

УДК 621.3.049.77

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА ПРИВОДНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Куренков Виктор Александрович

Студент 6 курса, студент 6 курса

Кафедра «Металлорежущие станки и комплексы»

Московский государственный технический университет

Научный руководитель: Ю.В. Никулин,

Доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и комплексы»

В данной статье рассматривается устройство привода шагового двигателя для разрабатываемой системы числового программного управления станками, созданное в МГТУ им. Н.Э.Баумана студентами Дюковым М.А. и Куренковым В.А. Основу привода составляют программируемые микроконтроллеры. Для изучения поведения двигателя на разных скоростях вращения и отладки системы была разработана программа, позволяющая включать и выключать двигатель, а также менять направление и скорость вращения.



Рис.1. Схема подключения привода к ЭВМ

Интерфейс тестовой программы представлен на рис. 4. Программа позволяет менять направление вращения двигателя, а также управлять скоростью его вращения.

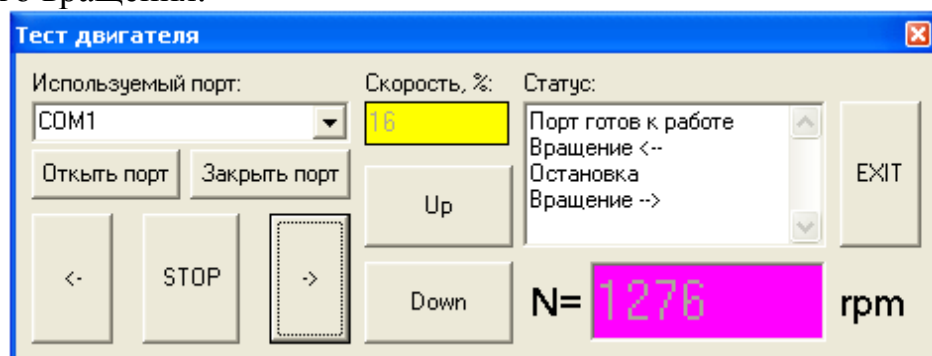


Рис.2. Тестовая программа управления электродвигателем

В настоящее время уже разработан привод на основе шагового двигателя. Схема подключения его к ЭВМ изображена на рис.3. Итак, подробнее:

Шаговые двигатели названы так, потому что принцип работы их отличается от двигателей, вращающихся с постоянной скоростью при подаче питания. ШД отрабатывает шаг (поворачиваются на определенный угол) в соответствии с импульсом, поданным на определенную обмотку. Т.е., если мы подадим серию импульсов от системы управления, то двигатель повернется именно на такое количество углов шага и остановится. Такие двигатели не нуждаются в обратной связи для их управления, что сильно снижает стоимость приводов на ШД. Здесь не применяются дорогостоящие устройства слежения за перемещением, такие как оптические энкодеры. Недостатком ШД является их слабая мощность при достаточно больших габаритах. Для дешевых приводов небольшой мощности и динамичности ШД- идеальное решение.

В разработанном приводе применяется двигатель ШД-5Д1, он имеет функциональную конструкцию на основе переменного магнитного сопротивления ротора.

Ротор состоит из магнитопроводящего металла и по форме напоминает зубчатое колесо. При появлении магнитного поля в одной из обмоток статора, ротор стремится замкнуть магнитный контур, т.е. повернуться «зубцами» вдоль линии магнитного поля. В этом и состоит принцип уменьшения магнитного сопротивления. Недостатком является меньшая мощность, чем в первом случае, но зато лучшие динамические свойства. Т.к. здесь нет взаимного влияния полюсов ротора.

Такие привода можно использовать в станках малой и средней мощности. Электродвигатель ШД-5Д1 имеет шесть обмоток, ток в которых должен коммутироваться последовательно согласно режиму шага или полушага. Эта задача полностью лежит на микроконтроллере Mega162. За каждый шаг двигатель отрабатывает 1,5 градуса поворота ротора.

