

УДК 62-133.32

РЕЗОНАНС ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И АНАЛИЗ МЕТОДОВ БОРЬБЫ С НИМ

Метелёв Александр Сергеевич

*Магистр 1 года,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: В.Т. Рябов,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Ключевые слова: шаговый двигатель (stepper motor), резонанс (resonance), модернизация (improvement).

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблема возникновения резонанса шаговых двигателей. Так же проведен сравнительный анализ методов борьбы с резонансом, приведены примеры практической реализации некоторых из них.

Введение

На сегодняшний день, в связи с повышением требований к точности изделий, особенно важно обеспечение точности перемещений и позиционирования заготовки. На данный момент в производстве используются сервоприводы и шаговые двигатели.

Сервоприводом является любой тип механического привода (устройства, рабочего органа), имеющий в составе датчик (положения, скорости, усилия и т. п.) и блок управления приводом (электронную схему или механическую систему тяг), автоматически поддерживающий необходимые параметры на датчике (и, соответственно, на устройстве) согласно заданному внешнему значению (положению ручки управления или численному значению от других систем)[1]. По сравнению с шаговым двигателем, сервопривод имеет ряд достоинств и недостатков. Из основных плюсов сервопривода стоит отметить большую скорость, меньшее потребление энергии и больший крутящий момент. К недостаткам относятся: сложность блока управления, проблемы с фиксированием ротора, высокая цена.

В дальнейшем в работе будут рассматриваться шаговые двигатели, так как кафедра МТ11 уже располагает микрофрезерным станком с шаговыми двигателями, так же вся работа будет иметь прямое отношение к данному станку.

Шаговый двигатель — это электромеханическое устройство, преобразующее сигнал управления в угловое или линейное перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении без устройств обратной связи. Такие двигатели являются экономичным решением для систем, где требуется высокая точность позиционирования и управления скоростью, а требуемые момент и скорость перемещения невелики. Конструктивно шаговые двигатели делятся на несколько групп: двигатели с переменным магнитным сопротивлением, двигатели с постоянными магнитами и гибридные двигатели. По строению обмоток шаговые двигатели делятся на биполярные, униполярные и четырехобмоточные.

1. Резонанс шаговых двигателей и причины его возникновения

Так как при работе двигателя все перемещения совершаются дискретно, на определенных скоростях вращения возникает резонанс. Резонанс — это резкое повышение амплитуды колебаний, при совпадении частоты вынужденных колебаний с частотой собственных колебаний. Этот эффект присущ всем шаговым двигателям и проявляется в виде внезапного появления гула, возникновении вибраций и сильного падения момента. Все это

приводит к пропуску шагов, потери синхронности двигателя и контроллера, а в некоторых случаях к полной остановке двигателя.

Существует два типа резонанса в шаговых двигателях — низкочастотный и среднечастотный. Так же имеет место «срыв» на кривой выходного момента при определенной частоте, но он является скорее фактором, ограничивающим максимальную скорость шагового двигателя.

Низкочастотный резонанс возникает вследствие неравномерности тока в обмотках шагового двигателя. Среднечастотный резонанс возникает из-за совпадения частот собственных и вынужденных колебаний. Частота, на которой возникает такой резонанс определяется по формуле(1.1):

$$f_0 = \frac{N \cdot T_H / \sqrt{J_p + J_H}}{4\pi} \quad (1.1)$$

, где f_0 – резонансная частота;

N – число полных шагов на оборот;

T_H – момент удержания для выбранного способа управления и тока фаз;

J_p – момент инерции ротора;

J_H – момент инерции ц-нагрузки;[2]

Так как моменты инерции ротора можно узнать, только зная его точные геометрические характеристики, то необходимо извлечь его из шагового двигателя. Делать это очень нежелательно, так как в процессе разборки и сборки можно повредить сам двигатель. Гораздо более быстрым и практичным является поиск резонанса на «слух». Суть метода заключается в том, чтобы начиная с небольшой (10-20 шагов в секунду) скорости, постепенно её увеличивая наблюдать за двигателем. Та частота управляющих импульсов, при которой шум внезапно усилится, а ротор начнет ощутимо «дергаться» (или даже полностью остановится), и будет являться резонансной. В ходе наладки станка был применен именно этот метод. Для документирования и обработки результатов была произведена запись шума двигателя. На получившейся в результате спектрограмме записи, показанной на рисунке 1, видно, что на частоте 250 шагов в секунду двигатель производит существенно больший шум.

