Лекция – 5

1 ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В системах автоматики и телемеханики находят широкое применение исполнительные двигатели постоянного тока. Это связано с тем, что двигатели постоянного тока позволяют просто, плавно и экономично регулировать скорость вращения в очень широком диапазоне. При этом они устойчиво работают при любых скоростях вращения и любом характере нагрузки. По массе и габаритам они в два–три раза меньше асинхронных двигателей.

К исполнительным двигателям предъявляется ряд особых требований, обусловленных спецификой их работы. Эти двигатели практически никогда не работают в номинальном режиме. Для их работы характерны частые пуски, остановки, реверсы. С целью сокращения времени переходных процессов, в которых они почти постоянно находятся, исполнительные двигатели обычно выполняют малоинерционными. Очень важным требованием к исполнительным двигателям является отсутствие самохода – самоторможение двигателя при снятии сигнала управления. Механические характеристики исполнительных двигателей должны быть линейными, пусковой момент – максимальным [9].

Основным недостатком двигателей постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие коллектора и щеток. Из-за искрения коллекторные двигатели нормального исполнения не могут работать во взрывоопасных средах и требуют установки устройств подавления радиопомех, возникающих при их работе.

В качестве исполнительных двигателей постоянного тока применяют двигатели с независимым электромагнитным возбуждением или с возбуждением постоянными магнитами. По конструкции исполнительные двигатели делятся на двигатели обычного исполнения, двигатели с беспазовым якорем и малоинерционные двигатели.

Двигатели обычного исполнения отличаются от силовых двигателей постоянного тока только тем, что имеют шихтованный магнитопровод статора. Это связано с необходимостью минимизации потерь в стали, так как эти двигатели значительную часть времени работают в переходных режимах с изменяющимся

основным магнитным потоком.

Двигатели с беспазовым якорем отличаются от обычных двигателей тем, что обмотка якоря располагается на цилиндрической поверхности якоря. Это увеличивает воздушный зазор двигателя и требует увеличения тока возбуждения, но позволяет существенно снизить индуктивность обмотки якоря и за счет этого улучшить условия коммутации. Кроме того, беспазовая конструкция позволяет уменьшить момент инерции якоря и увеличить быстродействие двигателя.

Одним из недостатков двигателей постоянного тока обычного исполнения является относительно большой момент инерции якоря, снижающий их быстродействие. Для уменьшения момента инерции якоря применяются различные конструктивные решения, одним из которых является использование обмотки якоря, изготовленной печатным способом на немагнитном диске или цилиндре. Обмотку якоря малоинерционных двигателей выполняют также на немагнитных дисках или цилиндрах обычным проводом с последующей заливкой полимерным составом. В результате образуется монолитный цилиндр или диск с проводниками обмотки, расположенными внутри. Такая технология более сложная и трудоемкая, чем печатная, но позволяет увеличить механическую прочность конструкции якоря.

1.2 ПУСК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

При пуске электродвигателя постоянного тока из состояния покоя ($\omega = 0$) ЭДС, наводимая в обмотке якоря, равна нулю. Следовательно, в соответствии с уравнением (1.1) пусковой ток I ограничивается только сопротивлением R обмотки якоря. Поскольку сопротивление цепи якоря невелико, при пуске с номинальным напряжением ток якоря в 10...50 раз может превысить свое номинальное значение. Такой ток недопустим ни для щеток (из-за чрезмерных плотностей тока и сильного искрения под ними), ни для обмоток (из-за больших электродинамических усилий, пропорциональных квадрату тока якоря), ни для сети (из-за больших падений напряжения в ней). Кроме того, в соответствии с формулой (1.4), пропорционально росту тока увеличивается электромагнитный момент двигателя, что может привести к поломке узла, соединяющего вал двигателя и приводимого механизма. По условиям работы коллекторно-щеточного узла допустимый пусковой

ток не более чем в 2,5 раза может превышать номинальный [11].