Есть одна особенность управления этим приводом. Дело в том, что ток в обмотках зависит от частоты вращения двигателя. Кроме того при коммутации сигнала отработки шага, зависимость тока в обмотке от времени имеет не прямоугольную форму, а некий всплеск с затухающим процессом. В момент всплеска ток в обмотках превышает допустимые значения в несколько раз, а в момент затухающего процесса возможен пропуск шага. Для того, чтобы решить эту проблему была предусмотрена обратная связь по току. Она позволяет поддерживать нормальный режим работы двигателя при всех частотах вращения. Ограничение тока в данной схеме осуществляется с помощью ШИМ.

В силовой части нашего привода применены мощные полевые транзисторы. Это позволило существенно уменьшить энергетические потери, так как нам в данном случае нет необходимости применять токоограничивающие резисторы.

Последовательность включения обмоток двигателя выполнена согласно полшаговому режиму работы.

Схема блока управления ШД представлена ниже:

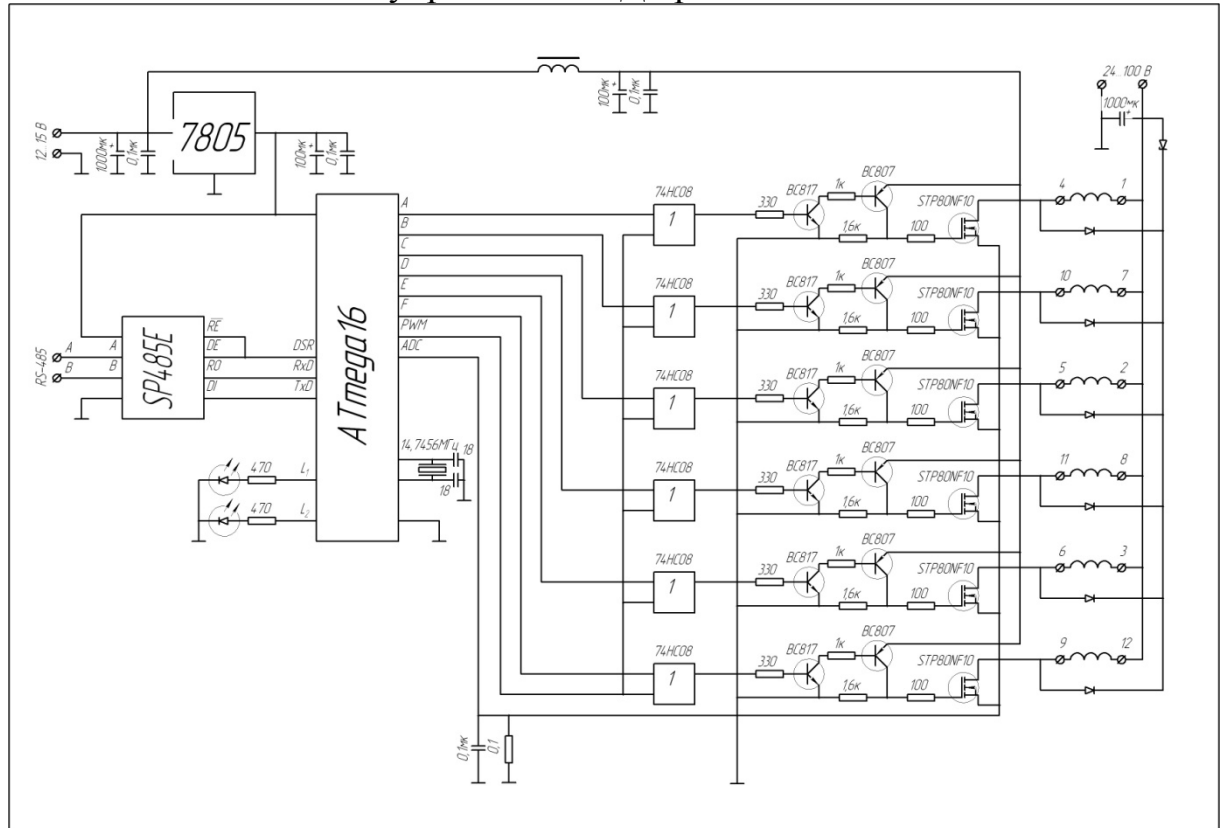


Рис.3. Электрическая схема управления приводом

На схеме мы видим, что управляющее воздействие передается на контроллер mega16 через блок SP485E, который преобразует уровень сигнала из стандарта RS-485 в логический сигнал USART, воспринимаемый данным микроконтроллером. Ниже этого блока видны светодиоды индикации включения и передачи данных. Блок 7805 – это стабилизатор напряжения 5В. Микросхема 74PC08 служит для реализации 6-ти каналов ШИМ с помощью одного. Это элемент «И», который задает