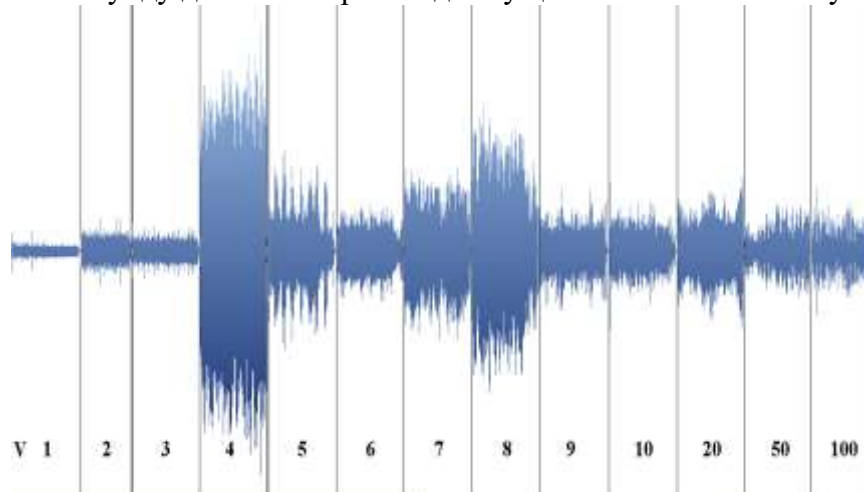


Рисунок 1. Спектрограмма аудиозаписи шума двигателя. (Скорость указана в миллисекундах на шаг).

На данной скорости вращения шум двигателя резко возрастает, ротор начинает двигаться непредсказуемо, а перемещения, совершаемые приводом, имеют огромную (вплоть до 30%) погрешность.

2. Способы борьбы с резонансом шаговых двигателей

Для борьбы с резонансом существует несколько методов. Все эти методы можно разделить на несколько групп. Первая группа — это механические решения. В неё входят применения различного рода муфт, изменение собственной частоты системы и другие. Вторая

группа — электрические решения, такие, как, например, закорачивание не использующихся в данный момент обмоток, повышение питающей мощности и т.д. И, наконец, решения на уровне системы автоматического управления, такие как использование полушагового и микрошагового режимов, а так же чередование режимов питания обмоток.

2.1. Механические решения

В основе механических методов борьбы с резонансом может лежать как изменение моментов инерции колеблющихся элементов, так и использование демпфирующих элементов

2.1.1. Использование муфт

Муфты используются для соединения двух валов, расположенных на одной оси под углом друг к другу, для передачи крутящего момента. Помимо этого упругие муфты позволяют демпфировать резонансные колебания. Для этого применяются муфты с переменной жесткостью. В таких муфтах применяются неметаллические упругие элементы, материалы которых не подчиняются закону Гука. Если при работе возникает резонанс, то, следовательно, растет и амплитуда колебаний. При росте амплитуды растет нагрузка на муфту и угол закручивания, но при таких значениях муфта имеет другую жесткость, на которой резонанса не возникает. Система будет возвращаться к первому состоянию и т.д., следовательно при использовании муфты с переменной жесткостью не возникает «классический» резонанс.

2.1.2. Изменение механических характеристик ротора

Так как, согласно формуле (1.1) резонансная частота зависит от моментов инерции, то для смещения этой частоты в нерабочий диапазон можно изменить момент инерции. Изменить его можно, добавив маховую массу, или наоборот, удалив.