Таким образом, прямой пуск (прямое включение в сеть) допустим только для двигателей малой мощности с относительно большим сопротивлением цепи якоря. Пусковой ток мощных двигателей необходимо уменьшать до допустимых значений, что достигается снижением подводимого напряжения или включением последовательно с обмоткой якоря добавочного активного сопротивления или пускового реостата.

Поскольку пуск двигателя при помощи реостата подразумевает ручное воздействие и его автоматизация нецелесообразна, в настоящем пособии этот способ рассматриваться не будет. Узнать об этом способе и о характеристиках пусковых реостатов можно из книг [6, 9 – 11].

Пуск при пониженном напряжении можно осуществить, если двигатель подключен к отдельному регулируемому источнику постоянного тока. В этом случае при включении двигателя напряжение источника плавно увеличивают от начального до номинального значения, что позволяет избежать больших толчков тока. Начальное напряжение при пуске должно обеспечивать пусковой ток, не превышающий допустимое значение. По сути, такой способ является регулированием частоты вращения, например, при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ), и рассмотрен в соответствующем пункте настоящей главы.

Рассмотрим автоматизированный пуск электродвигателя постоянного тока при помощи добавочных сопротивлений. На рисунке 1.12 представлена электрическая принципиальная схема устройства автоматического пуска электродвигателя постоянного тока [8].

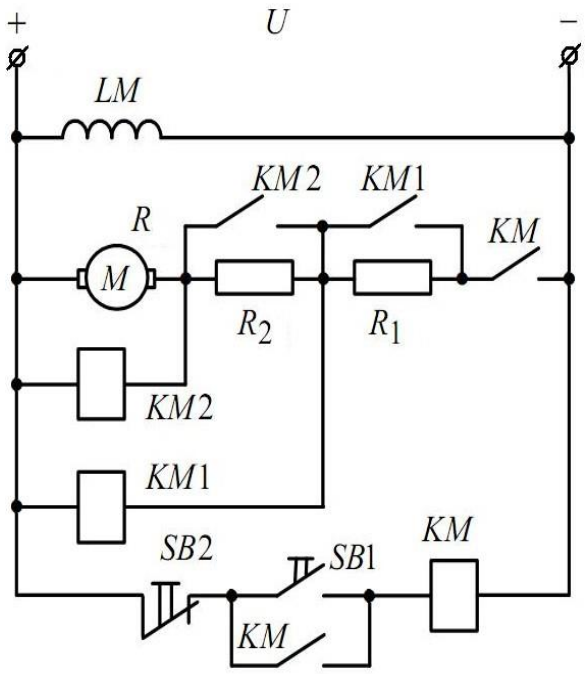


Рис. 1.12. Электрическая принципиальная схема устройства автоматического пуска электродвигателя постоянного тока

Схема работает следующим образом. После подачи напряжения на схему силовых цепей двигателя по обмотке возбуждения *LM* начинает течь ток, формирующий номинальный магнитный поток Ф.

При нажатии кнопки *SB*1 «Пуск» обмотка контактора [9] *KM* получает питание, он срабатывает и самоблокируется, т.е. параллельно кнопке *SB*1 замыкается вспомогательный контакт *KM*. При отпускании кнопки *SB*1 напряжение на обмотке *KM* сохраняется. Кроме того, замыкается силовой контакт *KM* в цепи обмотки якоря двигателя. Двигатель начинает разгоняться с полностью введенными в цепь якоря пусковыми сопротивлениями *R*1 и *R*2.

По мере разгона двигателя растет ЭДС обмотки якоря, в результате чего увеличивается напряжение на обмотках контакторов *KM*1 и *KM*2. При достижении двигателем скорости ω_1 значение ЭДС на контакторе *KM*1 становится достаточным для его срабатывания. Контакт *KM*1 замыкается и шунтирует резистор *R*1. По мере дальнейшего разгона двигателя при скорости ω_2 срабатывает контактор *KM*2 и шунтирует резистор *R*2. Двигатель переходит на естественную механическую характеристику и разгоняется по ней до установившейся скорости, определяемой нагрузкой.

