лазерной очистки элементов камеры сгорания ЖРД определяется исходя из требований к точности позиционирования с обеспечением наибольшей скорости быстрых ходов на основе предложенных рекомендаций.

Литература

1. Патент № 2618594 С Российская Федерация, МПК В23Н 5/00, В23Н 7/38. Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки : № 2016110651 : заявл. 22.03.2016 : опубл. 04.05.2017 / А.Ю. Рязанцев, С.С. Юхневич, В.А. Поротиков ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» (ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»). – EDN ZTWKDR.
2. Патент № 2619692 С1 Российская Федерация, МПК В08В 7/00. Способ лазерной очистки металлов : № 2016120022 : заявл. 24.05.2016 : опубл. 17.05.2017 / М.В. Волков, В.М. Журба, В.М. Митякин, Н.Л. Орлов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное предприятие Волоконно-Оптического и Лазерного Оборудования». – EDN HJILPI.
3. Barabas Z.A., Morar A. High Performance Microstepping Driver System based on Five-phase Stepper

Motor (sine wave drive) // *Procedia Technology*, 2014. Vol. 12. Pp. 90-97.

4. Мирзаев Р.А., Халковский Ф.А., Смирнов Н.А. Управление биполярным шаговым двигателем с помощью контроллера // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2010. Т. 1. № 6. С. 365-366.

5. Nasr M., Singh A., Moore K.J. Smart Automatic Modal Hammer: Predictor–Corrector Approach for Accurate Excitation of Dynamical Systems // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2024. 12(S1). pp. 1045–1063.

6. Tunable and scalable production of nanostar particle platforms for diverse applications using an AI-integrated automated synthesis system / A.J. Canning [et al.] // *Journal of Materials Science*. 2025. 60(8). pp. 3768-3785.

7. Мельниченко В.О. Контроль шагового двигателя с помощью драйвера шагового двигателя и платы Arduino // *Теоретические и прикладные аспекты естественно-*

научного образования в эпоху цифровизации: материалы III Междуна. науч.-практ. конф., Брянск, 11–12 апреля 2024 года. Брянск: Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, 2024. С. 83-88.

8. Севцов И.А., Тюрин С.А., Трусков В.А. Сравнительный анализ драйверов для шагового двигателя // *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2020. Т. 2. С. 102-103.

9. Wardhana A.W., Nugroho D.T. Stepper motor control with DRV 8825 driver based on square wave signal from AVR microcontroller timer // *In AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2094. p. 020015.

10. Optimized compound control strategy for high-speed 3D printing: enhancing surface quality and printing precision / R. Zhou [et al.] // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2025. 47(8).

Поступила 24.10.2025; принята к публикации 24.11.2025

Информация об авторах

Дроздов Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, декан факультета машиностроения и аэрокосмической техники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dig@cchgeu.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru

Болдырев Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетных двигателей, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Егорова Елена Дмитриевна – лаборант-исследователь, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: reus.kaf@cchgeu.ru

MOTOR CONTROL DRIVERS SELECTION FOR COOLING CHANNEL CLEANING AFTER LASER TREATMENT

I.G. Drozdov, E.A. Ishchenko, A.A. Boldyrev, E.D. Egorova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the maximum rotation speed of a stepper motor that can be obtained with step fractionation on the A4988, DRV8825, and LV8729 drivers is investigated. The obtained results are illustrated by the analysis of the control code generated on a Raspberry Pi5 using the Python language and the RpiMotorLib library. The study was conducted on an experimental setup simulating loading and movements along the software-controlled feed axis of a laser processing machine. During the study, a law for determining the load movement speed using a ball screw was identified. During the measurements, the speed indicators of the motor, current characteristics at different step fractionation, and temperature indicators were determined. Recommendations are formulated for a substantiated selection of driver models for stepper motors used in feed drives of machine tools, enabling precise positioning movements while ensuring the highest possible speeds at high speeds. The obtained results make it possible to determine the possibility of using driver models to implement the movement of linear longitudinal and transverse feeds when moving working bodies in a device for laser cleaning of combustion chamber cooling channels near the critical section of a liquid rocket engine (LRE) after laser processing of “artificial roughness” elements

