

Техническое задание на исследование

ИР-03.001

Влияние микрошагового режима на реальное движение оси

- **Направление:** 03 / УПРАВЛЕНИЕ
 - **Объект:** экспериментальная платформа MAD CNC Ст01
 - **Исследуемая ось:** X
 - **Драйвер:** TMC2209
 - **Двигатель:** NEMA 17, 17CS04A
 - **Контроллер:** MKS Robin Nano V3.1
 - **Питание:** 24 В
 - **Исследуемые режимы:** 8 / 16 / 32 / 64 микрошагов
-

1. Основание для исследования

На экспериментальной платформе Ст01 применяются шаговые двигатели с драйверами TMC2209.

Драйвер позволяет аппаратно выбирать режимы 8, 16, 32 и 64 микрошагов на входе STEP/DIR.

При эксплуатации Ст01 ранее было отмечено, что режим 8 микрошагов приводил к нестабильному движению двигателя: запуск происходил нормально, однако в процессе дальнейшего вращения могли возникать нарушения движения. Переход на 16 микрошагов устранял наблюдаемую проблему.

Кроме того, увеличение числа микрошагов уменьшает расчётное перемещение, соответствующее одному входному импульсу STEP, однако само по себе не означает пропорционального повышения фактической точности позиционирования механической системы.

Для оценки практического значения параметра microstep необходимо экспериментально установить его влияние на движение реальной оси станка.

2. Цель исследования

Экспериментально определить, как выбор аппаратного микрошагового режима драйвера TMC2209 влияет на фактические характеристики линейного привода оси X платформы Ст01.

Исследовать влияние режима на:

1. погрешность перемещения;
2. повторяемость возврата в заданную позицию;
3. двунаправленное позиционирование;
4. устойчивость движения;
5. максимальную устойчивую скорость;
6. максимальное устойчивое ускорение.

Результатом исследования должен быть количественный ответ на вопрос:

||| **Даёт ли увеличение числа микрошагов реальное улучшение характеристик оси и какой режим является рациональным для данной механической системы?**

3. Исследовательский вопрос

Как изменение настройки микрошагового режима TMC2209 влияет на фактическое движение линейной оси при неизменной механике, двигателе, токе, напряжении питания и алгоритме управления?

4. Рабочая гипотеза

Предполагается, что:

1. увеличение числа микрошагов уменьшает расчётное минимальное перемещение, соответствующее одному импульсу STEP;
 2. фактическая точность позиционирования не будет улучшаться пропорционально увеличению числа микрошагов, поскольку она определяется не только разрешением команды, но также двигателем, драйвером, нагрузкой, кинематикой, люфтами, упругими деформациями и другими факторами;
 3. изменение режима микрошагов может повлиять на устойчивость движения, максимально достижимые скорость и ускорение;
 4. ранее замеченная нестабильность движения в режиме 8 микрошагов должна быть либо подтверждена количественно, либо опровергнута.
-

5. Объект исследования

Исследуется одна неизменяемая механическая система:

ось X платформы Ст01.

Известные параметры оси:

1. перемещение за один оборот двигателя — 8 мм;
2. двигатель — 200 полных шагов на оборот;
3. драйвер — TMC2209.

Расчётное линейное перемещение на один полный шаг:

$$8 / 200 = 0,04 \text{ мм} = 40 \text{ мкм}$$

Соответственно:

Режим	STEP/mm	Расчётное перемещение на STEP
8	200	5 мкм
16	400	2,5 мкм
32	800	1,25 мкм
64	1600	0,625 мкм

Эти значения являются **расчётным разрешением команды**, а не фактической точностью позиционирования.

6. Независимая переменная

Единственная изменяемая в основном эксперименте величина:

аппаратное число микрошагов TMC2209:

1. 8;
2. 16;
3. 32;
4. 64.

Для каждого режима должна быть соответственно изменена настройка количества STEP/mm контроллера.

7. Контролируемые параметры

Во время сравнительного эксперимента не допускается без фиксации изменять:

1. двигатель;
2. драйвер;
3. механическую передачу;
4. натяжение и регулировку механики;
5. ток двигателя;
6. напряжение питания;
7. режим работы драйвера, кроме исследуемого параметра;
8. положение и способ крепления измерительного прибора;
9. управляющее ПО;
10. форму тестовой последовательности;
11. нагрузку на ось.

Необходимо записать фактическое напряжение источника питания.