Для остановки электропривода необходимо нажать кнопку *SB*2 «Стоп». Контактор КМ потеряет питание и отключит обмотку якоря от напряжения *U*. Торможение электродвигателя происходит «выбегом», т.е. за счет потерь в подшипниках двигателя, в кинематике производственного механизма, на вентиляцию в двигателе.

Ознакомиться со схемами пуска электродвигателей других типов возбуждения и процессами, происходящими в них, можно, изучив соответствующие главы пособий [8, 9].

1.3 ТОРМОЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В связи с необходимостью точного позиционирования рабочего органа в мехатронных системах часто возникает особая необходимость своевременного торможения электродвигателей. Для того чтобы быстро остановить механизм или уменьшить его скорость, наряду с механическими применяются и электрические способы.

Для понимания механизма электрического торможения обратимся к уравнению (1.1), из которого следует, что пока напряжение *U* источника питания больше ЭДС *E* индукции, ток *I* положительный, а момент *M* действует в направлении вращения. Как только напряжение $U < E$, ток *I* становится отрицательным, в результате чего, как следует из формулы (1.4), меняет знак и момент *M*. Он становится тормозным. Процессы разгона и торможения происходят в электрической машине всегда при условии, что якорь включен в сеть. Если для остановки двигателя просто отключить якорь от сети, то цепь окажется разомкнутой, ток якоря станет равным нулю и не сможет создать тормозной момент. Уменьшение частоты вращения будет происходить только за счет механических потерь различного рода в течение сравнительно большого интервала времени. Следовательно, для эффективного торможения необходимо тем или иным способом оставить якорь включенным в какую-либо электрическую цепь.

В машинах постоянного тока применяют три способа электрического торможения [9, 11]:

– динамическое;

– рекуперативное;

– противовключением.

При динамическом торможении электрическая машина работает в режиме автономного генератора, при рекуперативном – в режиме генератора, параллельного сети, при торможении противовключением – в режиме электрического тормоза.

В режиме динамического торможения при включенной обмотке возбуждения цепь якоря замыкают на внешнее активное сопротивление R_b. Тогда напряжение U источника становится равным нулю, а цепь якоря состоит из двух, последовательно соединенных сопротивлений R и R_b. Ток I меняет направление и определяется только величиной ЭДС и этими сопротивлениями. Из уравнения (1.5) механической характеристики получим

$$M = -\frac{(k\Phi)^2}{R + R_b}\omega. \qquad (1.9)$$

Из уравнения (1.9) видно, что механическая характеристика электрической машины постоянного тока является прямой, проходящей через начало координат [9, 11]. Максимальная эффективность торможения (максимальное значение момента M) достигается при замыкании якоря накоротко ($R_b = 0$).

Во время торможения по мере уменьшения частоты вращения ω уменьшается ЭДС E, ток I и тормозной момент M (см. уравнение 1.9). Поэтому основным недостатком динамического способа является низкая эффективность торможения при малых частотах вращения.

При рекуперативном торможении электродвигатель не отключается от сети, а ЭДС E индукции тем или иным способом повышают до значений, превышаю-щих напряжение U сети.

Регулировка магнитного потока шунтовой обмотки позволяет эффективно регулировать тормозной момент. При большом магнитном потоке в обмотках якоря вырабатывается высокая ЭДС даже на малой частоте вращения. Если эта ЭДС превышает напряжение сети, то электродвигатель пополняет сеть электрической энергией за счет кинетической энергии движущихся частей машины. Рекуперативное торможение прекращается при падении ЭДС меньше напряжения сети в результате уменьшения частоты вращения. При малом магнитном потоке шунтовой обмотки торможение происходит лишь при высокой частоте вращения. Для увеличения эффективности рекуперативного торможения целесообразно использовать устройства, повышающие напряжение, вырабатываемое электрической машиной.