2.2. Электрические решения

Для борьбы с резонансом так же можно использовать электрические методы. При колебаниях ротора, который является постоянным магнитом, в обмотках статора возникает ЭДС. Если не использующиеся обмотки закоротить, то при колебаниях в них будет наводиться ток. В результате энергия колебаний будет рассеиваться в виде тепла.

2.3. Решения на уровне алгоритма работы

2.3.1. Чередование однофазного и двухфазного режима

Шаговый двигатель может работать во многих режимах. Режимы делятся на полношаговый, полушаговый и микрошаговый. В полношаговом режиме можно использовать две фазы одновременно, либо одну. Согласно формуле (1.1) резонансная частота зависит от момента удержания. При использовании разного числа катушек ротор удерживается магнитными полями разной величины, и, следовательно, резонансная частота различается. Исходя из этого для преодоления резонансной частоты можно чередовать режимы работы двигателя. На рисунках 2 и 3 наглядно показаны положения ротора при использовании разных режимов.

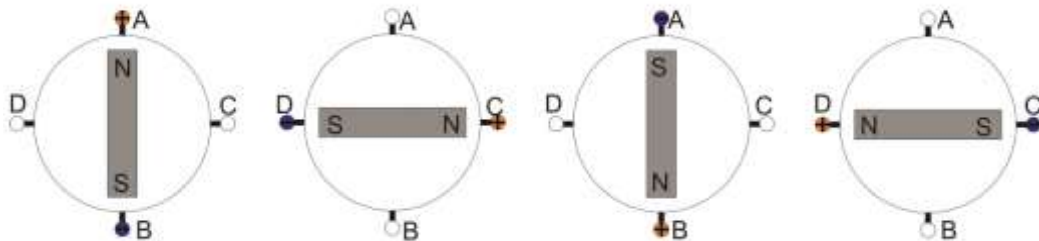


Рисунок 2. Полношаговый режим с одной включенной фазой

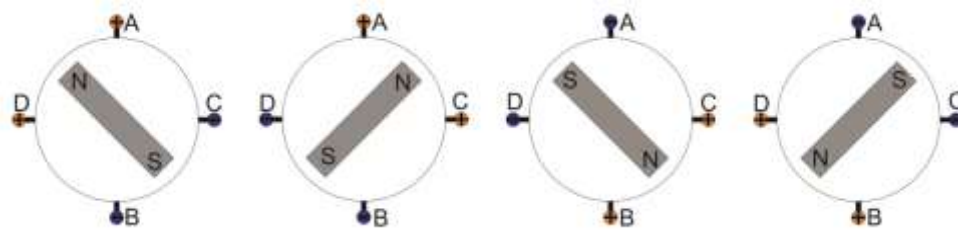


Рисунок 3. Полношаговый режим с двумя включенными фазами

2.3.2. Использование дробления шага

В полушаговом режиме ротор фиксируется попеременно между катушками и над ними, как показано на рисунке 4. При этом за шаг ротору сообщается всего около 30% энергии, по сравнению с полношаговым режимом. Амплитуда колебаний в таком случае значительно меньше.

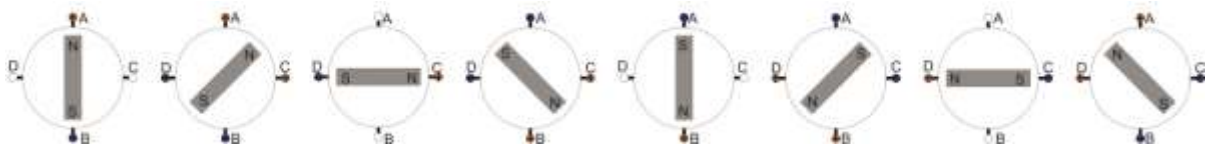


Рисунок 4. Полушаговый режим

Если использовать микрошаговый режим с дроблением шага 1/32, то ротор на каждом шаге получит примерно 0,1% от энергии полного шага. Поэтому резонанс в микрошаговом режиме практически не заметен и не влияет на работу двигателя. Пример такого режима показан на рисунке 5.