Если ток драйвера может быть измерен или достоверно определён по настройкам, его значение также включается в отчёт.

Необходимо указать, используется ли внутренняя интерполяция TMC2209 до 256 микрошагов. Если её состояние не контролируется программно, это прямо указывается как ограничение эксперимента.

8. Измерительное оборудование

8.1. Минимально допустимое

Для базового исследования:

1. индикатор линейного перемещения;
2. жёсткое крепление индикатора;
3. средства измерения напряжения питания;
4. средства контроля температуры окружающей среды либо фиксация приблизительной температуры.

Цена деления и паспортная точность индикатора обязательно указываются в отчёте.

8.2. Предпочтительное

Желательно использовать индикатор с разрешением:

0,001 мм или лучше.

Допускается проведение первоначального эксперимента прибором с разрешением 0,01 мм, однако в таком случае запрещается делать выводы о различиях, меньших измерительной способности станда.

Например, прибор с разрешением 0,01 мм не может подтвердить физическое перемещение на 1,25 мкм.

8.3. Расширенный вариант

При наличии оборудования допускается дополнительное применение:

1. линейного энкодера;
2. цифрового индикатора;
3. лазерной измерительной системы;
4. осциллографа для контроля STEP/DIR;
5. датчика температуры двигателя и драйвера.

Эти измерения являются дополнительными и не должны препятствовать выполнению базового исследования.

9. Подготовка станда

Перед началом эксперимента необходимо:

1. проверить механическую исправность оси;
2. исключить очевидное ослабление крепежа;
3. проверить соединение двигателя с механической передачей;
4. установить индикатор максимально параллельно направлению движения оси;
5. обеспечить жёсткость крепления индикатора;
6. исключить контакт измерительной системы с подвижными элементами кроме измерительного наконечника;
7. зафиксировать температуру окружающей среды;
8. зафиксировать напряжение питания;
9. записать используемую версию прошивки и конфигурации.

Перед измерениями выполнить не менее 10 циклов перемещения оси для проверки устойчивости работы и посадки механических элементов.

10. Порядок изменения микрошагового режима

Изменение аппаратных переключателей драйвера производится только при отключённом питании.

Для каждого режима необходимо:

1. отключить питание;
2. установить соответствующие переключки;
3. изменить значение STEP/mm;
4. включить систему;
5. проверить направление перемещения;
6. выполнить тестовое перемещение;
7. проверить фактический масштаб перемещения;
8. только после этого начинать серию измерений.

Рекомендуемая последовательность:

16 → 32 → 64 → 8 → 16 повторно.

Повторное испытание режима 16 в конце предназначено для оценки того, не изменилось ли состояние системы за время эксперимента из-за нагрева, механического смещения или других факторов.

11. Эксперимент №1 — погрешность заданного перемещения

Цель

Определить, изменяется ли фактическое перемещение оси при изменении микрошагового режима.

Методика

Для каждого режима выполнить перемещения:

1. 0,5 мм;
2. 1 мм;

3. 2 мм;

4. 5 мм.

Если диапазон применяемого индикатора не позволяет использовать некоторые значения, допускается уменьшить диапазон при обязательном указании этого в отчёте.

Каждое перемещение повторить не менее:

10 раз.

Перемещения первоначально выполнять с подходом к точке только с одного направления.

Для каждого опыта записывать:

1. заданное перемещение;
2. фактическое перемещение;
3. разность;
4. режим микрошагов;
5. номер опыта.

Погрешность отдельного измерения:

$$e_i = x_{\text{actual}} - x_{\text{command}}$$

Для каждой группы определить:

1. среднюю ошибку;
2. минимальное значение;
3. максимальное значение;
4. стандартное отклонение, если обработка выполняется программно.

12. Эксперимент №2 — повторяемость и двунаправленное позиционирование

Цель

Определить:

1. насколько стабильно ось возвращается в одну и ту же физическую позицию при многократных подходах;
2. зависит ли фактическое положение оси от направления подхода к контрольной точке.

Методика

Выбрать контрольную позицию **ХА**.

Для каждого микрошагового режима выполнить две серии измерений:

1. не менее **15 подходов** к **ХА** со стороны меньших координат;
2. не менее **15 подходов** к **ХА** со стороны больших координат.

Перед каждым измерением ось должна отходить от контрольной позиции на одинаковое расстояние, например **5 мм**, после чего возвращаться к **ХА**.