Как уже отмечалось в п. 1.1.7 рекуперативное торможение эффективно на электротранспорте, когда тормозящие и скатывающиеся со спуска составы частично обеспечивают энергией разгоняющиеся и поднимающиеся в гору, снижая тем самым общее энергопотребление транспортной сети. В электротранспорте часто применяют электродвигатели с последовательным возбуждением, для которых применить рекуперативное торможение невозможно [11]. По этой причине вместо электродвигателей с последовательным возбуждением используют электродвигатели со смешанным возбуждением. При этом сериесную обмотку используют в основном двигательном режиме, а шунтовую (которая может быть и независимой) – в режиме рекуперативного торможения.

Для перехода в режим торможения противовключением изменяют полярность подводимого к якорю напряжения, в результате чего ЭДС E и напряжение U становятся совпадающими по направлению. По сути, это режим пуска двигателя в противоположном направлении. Условия такого пуска существенно хуже обычных, так как при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ток I может более чем в два раза превышать ток пуска из состояния покоя. Такой ток крайне нежелателен как для самого электродвигателя, так и для сети. Поэтому торможение противовключением целесообразно применять только при малой частоте вращения, когда остальные способы торможения малоэффективны.

Важным моментом при торможении противовключением является необходимость отключения двигателя от сети при достижении состояния покоя, так как в противном случае его вал начнет вращаться в противоположную сторону.

Более подробно изучить изменение электрических параметров машин постоянного тока во время торможения и ознакомиться с их механическими характеристиками при различных способах торможения можно по рекомендуемой литературе [9, 11].

В мехатронных системах все операции торможения целесообразно осуществлять в автоматическом режиме с использованием информации от датчиков частоты вращения и импульсных реверсивных регуляторов напряжения, применяя различные способы торможения на его различных его этапах.

1.4ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как уже было отмечено в п. 1.1.1, для изменения направления вращения электродвигетеля постоянного тока достаточно изменить полярность подключения якоря или обмотки возбуждения. У двигателя постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом возможно только изменение полярности подключения якоря. Эта простая для теоретической электротехники процедура на практике часто требует существенных затрат. При ручном управлении требуется две контактные группы, а в случае электронного управления необходимы, по меньшей мере, четыре электронных ключа. Более удобны реверсивные электродвигатели, обмотка возбуждения которых состоит из двух секций, создающих встречные магнитные потоки. Для управления направлением вращения такого электродвигателя достаточно иметь один переключатель или два электронных ключа, но такие электродвигатели применяются чрезвычайно редко.

На рисунке 1.13 представлена схема управления направлением вращения электродвигателем постоянного тока с возбуждением постоянным магнитом с использованием электромагнитных реле или контакторов.

Питание реле может быть реализовано, как от отдельного источника, так и от источников питания микроконтроллера или электродвигателей мехатронной системы. Для управления электродвигателем требуется две линии порта микроконтроллера или другого управляющего устройства.

В исходном состоянии на вход схемы с выходов микроконтроллера подаются логические сигналы нулевого уровня. Напряжение на базах транзисторов VT1 и VT2 близки к нулю, они закрыты. По обмоткам реле K1 и K2 не протекает ток, оба вывода электродвигателя M1 подключены к плюсу источника питания, т.е. замкнуты накоротко. Это обеспечивает автоматическое торможение двигателя в исходном состоянии и после окончания управляющих импульсов на входе схемы.