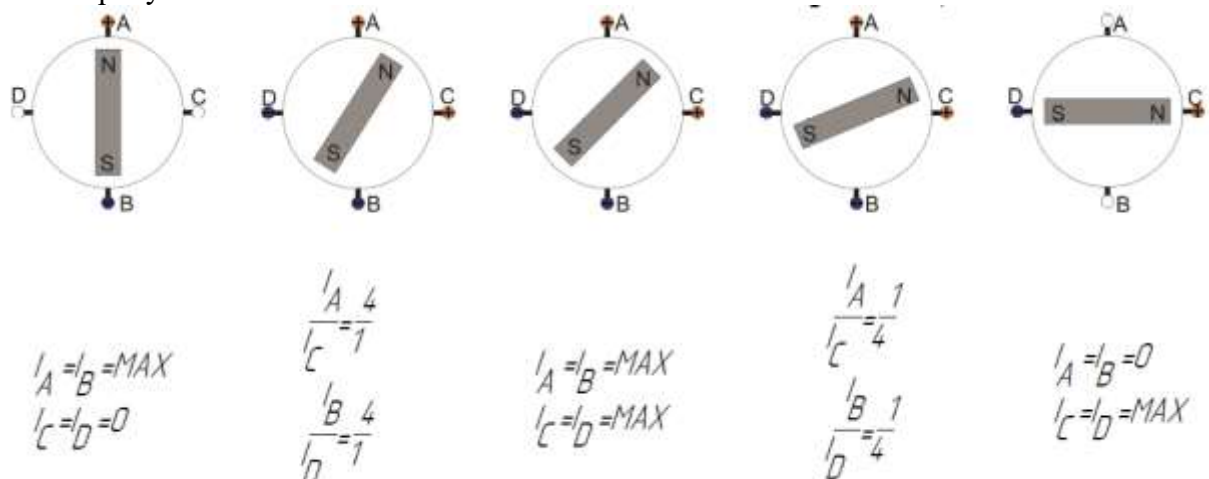


Рисунок 5. Микрошаговый режим с дроблением шага 1/4

2.3.3. Избегание резонанса программно

Наиболее простым и не затратным способом борьбы с резонансом является избегание резонансных частот в работе с двигателем. Использование этих частот легко ограничить в управляющей программе. Основным минусом является потеря скорости в том случае если подача при обработке совпадает с резонансной частотой двигателя.

3. Реализация способов борьбы с резонансом на примере станка кафедры МТ11

Кафедра МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана располагает несколькими сверлильно-фрезеровальными центрами. Среди них МФС – единственный созданный силами кафедры. Для передвижения координатного столика по трем координатам используются шаговые двигатели ДШИ-200-3. Передвижение контролируется концевыми датчиками. Для управления двигателями в реальном времени используется контроллер CPU-188. Для подачи команд оператором к контроллеру подключен персональный компьютер с операционной системой Windows XP. Общий вид рабочего места представлен на рисунке 6.

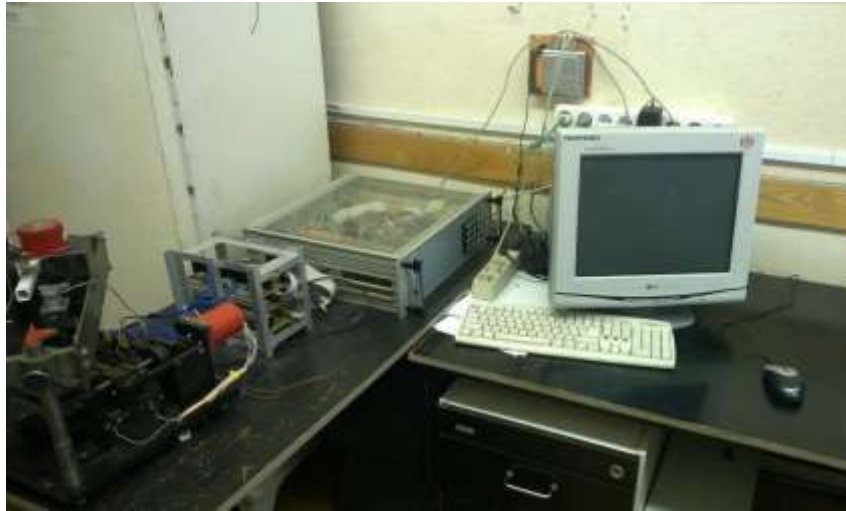


Рисунок. 6. Общий вид рабочего места

Диаметр вала двигателя совпадает с посадочным диаметром передачи винт-гайка и равен 6мм.