скважность сигнала в каждой обмотке одновременно. Транзисторные ключи STP80NF10 являются силовыми. Это полевые транзисторы с высокой скоростью срабатывания. Их всегда можно нарастить до необходимой мощности. Остальные транзисторы относятся к схеме управления силовыми ключами –это драйвера. В правой части схемы изображены обмотки ШД.

При его разработке использовались SMD компоненты, поэтому он ничуть не уступает по низким габаритным размерам промышленным системам управления.

Момент, создаваемый шаговым двигателем, зависит от нескольких факторов:

- скорости
- тока в обмотках
- схемы драйвера

На рис. 4а показана зависимость момента от угла поворота ротора.

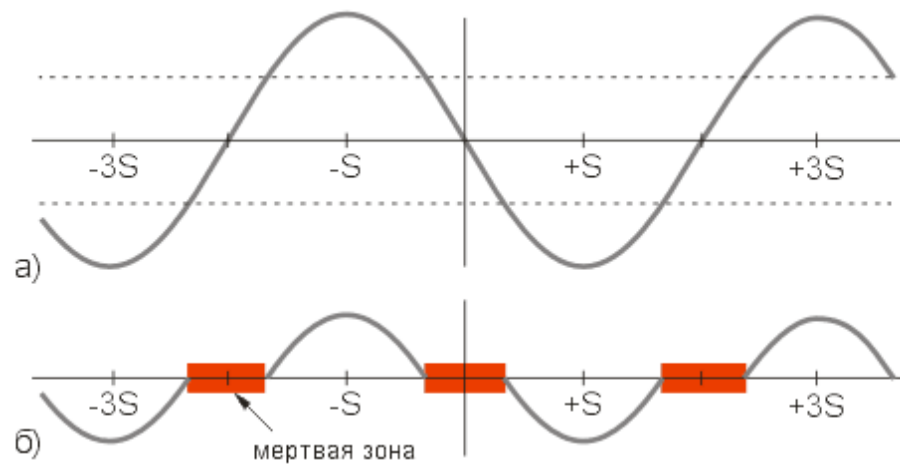


Рис. 4. Возникновение мертвых зон в результате действия трения

У идеального шагового двигателя эта зависимость синусоидальная. Точки S являются положениями равновесия ротора для негруженного двигателя и соответствуют нескольким последовательным шагам. Если к валу двигателя приложить внешний момент, меньший момента удержания, то угловое положение ротора изменится на некоторый угол Φ .

$$\Phi = (N/(2\pi)) \cdot \sin(T_a/T_h),$$

где Φ – угловое смещение,

N – количество шагов двигателя на оборот,

T_a – внешний приложенный момент,

T_h – момент удержания.

Угловое смещение Φ является ошибкой позиционирования нагруженного двигателя. Если к валу двигателя приложить момент, превышающий момент удержания, то под действием этого момента вал провернется. В таком режиме положение ротора является неконтролируемым.