Пример последовательности для подхода со стороны меньших координат:

ХА - 5 мм → ХА

Пример последовательности для подхода со стороны больших координат:

ХА + 5 мм → ХА

Во всех сериях должны сохраняться одинаковыми:

- скорость перемещения;
- ускорение;
- величина отхода от контрольной точки;
- положение индикатора;
- направление измерения индикатора.

После каждого подхода фиксируется фактическое положение относительно первоначально установленного нуля измерительного прибора.

Для каждого направления необходимо определить:

- среднее положение;
- минимальное значение;
- максимальное значение;
- размах:

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

- стандартное отклонение.

Повторяемость оценивается отдельно для каждого направления подхода.

Дополнительно определяется разница средних положений при подходе с двух противоположных направлений:

$$B = X_{\text{avg}+} - X_{\text{avg}-}$$

где:

- $X_{\text{avg}+}$ — среднее измеренное положение при подходе с одной стороны;

- $\overline{X_{avg}}$ — среднее измеренное положение при подходе с противоположной стороны.

Значение **B** характеризует совокупное влияние:

- люфта;
- упругих деформаций;
- трения;
- особенностей механической передачи;
- особенностей привода.

Полученное значение не должно автоматически называться люфтом винта или передачи, поскольку измеряется поведение всей оси в сборе.

Требуемый результат

Для каждого микрошагового режима должны быть получены:

- повторяемость при подходе с одного направления;
- повторяемость при подходе с противоположного направления;
- разница средних положений между двумя направлениями;
- первичные данные всех отдельных подходов.

Необходимо определить, оказывает ли изменение микрошагового режима измеримое влияние:

1. на разброс повторных позиционирований;
2. на зависимость конечного положения от направления подхода.

13. Эксперимент №3 — устойчивость движения и максимальная устойчивая скорость

Цель

Определить:

1. насколько надёжно привод сохраняет движение при фиксированных условиях;
2. максимальную скорость, при которой ось сохраняет устойчивое движение без потери положения.

Эксперимент выполняется в два этапа.

13.1. Проверка устойчивости движения

Для каждого микрошагового режима выполнить не менее **20 тестовых перемещений**.

Во всех испытаниях должны быть одинаковыми:

- величина перемещения;
- заданная скорость;
- ускорение;
- последовательность направлений движения;
- механическая нагрузка.

Значения скорости и ускорения должны быть заведомо ниже предельных для исследуемой системы.

Для каждого тестового перемещения фиксируется результат:

- **pass** — движение без нарушений;
- **unstable** — нестабильное вращение или кратковременное нарушение движения с последующим восстановлением;
- **fail** — остановка или отсутствие нормального движения.

Дополнительно допускается фиксировать:

- характерный шум;
- вибрацию;
- задержку начала движения;
- другие наблюдаемые особенности.

Для каждого режима рассчитывается доля успешных движений:

$$P_{motion} = N_{successful} / N_{total}$$

Например:

$$20 / 20$$

или:

$$14 / 20$$

Если какой-либо микрошаговый режим показывает нестабильное движение, это является результатом исследования и должно быть отражено в отчёте.

13.2. Определение максимальной устойчивой скорости

Для каждого микрошагового режима:

1. установить заведомо устойчивое ускорение;
2. начать испытание с небольшой скорости;

3. постепенно увеличивать скорость;
4. на каждом уровне выполнять одинаковую серию возвратно-поступательных движений;
5. после серии проверять возврат оси в исходную позицию.

На каждом проверяемом уровне скорости выполнить не менее **5 циклов**.

Один цикл состоит из четырёх последовательных движений: двух в положительном и двух в отрицательном направлении.

Шаг увеличения задаваемой подачи выбирается экспериментально и фиксируется в поле **feed_F**. Поскольку фактическая скорость может не соответствовать заданному значению, шаг не выражается как точная величина в мм/с или мм/мин.

После обнаружения первого неустойчивого режима допускается уменьшить шаг изменения **feed_F** для более точного определения границы между устойчивым и неустойчивым движением.

Скорость считается устойчивой, если:

- после начала движения двигатель продолжает устойчивое вращение;
- движение происходит без остановок и очевидных срывов;
- отсутствуют обнаруживаемые пропуски шагов;
- после серии движений ось возвращается в исходную позицию в пределах измеренной повторяемости системы.

Максимальной устойчивой скоростью считается наибольшая проверенная скорость, при которой все установленные критерии выполняются.

Требуемый результат

Для каждого микрошагового режима необходимо определить:

- количество успешных движений;
- долю успешных движений;
- характер наблюдавшихся отказов;
- максимальную устойчивую скорость.

