

случае должно осуществляться логической схемой, реализующей нужный алгоритм работы. Предполагается, что источник питания схем имеет номинальное для обмоток двигателя напряжение.

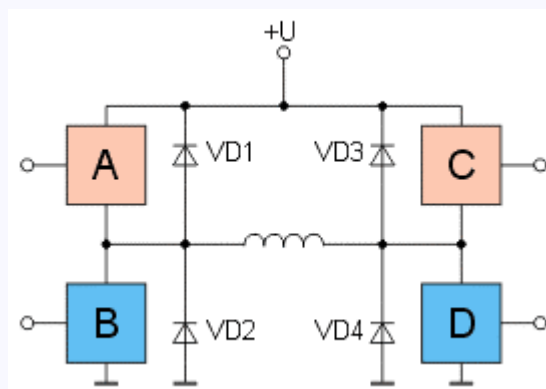


Рис. 19. Питание обмотки биполярного двигателя.

Это простейший способ управления током обмоток, и как будет показано в дальнейшем, он существенно ограничивает возможности двигателя. Нужно отметить, что при отдельном управлении транзисторами H-моста возможны ситуации, когда источник питания замкнут ключами. Поэтому логическая схема управления должна быть построена таким образом, чтобы исключить эту ситуацию даже в случае сбоя управляющего микроконтроллера.

Обмотки двигателя представляют собой индуктивность, а это значит, что ток не может бесконечно быстро нарастать или бесконечно быстро падать без привлечения бесконечной разности потенциалов. При подключении обмотки к источнику питания ток будет с некоторой скоростью нарастать, а при отключении обмотки произойдет выброс напряжения. Этот выброс способен повредить ключи, в качестве которых используются биполярные или полевые транзисторы. Для ограничения этого выброса устанавливают специальные защитные цепочки. На схемах рис. 18 и 19 эти цепочки образованы диодами, значительно реже применяют конденсаторы или их комбинацию с диодами. Применение конденсаторов вызывает появление электрического резонанса, что может вызвать увеличение момента на некоторой скорости. На рис. 18 потребовалось 4 диода по той причине, что половинки обмоток униполярного двигателя расположены на общем сердечнике и сильно связаны между собой. Они работают как автотрансформатор и выбросы возникают на выводах обеих обмоток. Если в качестве ключей применены МОП-транзисторы, то достаточно только двух внешних диодов, так как у них внутри уже имеются диоды. В интегральных микросхемах, содержащих мощные выходные каскады с открытым коллектором, также часто имеются такие диоды. Кроме того, некоторые микросхемы, такие как ULN2003, ULN2803 и подобные имеют внутри оба защитных диода для каждого транзистора. Нужно отметить, что в случае применения быстродействующих ключей требуются сравнимые по скорости диоды. В случае применения медленных диодов требуется их шунтирование небольшими конденсаторами.

Стабилизация тока

Для регулировки момента требуется регулировать силу тока в обмотках. В любом случае, ток должен быть ограничен, чтобы не превысить рассеиваемую мощность на омическом сопротивлении обмоток. Более того, в полшаговом режиме ещё требуется в определенные моменты обеспечивать нулевое значение тока в обмотках, а в микрошаговом режиме вообще требуется задание разных значений тока.

Для каждого двигателя производителем указывается номинальное рабочее напряжение обмоток. Поэтому простейший способ питания обмоток – это использование источника постоянного напряжения. В этом случае ток ограничен омическим сопротивлением обмоток и напряжением источника питания (рис. 20а), поэтому такой способ питания называют L/R-питанием. Ток в обмотке нарастает по экспоненциальному закону со скоростью, определяемой индуктивностью, активным сопротивлением обмотки и приложенным напряжением. При повышении частоты ток не достигает номинального значения и момент падает. Поэтому такой способ питания пригоден

только при работе на малых скоростях и используется на практике только для маломощных двигателей.

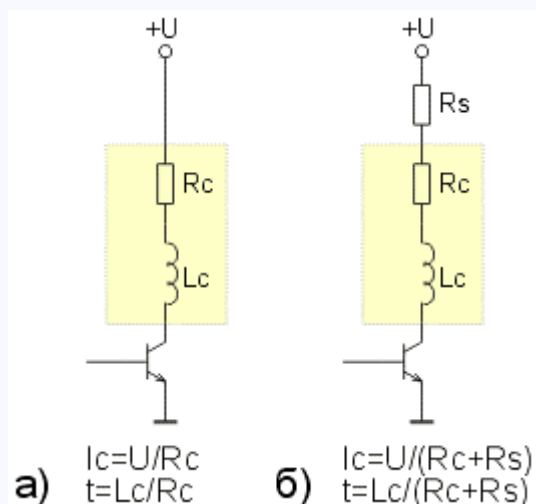


Рис. 20. Питание обмотки номинальным напряжением (а) и использование ограничительного резистора (б).