При подаче на линию «Вперед» сигнала логической единицы (напряжение около 5 В) через резистор R1 и эмиттерный переход транзистора VT1 начинает протекать ток, который вызывает появление тока коллектора через обмотку реле K1. В реле K1 переключается контакт K1.1, который обеспечивает подключение левого по схеме вывода электродвигателя M1 к минусу источника питания. После этого через электродвигатель протекает ток, его ротор вращается в одном из направлений. Остановка электродвигателя обеспечивается снятием сигнала логической единицы на линии «Вперед». Через эмиттерный переход транзистора VT1 перестает течь ток, он закрывается, реле K1 отключается, контакт K1.1 возвращается в исходное состояние, двигатель тормозится.

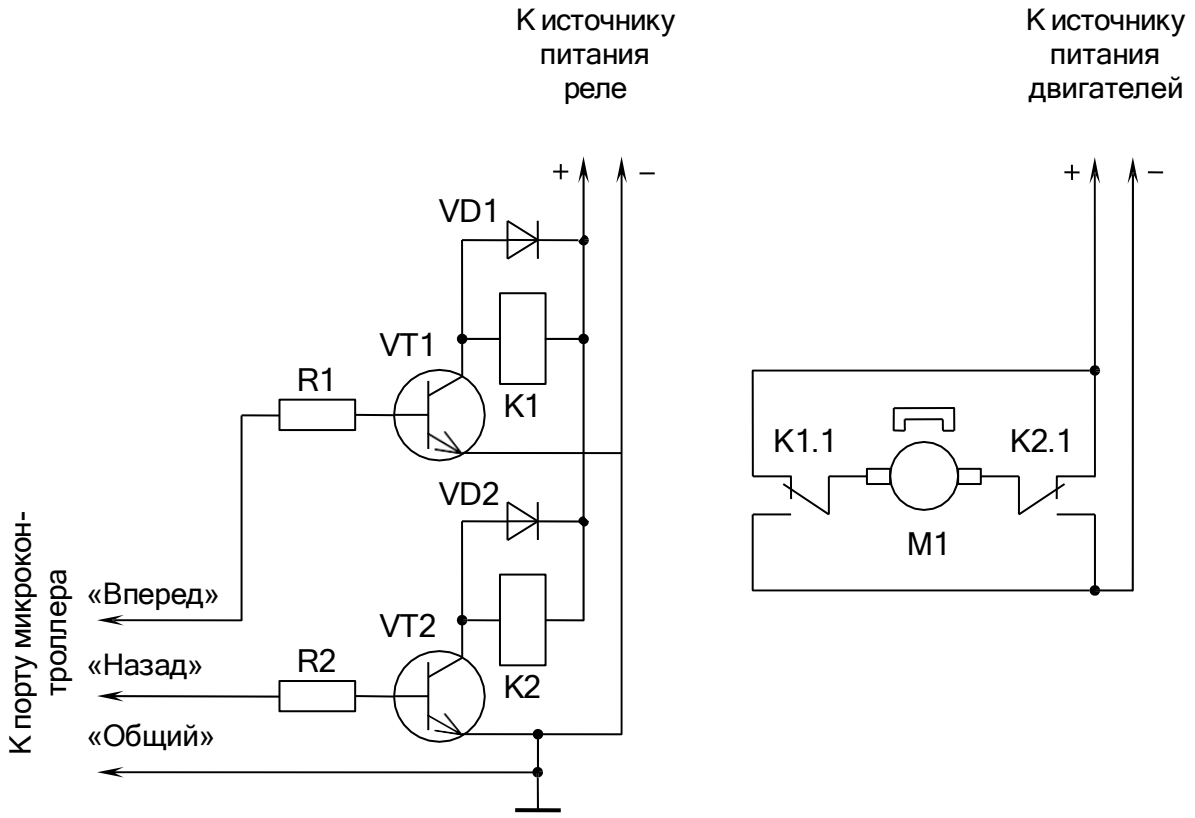


Рис. 1.13. Электрическая принципиальная схема управления направлением вращения электродвигателя с использованием электромагнитных реле

Аналогично, при подаче сигнала логической единицы на линию «Назад» открывается транзистор VT2, срабатывает реле K2 и переключается контакт K2.1. К минусу источника питания подключается правый по схеме вывод электродвигателя M1, и его ротор вращается в противоположную сторону.