Результаты представить в сводной таблице:

Микрошаговый режим	Успешные движения	Доля успешных движений	Максимальная устойчивая скорость
8			
16			
32			
64			

Необходимо отдельно указать, если ограничение максимальной скорости связано не с самим приводом, а с ограничением частоты управляющих импульсов STEP, контроллера

или используемой прошивки.

14. Эксперимент №4 — максимальное устойчивое ускорение

Методика аналогична определению максимальной скорости.

Для каждого режима:

1. установить скорость ниже ранее найденной предельной;
2. постепенно повышать ускорение;
3. выполнять одинаковую последовательность движений;
4. контролировать возврат в исходную позицию.

Необходимо определить:

наибольшее устойчивое ускорение для каждого микрошагового режима.

15. Температурный контроль

Поскольку температура двигателя и драйвера может изменяться во время длительного теста, необходимо минимум записывать:

1. температуру помещения в начале;
2. температуру помещения в конце;
3. длительность эксперимента.

Если имеется возможность измерить температуру двигателя и драйвера, эти данные также фиксируются.

Для проверки возможного влияния прогрева первый режим 16 микрошагов испытывается повторно после завершения остальных режимов.

Если результаты первой и последней серии существенно различаются, этот факт должен быть отражён в выводах.

16. Формат исходных данных

Все первичные измерения должны быть сохранены.

Недопустимо сохранять только вычисленные средние значения.

Для эксперимента №1 используется CSV следующего формата:

```
run_id,series,microsteps,steps_per_mm,test,target_mm,indicator_stroke_mm
```

Для эксперимента №2 используется CSV следующего формата:

```
run_id,series,microsteps,steps_per_mm,test,target_mm,actual_mm,error_mm,
```

Поле **series** принимает значение **initial** для первичной серии измерений и **repeat** для повторной.

Для эксперимента №3 используется CSV следующего формата:

```
run_id,cycle_id,microsteps,steps_per_mm,test,distance_mm,direction,feed_
```

Пример записи эксперимента №1:

```
001,initial,16,400,position,5.000,5.000,4.980,-0.020,+,10,20,1000,24.0,2  
002,initial,16,400,position,5.000,10.000,4.990,-0.010,+,10,20,1000,24.0,
```

Поле **indicator_stroke_mm** содержит расчётную накопленную выборку хода штока индикатора после текущего измерения. После достижения доступного хода около 10 мм ось возвращается в нулевое положение, и отсчёт поля начинается заново. Сброс также выполняется при переходе к другой величине заданного перемещения, микрошаговому режиму или серии измерений.

Использовать:

1. UTF-8;
2. точку как десятичный разделитель;
3. единицы измерения в названиях полей.

17. Обработка результатов

Для каждого режима необходимо получить минимум следующие показатели:

Параметр	8	16	32	64
Расчётный STEP, мкм	5	2,5	1,25	0,625
Средняя ошибка перемещения				
Разброс при подходе со стороны меньших координат				
Разброс при подходе со стороны больших координат				
Разница средних положений В				
Доля успешных движений Pmotion				

Максимальная устойчивая скорость				
Максимальное устойчивое ускорение				

18. Обязательные графики

Минимальный отчёт должен содержать:

График 1

Погрешность позиционирования в зависимости от микрошагового режима.

График 2

Распределение результатов повторного позиционирования при подходе к контрольной точке с двух направлений для 8 / 16 / 32 / 64 микрошагов.

Предпочтительно показать все отдельные измерения, а не только среднее.

График 3

Максимальная устойчивая скорость в зависимости от режима.

График 4

Максимальное устойчивое ускорение в зависимости от режима.

При необходимости допускаются дополнительные графики.

19. Обязательная фиксация конфигурации

Вместе с результатами исследования необходимо сохранить:

1. фотографию положения переключателей TMC2209 для каждого режима;
2. настройки STEP/mm;
3. настройки скорости;
4. настройки ускорения;
5. параметры драйвера, если они доступны;
6. версию прошивки;
7. используемый G-code или сценарий испытания.

Эксперимент должен быть воспроизводим без необходимости восстанавливать настройки

20. Требуемые результаты исследования

По окончании работы необходимо дать ответы минимум на следующие вопросы.

20.1

Меняется ли измеримая погрешность позиционирования при переходе:

8 → 16 → 32 → 64 микрошагов?