При работе на больших скоростях требуется увеличивать скорость нарастания тока в обмотках, что возможно путем повышения напряжения источника питания. При этом максимальный ток обмотки должен быть ограничен с помощью дополнительного резистора. Например, если используется напряжение питания в 5 раз большее номинального, то требуется такой дополнительный резистор, чтобы общее сопротивление составило $5R$, где R – омическое сопротивление обмотки ($L/5R$ -питание). Этот способ питания обеспечивает более быстрое нарастание тока и как следствие, больший момент (рис. 20б). Однако он имеет существенный недостаток: на резисторе рассеивается дополнительная мощность. Большие габариты мощных резисторов, необходимость отвода тепла и повышенная необходимая мощность источника питания – всё это делает такой метод неэффективным и ограничивает область его применения небольшими двигателями мощностью 1 – 2 ватта. Нужно сказать, что до начала 80-х годов прошлого века параметры шаговых двигателей, приводимые производителями, относились именно к такому способу питания.

Еще более быстрое нарастание тока можно получить, если использовать для питания двигателя генератор тока. Нарастание тока будет происходить линейно, это позволит быстрее достигать номинального значения тока. Тем более, что пара мощных резисторов может стоить дороже, чем пара мощных транзисторов вместе с радиаторами. Но как и в предыдущем случае, генератор тока будет рассеивать дополнительную мощность, что делает эту схему питания неэффективной.

Существует еще одно решение, обеспечивающее высокую скорость нарастания токи и низкую мощность потерь. Основано оно на применении двух источников питания.

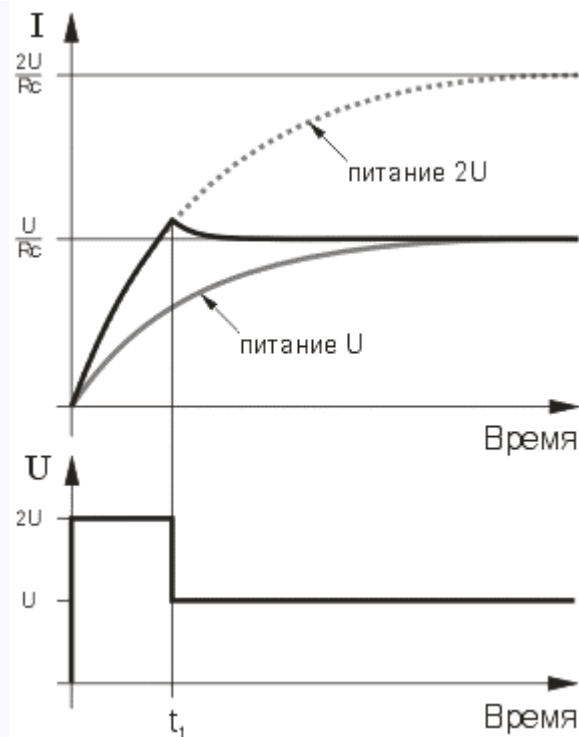


Рис. 21. Питание обмотки двигателя ступенчатым напряжением.

В начале каждого шага кратковременно обмотки подключаются к более высоковольтному источнику, который обеспечивает быстрое нарастание тока (рис. 21). Затем напряжение питания обмоток уменьшается (момент времени t_1 на рис. 21). Недостатком этого метода является необходимость двух ключей, двух источников питания и более сложной схемы управления. В системах, где такие источники уже есть, метод может оказаться достаточно дешёвым. Еще одной трудностью является невозможность определения момента времени t_1 для общего случая. Для двигателя с меньшей индуктивностью обмоток скорость нарастания тока выше и при фиксированном t_1 средний ток может оказаться выше номинального, что чревато перегревом двигателя.

Еще одним методом стабилизации тока в обмотках двигателя является ключевое (широтно-импульсное) регулирование. Современные драйверы шаговых двигателей используют именно этот метод. Ключевой стабилизатор обеспечивает высокую скорость нарастания тока в обмотках вместе с простотой его регулирования и очень низкими потерями. Еще одним преимуществом схемы с ключевой стабилизацией тока является и то, что она поддерживает момент двигателя постоянным, независимо от колебаний напряжения питания. Это позволяет использовать простые и дешевые нестабилизированные источники питания.

Для обеспечения высокой скорости нарастания тока используют напряжение источника питания, в несколько раз превышающее номинальное. Путем регулировки скважности импульсов, среднее напряжение и ток поддерживаются на номинальном для обмотки уровне. Поддержание производится в результате действия обратной связи. Последовательно с обмоткой включается резистор – датчик тока R (рис. 22а). Падение напряжения на этом резисторе пропорционально току в обмотке. Когда ток достигает установленного значения, ключ выключается, что приводит к падению тока. Когда ток спадает до нижнего порога, ключ снова включается. Этот процесс повторяется периодически, поддерживая среднее значение тока постоянным.