Подача двух единиц на оба входа схемы («Вперед» и «Назад») не является аварийной ситуацией, так как в этом случае также обеспечивается торможение в результате замыкания выводов электродвигателя на минусе источника питания.

Недостатки схемы на рис. 1.13 обусловлены применением контактных элементов – электромагнитных реле или контакторов K1 и K2. Это снижает надежность схемы и ограничивает возможности регулировки частоты вращения электродвигателя путем ШИМ, так как контактные элементы имеют ограниченное число переключений. К достоинствам схемы следует отнести ее простоту и обеспечение гальванической развязки силовой части (электродвигатели) от управляющей (микроконтроллер).

В схеме транзисторы VT1 и VT2 выполняют роль электрических ключей и предназначены для коммутации сравнительно большого тока в обмотках реле K1 и K2 при помощи слаботочных сигналов микроконтроллера.

Диоды VD1 и VD2 необходимы для защиты транзисторов от высокого напряжения. При отключении при помощи транзистора обмотки реле в результате ее высокой индуктивности на коллекторе формируется импульс высокого напряжения, значительно превышающего напряжение питания. В отсутствии диода такой импульс может пробить транзистор, и он выйдет из строя. Диод, включенный при протекании тока по обмоткам реле обратно, во время действия импульса включается прямо. Напряжение на коллекторе превышает напряжение питания на величину, не бóльшую, чем нужно для открытия диода в прямом направлении (не более 1 В). Энергия, запасенная в магнитном поле обмоток реле, возвращается источнику питания.

Резисторы R1 и R2 необходимы для ограничения тока баз транзисторов VT1 и VT2. При отсутствии резисторов эмиттерные переходы транзисторов полностью открываются, так как напряжение логической единицы существенно больше напряжения, необходимого для их открытия (около 0,6 В). Через порт микрокон-

троллера и базы транзисторов течет максимально возможный ток, который может повредить как порт, так и транзисторы.

Расчет и выбор элементов для схемы начинают с реле K1 и K2. Их контакты должны обеспечивать коммутацию в цепи постоянного тока с номинальными значениями силы тока и напряжения электродвигателя. Напряжение, на которое рассчитаны обмотки реле, выбирают исходя из имеющихся в мехатронной системе или возможных. Предельно допустимое обратное напряжение диодов VD1 и VD2 должно быть больше напряжения питания реле, например, в 1,5 раза. Их предельно допустимый прямой ток определяется индуктивностью обмоток реле.

Предельно допустимое напряжение коллектор–эмиттер транзисторов VT1 и VT2 должно превышать напряжение питания реле K1 и K2. Для эффективного использования транзисторов предельно допустимый ток их коллекторов целесообразно выбрать как минимум в два раза большим, чем номинальный ток обмоток реле, так как при токе, близком к максимальному, существенно уменьшается коэффициент усиления. Номинальный ток обмотки реле можно определить по закону Ома через номинальное напряжение и сопротивление обмоток. Коэффициент усиления – коэффициент $h_{21Э}$ передачи тока от коллектора к базе в схеме с общим эмиттером – выбирают исходя из отношения номинального тока в обмотках реле к допустимому току базы. Для обеспечения полного открытия транзистора целесообразно выбирать транзистор с коэффициентом $h_{21Э}$, значительно больше расчетного (до 10 раз). В этом случае на нем при любом токе будет минимальное падение напряжения и мощность. Ток базы выбирают исходя из допустимых значений тока для отдельной линии порта микроконтроллера, для всего порта и всего микроконтроллера, а также с учетом желаемого энергопотребления всей схемы.