20.2

Соответствует ли изменение фактической точности изменению расчётного разрешения команды?

Например, переход от 16 к 64 уменьшает расчётный STEP в четыре раза.

Должно быть установлено, уменьшается ли при этом в четыре раза фактическая ошибка.

20.3

Изменяется ли повторяемость позиционирования?

20.4

Изменяется ли двунаправленное позиционирование?

20.5

Подтверждается ли нестабильное движение при 8 микрошагов?

20.6

Как режим влияет на предельные скорость и ускорение?

20.7

Какой режим является рациональным для текущей конструкции Ст01?

21. Правила формулирования выводов

Выводы должны основываться только на величинах, которые способен разрешить применённый измерительный стенд.

Например, если использован индикатор с разрешением 0,01 мм, вывод:

||| «Режим 64 обеспечивает точность 0,625 мкм»

недопустим.

Допустимо:

||| «При разрешении измерительного станда 0,01 мм статистически различного улучшения позиционирования между режимами 32 и 64 не обнаружено».

Расчётное разрешение команды и фактическая точность движения во всём отчёте должны рассматриваться как разные характеристики.

22. Ограничения исследования

Исследование не ставит целью:

1. определение паспортной точности TMC2209;
2. определение абсолютной точности шагового двигателя;
3. сертификационное определение точности станка;
4. измерение линейности отдельных микрошагов;
5. исследование формы токов обмоток;
6. сравнение StealthChop и SpreadCycle;
7. оценку вибрации и акустического шума.

Исследуется **поведение конкретной оси конкретной экспериментальной платформы при изменении единственного управляющего параметра.**

Полученные результаты нельзя без дополнительной проверки переносить на другие двигатели, драйверы и механические системы.

23. Критерии выполнения исследования

Исследование считается выполненным, если:

1. проверены режимы 8, 16, 32 и 64 либо экспериментально показана невозможность устойчивой работы одного из режимов;
2. остальные существенные параметры системы сохранены неизменными;
3. проведены серии повторных измерений;
4. сохранены первичные данные;
5. задокументирован измерительный стенд;

6. сохранены настройки системы;
 7. рассчитаны сравниваемые показатели;
 8. представлены графики;
 9. сформулированы ограничения применённого метода;
 10. дан прямой ответ на основной исследовательский вопрос.
-

24. Комплект сдаваемых материалов

Результат работы должен содержать:

```
ir-03.001/
├── README.md
├── report/
│   └── ir-03.001-report.pdf
├── data/
│   ├── raw/
│   └── processed/
├── config/
│   ├── machine-config/
│   └── test-gcode/
├── analysis/
│   └── scripts/
└── media/
    ├── setup/
    └── experiment/
```

Обязательные материалы:

1. итоговый отчёт;
2. исходные данные;
3. обработанные данные;
4. конфигурация оборудования;
5. тестовый G-code;
6. фотографии измерительного стенда;
7. фотографии или записи конфигурации драйвера;
8. скрипты обработки данных, если они использовались.

25. Ожидаемый практический результат

Исследование должно позволить выбрать микрошаговый режим не по расчётному количеству STEP/mm и не субъективно по плавности движения, а по измеренным характеристикам реальной оси.

Практическим результатом должен стать ответ вида:

||| Для исследованной оси переход от режима N к режиму M даёт / не даёт измеримого улучшения позиционирования, при этом приводит к таким-то изменениям динамических характеристик. Для данной конструкции рациональным является режим X, поскольку дальнейшее увеличение разрешения команды не приводит к сопоставимому улучшению фактических характеристик.

Результат должен использоваться при настройке существующих машин MAD CNC и при формировании требований к следующим версиям приводов и систем управления.

26. Связь с последующими исследованиями

ИР-03.001 является исходной работой для последующих исследований MAD CNC.

Обнаруженные расхождения между расчётным и фактическим движением могут быть далее исследованы в:

ИР-02.001 — Точность и повторяемость позиционирования

для определения полного бюджета погрешностей оси;

ИР-01.001 — Статическая жёсткость конструкции

для определения вклада упругих деформаций;

ИР-01.002 — Вибрационная устойчивость станочной системы

для анализа динамических факторов;

ИР-02.002 — Температурный дрейф шпинделя и осей

для определения температурной составляющей погрешности.

Таким образом, ИР-03.001 не пытается объяснить все источники ошибок оси, а устанавливает вклад одного конкретного регулируемого параметра — микрошагового режима привода.