Key words: artificial roughness, laser dimensional processing, laser cleaning, stepper motor, ball screw transmission, stepper motor driver, A4988, DRV8825, LV8729

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment «Special CNC Installation» (no. FZGM-2025-0007)

References

1. Ryazantsev A.Yu., Yukhnovich S.S., Porotikov V.A. “Method of obtaining artificial roughness on the surface of a part by a combined processing method” (“Способ получения искусственной шероховатости на поверхности детали комбинированным методом обработки”), patent of RF no. 2618594, IPC B23H 5/00, B23H 7/38 no. 2016110651, appl. 22.03.2016, publ. 04.05.2017, applicant FSUE “GKNPC named after M.V. Khrunichev”, EDN ZTWKDR.

2. Volkov M.V., Zhurba V.M., Mitkin V.M., Orlov N.L. "Method of Laser Cleaning of Metals" ("Sposob lazernoy ochkistki metallov"), patent of RF no. 2619692 C1, IPC B08B 7/00, no. 2016120022, appl. 24.05.2016, publ. 17.05.2017, applicant Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment LLC, EDN HJILPI.
3. Barabas Z.A., Morar, A. "High Performance Microstepping Driver System based on Five-phase Stepper Motor (sine wave drive)", *Procedia Technology*, 2014, no. 12, pp. 90–97, available at: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.460>
4. Mirzaev R.A. Khalkovsky F.A., Smirnov N.A. "Control of a Bipolar Stepper Motor Using a Controller", *Actual Problems of Aviation and Cosmonautics (Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavtiki)*, 2010, vol. 1, no. 6, pp. 365–366, EDN TBIAZL
5. Nasr M., Singh A., Moore K.J. "Smart Automatic Modal Hammer: Predictor–Corrector Approach for Accurate Excitation of Dynamical Systems", *Journal of Vibration Engineering and Technologies*, 2024, no. 12(S1), pp. 1045–1063, available at: <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01461-6>
6. Canning A.J., Li J.Q., Chen J., Hoang K., Thorsen T., Vaziri A., Vo-Dinh, T. "Tunable and scalable production of nanostar particle platforms for diverse applications using an AI-integrated automated synthesis system", *Journal of Materials Science*, 2025, no. 60(8), pp. 3768–3785, available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-025-10692-1>
7. Melnichenko V.O. "Stepper Motor Control Using a Stepper Motor Driver and an Arduino Board", *Theoretical and Applied Aspects of Natural Science Education in the Era of Digitalization (Teoreticheskiye i prikladnyye aspekty yestestvenno-nauchnogo obrazovaniya v epokhu tsifrovizatsii)*, proc. of the III International Scientific and Practical Conference, Bryansk, April 11–12, 2024, Bryansk, Bryansk State University named after Acad. I.G. Petrovsky, 2024, pp. 83–88, EDN ZQPKZR
8. Sevstov I.A., Tyurin S.A., Trusov V.A. "Comparative Analysis of Stepper Motor Drivers", *Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"*, 2020, vol. 2, pp. 102–103, EDN LORXQP
9. Wardhana A.W., Nugroho D.T. (). "Stepper motor control with DRV 8825 driver based on square wave signal from AVR microcontroller timer", *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2094, p. 020015
10. Zhou R., Jiang J., Li P., Lu S., Li B., Du C. "Optimized compound control strategy for high-speed 3D printing: enhancing surface quality and printing precision", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2025, 47(8), available at: <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05684-w>

Submitted 24.10.2025; revised 24.11.2025

Information about the authors

Igor G. Drozdov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Dean of the Faculty of Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dig@cchgeu.ru
Evgeny A. Ishchenko – Postgraduate Student, Engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kursk1998@yandex.ru
Alexander A. Boldyrev – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor of the Department of Rocket Engines, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexboldyrev@yandex.ru
Elena D. Egorova – Laboratory Research Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: reus.kaf@cchgeu.ru