На практике всегда имеется приложенный к двигателю внешний момент, хотя бы потому, что двигателю приходится преодолевать трение. Силы трения могут быть разделены на две категории: статическое трение или трение покоя, для преодоления которого требуется постоянный момент и динамическое трение или вязкое трение, которое зависит от скорости. Рассмотрим статическое трение. Предположим, что для его преодоления требуется момент в половину от пикового. На рис. 4а штриховыми линиями показан момент трения. Таким образом, для вращения ротора остается только момент, лежащий на графике за пределами штриховых линий. Отсюда следуют два вывода: трение снижает момент на валу двигателя и появляются мертвые зоны вокруг каждого положения равновесия ротора (рис. 14б):

$$d = 2 \left(S / (\pi/2) \right) \arcsin(T_f/T_h) = \left(S / (\pi/4) \right) \arcsin(T_f/T_h),$$

где d – ширина мертвой зоны;

S – угол шага;

T_f – момент трения;

T_h – момент удержания.

Мертвые зоны ограничивают точность позиционирования. Например, наличие статического трения в половину от пикового момента двигателя с шагом 90 град. вызовет наличие мертвых зон в 60 град. Это означает, что шаг двигателя может колебаться от 30 до 150 град., в зависимости от того, в какой точке мертвой зоны остановится ротор после очередного шага.

Наличие мертвых зон является очень важным для микрошагового режима. Если, например, имеются мертвые зоны величиной d , то микрошаг величиной менее d вообще не сдвинет ротор с места. Поэтому для систем с использованием микрошагов очень важно минимизировать трение покоя.

Когда двигатель работает под нагрузкой, всегда существует некоторый сдвиг между угловым положением ротора и ориентацией магнитного поля статора. Особенно неблагоприятной является ситуация, когда двигатель начинает торможение и момент нагрузки реверсируется. Нужно отметить, что запаздывание или опережение относится только к положению, но не к скорости. В любом случае, если синхронность работы двигателя не потеряна, это запаздывание или опережение не может превышать величины двух полных шагов.

Каждый раз, когда шаговый двигатель осуществляет шаг, ротор поворачивается на S радиан. При этом минимальный момент имеет в место, когда ротор находится ровно между соседними положениями равновесия (рис. 5).

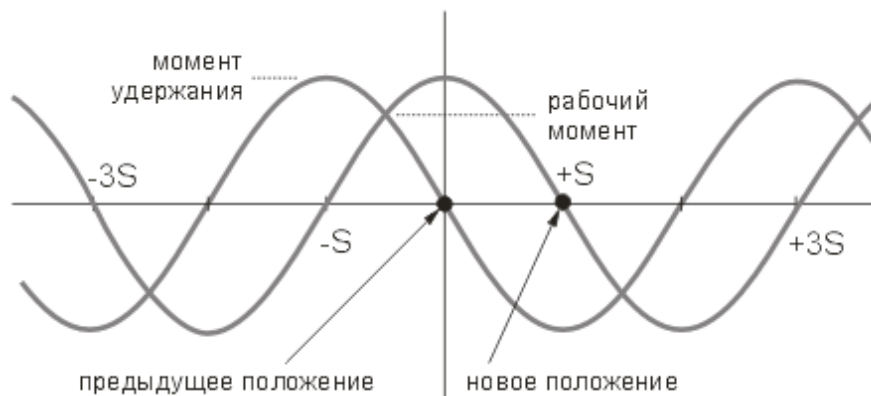


Рис. 5. Момент удержания и рабочий момент шагового двигателя

Этот момент называют рабочим моментом, он означает, какой наибольший момент может преодолевать двигатель при вращении с малой скоростью. При синусоидальной зависимости момента от угла поворота ротора, этот момент $T_r = T_h/(20.5)$. Если двигатель делает шаг с двумя запитанными обмотками, то рабочий момент равен моменту удержания для одной запитанной обмотки.