3.1. Пример применения упругой муфты

На данный момент для соединения вала и передачи используются пластинчатые неупругие муфты. Данная муфта не позволяет демпфировать резонанс, поэтому её можно заменить на упругую муфту

На посадочные диаметры в 6 мм подойдет муфта 30D35L, изображенная на рисунке 7. Она существует в разных исполнениях под разные диаметры: от 5 до 20 мм.



Рисунок 7. Упругая муфта 30D35L

Стоимость такой муфты на сайте известного китайского продавца начинается с цифры в 600 рублей[3]. Замена муфт на станке занимает порядка получаса. В результате хотя явление резонанса не будет устранено, но муфта будет демпфировать большую часть энергии колебаний.

3.2. Изменение механических характеристик ротора

Механические характеристики ротора можно изменить добавляя дополнительную массу на вращающиеся части, либо удаляя её(подпиливая ротор). Изготовление и закрепление, либо удаление такой массы займет от получаса до 10-12 часов(в зависимости от требуемой точности). При этом резонансная частота лишь сместится на другую область амплитудно-частотной характеристики привода, что может привести резонансу на более критичных в работе частотах. Стоимость дополнительной маховой массы будет составлять примерно 1000 рублей.

3.3. Закорачивание неиспользуемых обмоток

Чтобы закоротить неиспользуемые обмотки нужно использовать схему, представленную на рисунке 8.

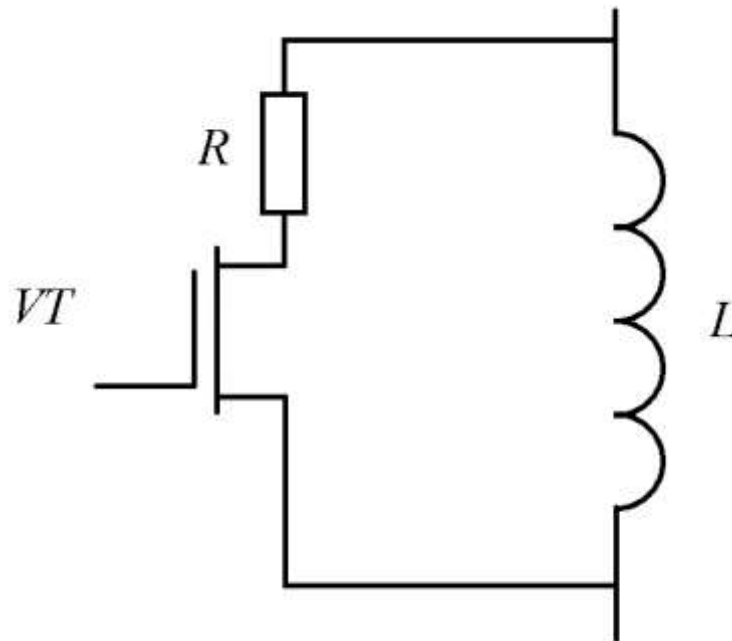


Рисунок 8. Закорачивание обмоток двигателя с помощью НО транзистора

На данной схеме VT – полевой нормально открытый транзистор, то есть транзистор, проводящий ток при отсутствии напряжения базы, например модель DN2530, L – катушка обмотки статора, R – сопротивление, рассеивающее мощность. Стоимость транзистора и сопротивления не превысит двухсот рублей. Включение в схему потребует 2-3 часов при использовании отдельной платы. База транзистора подключается к линии, управляющей включением катушки двигателя. Для модернизации установленных плат управления потребуется гораздо больше времени. Данный метод не очень эффективен, так как на резисторе будет рассеивать небольшая мощность.