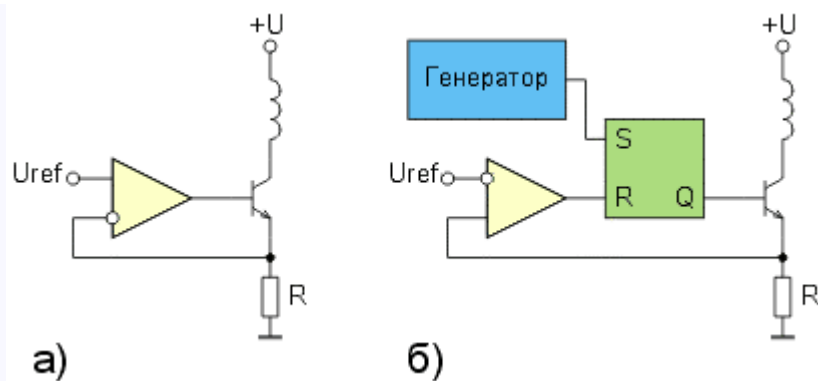


Рис. 22. Различные схемы ключевой стабилизации тока.

Управляя величиной U_{ref} можно регулировать ток фазы, например, увеличивать его при разгоне и торможении и снижать при работе на постоянной скорости. Можно также задавать его с помощью ЦАП в форме синусоиды, реализуя таким образом микрошаговый режим. Такой способ управления ключевым транзистором обеспечивает постоянную величину пульсаций тока в обмотке, которая определяется гистерезисом компаратора. Однако частота переключений будет зависеть от скорости изменения тока в обмотке, в частности, от ее индуктивности и от напряжения питания. Кроме того, две такие схемы, питающие разные фазы двигателя, не могут быть засинхронизованы что может явится причиной дополнительных помех.

От указанных недостатков свободна схема с постоянной частотой переключения (рис. 22б). Ключевым транзистором управляет триггер, который устанавливается специальным генератором. Когда триггер устанавливается, ключевой транзистор открывается и ток фазы начинает расти. Вместе с ним растет и падение напряжения на датчике тока. Когда оно достигает опорного напряжения, компаратор переключается, сбрасывая триггер. Ключевой транзистор при этом выключается и ток фазы начинает спадать до тех пор, пока триггер не будет вновь установлен генератором. Такая схема обеспечивает постоянную частоту коммутации, однако величина пульсаций тока не будет постоянной. Частота генератора обычно выбирается не менее 20кГц, чтобы двигатель не создавал слышимого звука. В то же время слишком высокая частота переключений может вызвать повышенные потери в сердечнике двигателя и потери на переключениях транзисторов. Хотя потери в сердечнике с повышением частоты растут не так быстро ввиду уменьшения амплитуды пульсаций тока с ростом частоты. Пульсации порядка 10% от среднего значения тока обычно не вызывают проблем с потерями.

Подобная схема реализована внутри микросхемы L297 фирмы SGS-Thomson, применение которой сводит к минимуму количество внешних компонентов. Ключевое регулирование реализуют и другие специализированные микросхемы.

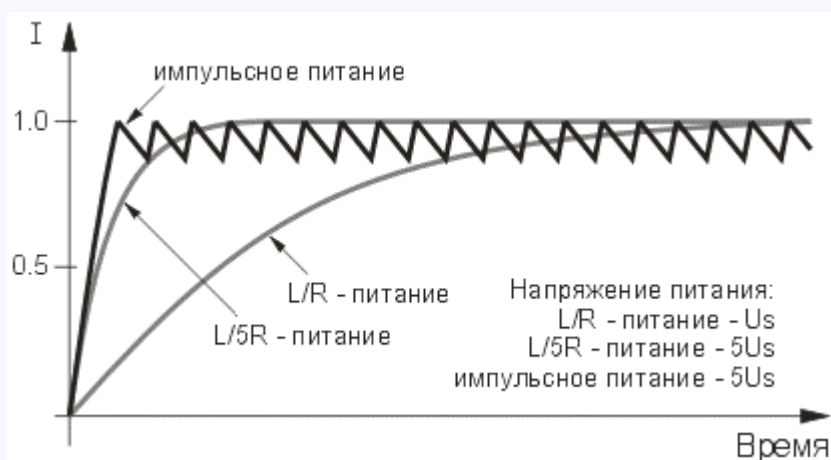


Рис. 23. Форма тока в обмотках двигателя для различных способов питания.