Параметры привода на основе шагового двигателя сильно зависят от характеристик нагрузки. Кроме трения, реальная нагрузка обладает инерцией. Инерция препятствует изменению скорости. Инерционная нагрузка требует от двигателя больших моментов на разгоне и торможении, ограничивая таким образом максимальное ускорение. С другой стороны, увеличение инерционности нагрузки увеличивает стабильность скорости.

Такой параметр шагового двигателя, как зависимость момента от скорости является важнейшим при выборе типа двигателя, выборе метода управления фазами и выборе схемы драйвера. При конструировании высокоскоростных драйверов шаговых двигателей нужно учитывать, что обмотки двигателя представляют собой индуктивность. Эта индуктивность определяет время нарастания и спада тока. Поэтому если к обмотке приложено напряжение прямоугольной формы, форма тока не будет прямоугольной. При низких скоростях (рис. 6а) время нарастания и спада тока не способно сильно повлиять на момент, однако на высоких скоростях момент падает. Связано это с тем, что на высоких скоростях ток в обмотках двигателя не успевает достигнуть номинального значения (рис. 6б).

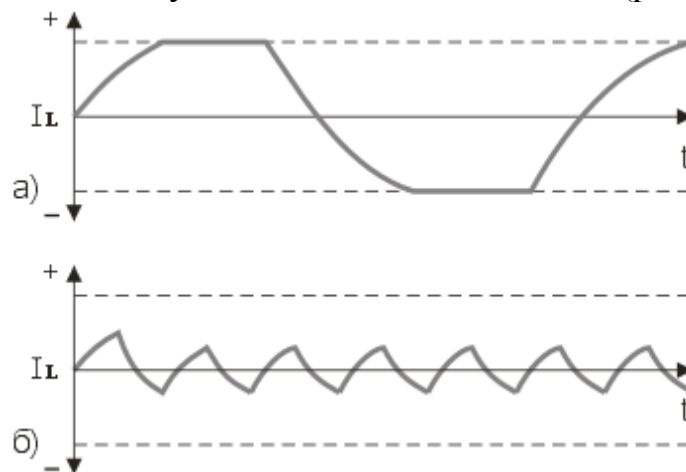


Рис. 6. Форма тока в обмотках двигателя на разных скоростях работы

Для того, чтобы момент падал как можно меньше, необходимо обеспечить высокую скорость нарастания тока в обмотках двигателя, что достигается применением специальных схем для их питания.

Поведение момента при увеличении частоты коммутации фаз примерно таково: начиная с некоторой частоты среза момент монотонно падает. Обычно для шагового двигателя приводятся две кривые зависимости момента от скорости (рис. 7).