3.4. Избегание резонанса программно

Резонанс можно избегать программно. Для этого потребуется модернизировать программу так, чтобы при запросе скорости подачи, при которой возникает резонанс, снизить эту скорость и предупредить пользователя. Повышение скорости не целесообразно, в таком случае подача может превысить допустимую при требуемом режиме, что неблагоприятно скажется на точности. Алгоритм такого решения представлен на рисунке 9.

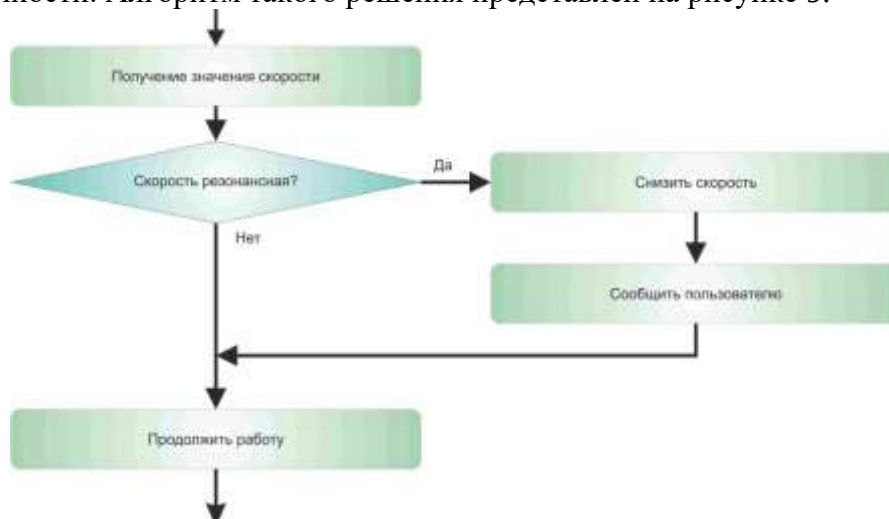


Рисунок 9. Алгоритм программного избегания резонанса

Плюсом данного решения является то, что нет необходимости вносить изменения в конструкцию станка, то есть нулевые денежные затраты. Затраты времени минимальны и составляют около часа на корректировку программного обеспечения станка. Основным минусом является невозможность получения максимальной производительности при режимах, использующих «резонансную» скорость.

3.5. Чередование однофазного и двухфазного режимов

Дальнейшим развитием предыдущего способа может стать чередование режимов включения обмоток двигателя. Так как, согласно формуле (1.1) собственная частота зависит от момента удержания, причем зависимость прямая, то для режима, в котором ротор удерживается магнитными полями от двух обмоток статора и режима с одной «удерживающей» обмоткой резонансные частоты будут разными. Алгоритм такого решения показан на рисунке 10.