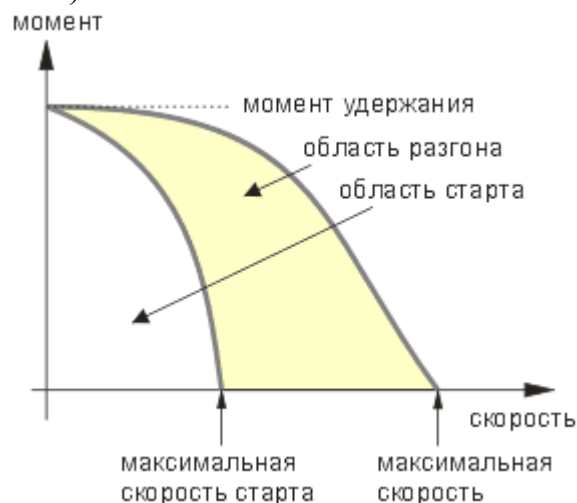


Рис. 7. Зависимость момента от скорости

Внутренняя кривая показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен тронуться. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой старта или частотой приемистости. Она определяет максимальную скорость, на которой ненагруженный двигатель может тронуться. На практике эта величина лежит в пределах 200 – 500 полных шагов в секунду. Инерционность нагрузки сильно влияет на вид внутренней кривой. Большая инерционность соответствует меньшей области под кривой. Эта область называется областью старта. Внешняя кривая показывает, при каком максимальном моменте трения для данной скорости шаговый двигатель способен поддерживать вращение без пропуска шагов. Эта кривая пересекает ось скоростей в точке, называемой максимальной частотой разгона. Она показывает максимальную скорость для данного двигателя без нагрузки. При измерении максимальной скорости нужно иметь в виду, что из-за явления резонанса момент равен нулю еще и на резонансной частоте. Область, которая лежит между кривыми, называется областью разгона.

Шаговым двигателям свойственен нежелательный эффект, называемый резонансом. Эффект проявляется в виде внезапного падения момента на некоторых скоростях. Это может привести к пропуску шагов и потере синхронности. Эффект проявляется в том случае, если частота шагов совпадает с собственной резонансной частотой ротора двигателя.

Когда двигатель совершает шаг, ротор не сразу устанавливается в новую позицию, а совершает затухающие колебания. Дело в том, что систему ротор – магнитное поле – статор можно рассматривать как пружинный маятник, частота колебаний которого зависит от момента инерции ротора (плюс нагрузки) и величины магнитного поля. Ввиду сложной конфигурации магнитного поля, резонансная частота ротора зависит от амплитуды колебаний. При уменьшении амплитуды частота растет, приближаясь к малоамплитудной частоте, которая более просто вычисляется количественно. Эта частота зависит от угла шага и от отношения момента удержания к моменту инерции ротора. Большой момент удержания и меньший момент инерции приводят к увеличению резонансной частоты.

Резонансная частота вычисляется по формуле:

$$F_0 = (N * T_H / (J_R + J_L))^{0.5} / 4 * \pi,$$

где F_0 – резонансная частота,

N – число полных шагов на оборот,

T_H – момент удержания для используемого способа управления и тока фаз,

J_R – момент инерции ротора,

J_L – момент инерции нагрузки.

Необходимо заметить, что резонансную частоту определяет момент инерции собственно ротора двигателя плюс момент инерции нагрузки, подключенной к валу двигателя. Поэтому резонансная частота ротора ненагруженного двигателя, которая иногда приводится среди параметров,

имеет маленькую практическую ценность, так как любая нагрузка, подсоединенная к двигателю, изменит эту частоту.

На практике эффект резонанса приводит к трудностям при работе на частоте, близкой к резонансной. Момент на частоте резонанса равен нулю и без принятия специальных мер шаговый двигатель не может при разгоне пройти резонансную частоту. В любом случае, явление резонанса способно существенно ухудшить точностные характеристики привода.

В системах с низким демпфированием существует опасность потери шагов или повышения шума, когда двигатель работает вблизи резонансной частоты. В некоторых случаях проблемы могут возникать и на гармониках частоты основного резонанса.

Когда используется не микрошаговый режим, основной причиной появления колебаний является прерывистое вращение ротора. При осуществлении шага ротору толчком сообщается некоторая энергия. Этот толчок возбуждает колебания. Энергия, которая сообщается ротору в полушаговом режиме, составляет около 30% от энергии полного шага. Поэтому в полушаговом режиме амплитуда колебаний существенно меньше. В микрошаговом режиме с шагом $1/32$ основного при каждом микрошаге сообщается всего около 0.1% от энергии полного шага. Поэтому в микрошаговом режиме явление резонанса практически незаметно.

Для борьбы с резонансом можно использовать различные методы. Например, применение эластичных материалов при выполнении механических муфт связи с нагрузкой. Эластичный материал способствует поглощению энергии в резонансной системе, что приводит к затуханию паразитных колебаний. Другим способом является применение вязкого трения. Выпускаются специальные демпферы, где внутри полого цилиндра, заполненного вязкой кремнийорганической смазкой, может вращаться металлический диск. При вращении этой системы с ускорением диск испытывает вязкое трение, что эффективно демпфирует систему.

Существуют электрические методы борьбы с резонансом. Колеблющийся ротор приводит к возникновению в обмотках статора ЭДС. Если замкнуть обмотки, которые на данном шаге не используются, это приведет к демпфированию резонанса.

И, наконец, существуют методы борьбы с резонансом на уровне алгоритма работы драйвера. Например, можно использовать тот факт, что при работе с двумя включенными фазами резонансная частота примерно на 20% выше, чем с одной включенной фазой. Если резонансная частота точно известна, то ее можно проходить, меняя режим работы.

Если это возможно, при старте и остановке нужно использовать частоты выше резонансной. Увеличение момента инерции системы ротор-нагрузка уменьшает резонансную частоту.

Однако, самой эффективной мерой для борьбы с резонансом является применение микрошагового режима.

Дальнейшие исследования нацелены на применение микрошагового управления, что позволит сделать работу двигателя более плавной. Кроме

того, при применении микрошага, практически исчезнет та грань минимального угла поворота, который может отработать двигатель, т.е. мы сможем повернуть ротор практически на любой малый угол.

Остаются открытыми вопросы по исследованию переходных процессов при коммутации сигналов, совершенствованию обратной связи по току и адаптируемости СУ под любой шаговый двигатель.

Процессы, происходящие при ШИМ-стабилизации тока, показаны на рис. 8. Особо следует отметить, что ток в датчике тока имеет прерывистый характер даже в том случае, если ток обмотки не прерывается. Это связано тем, что во время спада тока его путь не проходит через датчик тока (а проходит через диод).

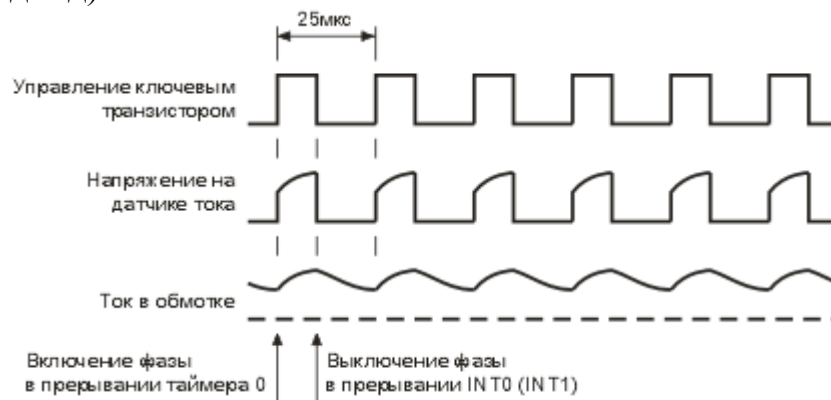


Рис. 8. Процесс ШИМ-стабилизации тока

Нужно сказать, что аналоговая часть системы ШИМ-стабилизации тока фаз двигателя является довольно «капризной». Дело в том, что сигнал, снимаемый с датчика тока, содержит большое количество помех. Помехи возникают в основном в моменты коммутации обмоток двигателя, причем как «своей», так и «чужой» фазы. Для правильной работы схемы требуется корректная разводка печатной платы, особенно это касается земляных проводников. Возможно, придется подобрать номиналы ФНЧ на входе компаратора или даже ввести в компаратор небольшой гистерезис. Как уже отмечалось выше, при управлении маломощными двигателями от ШИМ-стабилизации тока можно вовсе отказаться, применив обычную L/R-схему питания обмоток.

При выполнении этой работы преследовались цели детального изучения систем управления приводами, попытка создать гибкую СУ, которая могла бы адаптироваться под любой ШД. Это позволит управлять двигателем так, чтобы он всегда находился в оптимальных режимах работы.