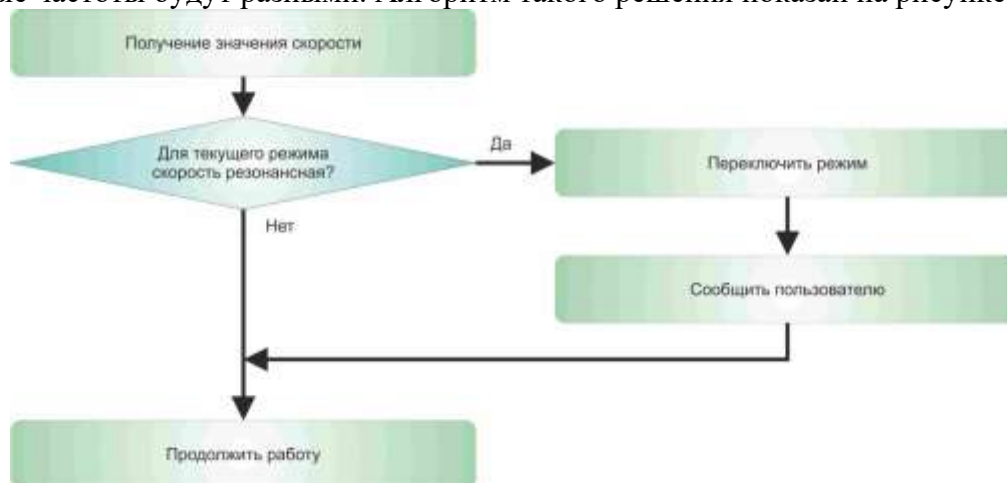


Рисунок 10. Алгоритм чередования режимов для избегания резонанса

В сравнении с предыдущим, данный метод так же не требует затрат и позволяет работать на любых частотах. Стоит отметить немного большую трудоемкость реализации – около трех часов, так же проблемой является колебания удерживающего момента ротора, а следовательно необходимость подавать большую мощность на двигатель во избежание остановки ротора при больших нагрузках.

3.5.1. Использование дробления шага

Наиболее изящным является метод дробления шага, при котором с помощью аналогового управления происходит плавное изменения тока в обмотках, и, следовательно, плавное изменение магнитного поля статора. Станок кафедры МТ11 располагает контроллером сru188 на котором есть два аналоговых выхода, а на плате драйвера для генерации ШИМ сигнала управления используется микросхема 16506, создающая два ШИМ сигнала, управляемых двумя опорными напряжениями. Опорное напряжение определяет скважность ШИМ сигнала, впоследствии создающего ток управления двигателем. На рисунке 11 показана упрощенная схема подключения микросхемы к системе управления.

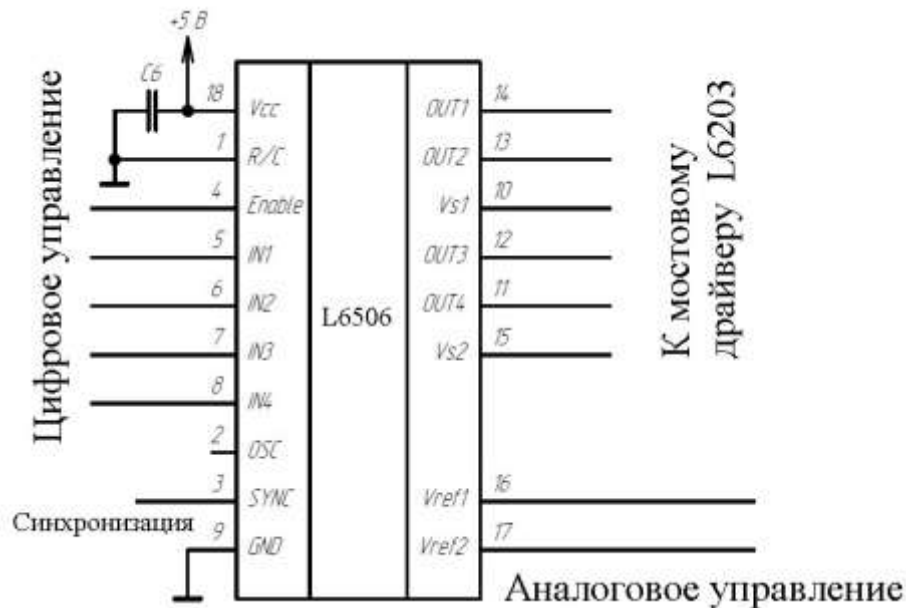


Рисунок 11. Аналоговое управление

Выводы 4-8 подключены к контроллеру. Вывод 3 используется для синхронизации с другими микросхемами, выводы 10-15 подключены к микросхеме-драйверу L6203. Предлагается подключить выводы 16 и 17 к ЦАП контроллера вместо подстроечного резистора с опорным напряжением. После подключения к контроллеру необходимо будет внести существенные правки в процедуру шага, используя управление ЦАП разделить полный шаг на десять микрошагов. Это позволит увеличить дискретность и плавность шага, а так же сделать резонансную амплитуду пренебрежимо малой. Рисунок 12 хорошо иллюстрирует колебания при полношаговом и полушаговом режимах.

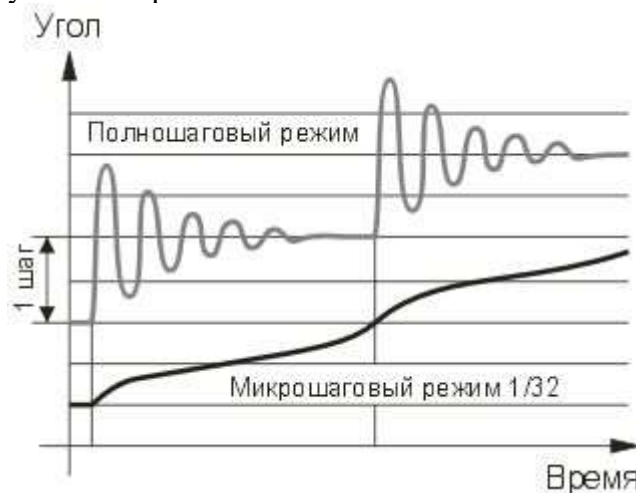


Рисунок 12. Диаграмма «угол поворота-время» шагового двигателя на разных режимах

Выполнение этого метода потребует крайне малых затрат(меньше ста рублей), однако потребуются намного больше(20-30 часов) времени на его реализацию(как на новую распайку, так и на внесение изменений в программное обеспечение). Однако данный метод позволит больше не задумываться о резонансе, а также повысит дискретность шага в десять раз.

4. Сравнение практических реализаций метода борьбы с резонансом

После рассмотрения всех предложенных методов можно составить сравнительную таблицу реализаций.

Таблица 1. Сравнение реализаций методов борьбы с резонансом

Метод	Денежные затраты, р	Затраты времени, часов	Практическая эффективность и комментарий
Упругая муфта	600	0,5	Средняя. Резонанс демпфируется
Изменение собственной частоты	1000-2000	0,5-12	Низкая. Непредсказуемая новая частота
Закорачивание неиспользуемой обмотки	До 200	2-3	Ниже среднего. Малая мощность рассеется на резисторе
Программное избегание резонанса	0	0,5	Средняя. Не позволяет использовать определенную скорость
Чередование полношагового и полушагового режимов	0	3-4	Выше среднего. Колебания момента увеличат потребную мощность.
Микрошаговый режим	0-100	20-30	Высокая.

Как видно из таблицы реализация микрошагового режима наиболее эффективна, дешева, при высоких затратах времени. Хотелось бы отметить, что работа со станком ведется студентами, поэтому денежные затраты включают только цену материалов.

Выводы

В ходе работы были проанализированы причины возникновения резонанса в шаговых двигателях, а так же способы борьбы с ним. Так же были предложены способы реализации этих методов на базе микрофрезерного станка кафедры МТ11. Предложен наиболее эффективный метод борьбы с резонансом – использование микрошагового режима. Так же в образовательных целях планируется дальше исследовать применение упругих муфт для расширения познаний в механике, а так же уделить внимание методу закорачивания обмоток, в качестве закрепления курса электроники и схемотехники.

Литература

1. Шаговый двигатель.[Электронный ресурс] // Википедия — свободная энциклопедия. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Сервопривод> (Дата обращения: 10.03.2015)
2. Скрибанов Е.В., Горбачёв Н.Г., Микрофрезерный станок с ЧПУ на основе персонального компьютера: Учебное пособие. М: МГИУ, 2007. С. 19.
3. 30D35L.[Электронный ресурс] // Aliexpress. Режим доступа: http://ru.aliexpress.com/w/wholesale-30D35L.html?spm=2114.03010208.0.320.vzcub5&site=rus&g=y&SortType=price_asc&SearchText=30D35L&initiative_id=SB_20160320120006&shipCountry=RU&needQuery=n (Дата обращения: 18.03.2015)