Выбранный ток базы транзисторов определяет сопротивление резисторов R1 и R2. Эти значения определяются по закону Ома с использованием напряже-ния сигнала логической единицы, из которого нужно вычесть падение напряже-ния на эмиттерном переходе (0,6 В). Для надежной работы системы мощность рассеяния резистора должна быть не менее чем в два раза больше расчетной, т.е. произведения тока базы транзистора на падение напряжения на резисторе.

Для повышения надежности и увеличения быстродействия схемы управления электродвигателем целесообразно использовать электронные ключи: бипо-

лярные и полевые транзисторы. Схемы управления на транзисторах позволяют не только изменять направление вращения, но и регулировать скорость посредством широтно-импульсной модуляции управляющих сигналов.

На рисунке 1.14 представлена мостовая схема управления электродвигателем постоянного тока малой мощности. Кроме позиционных обозначений, на схеме для пассивных компонентов указаны их номиналы, емкости в мкФ и сопротивления в Ом и кОм, а для транзисторов – типы. На резисторах обозначена их мощность рассеяния.

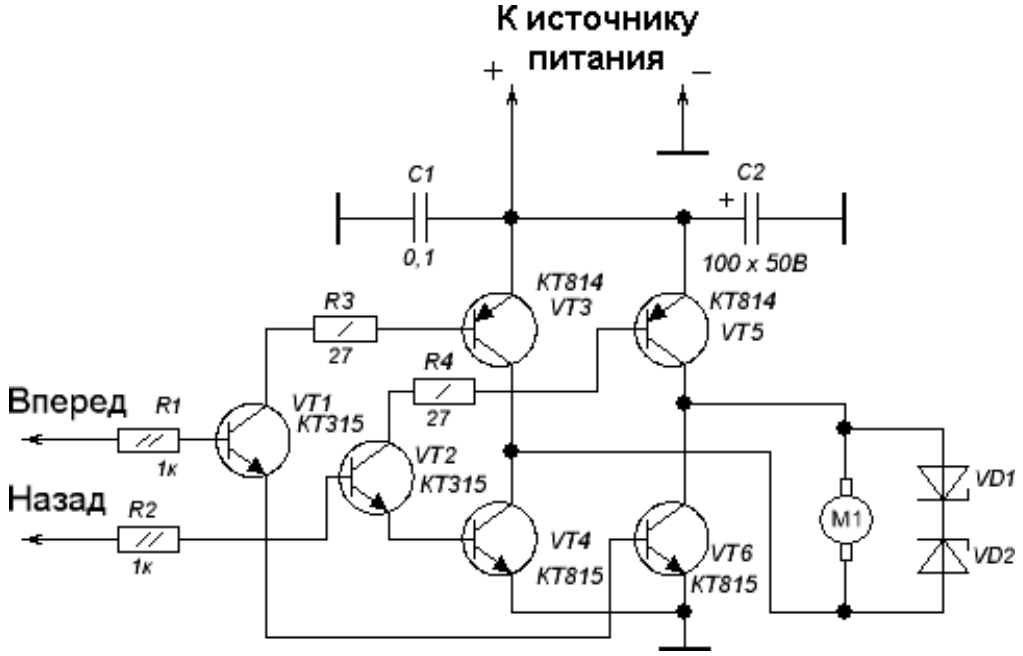


Рис. 1.14. Электрическая принципиальная схема управления направлением вращения электродвигателя с использованием биполярных транзисторов

Конденсаторы С1 и С2 являются фильтром питания. Они снижают проникновение коммутационных помех от щеток электродвигателя и процессов управления во внешнюю цепь. Все резисторы предназначены для ограничения тока в базовых цепях транзисторов (см. описание схемы на рис. 1.13).

Схема на рис. 1.14 работает следующим образом. В исходном состоянии при сигналах уровня логического нуля на обоих входах схемы транзисторы VT1 и VT2 закрыты, а, следовательно, закрыты и транзисторы VT3…VT6, так как ток через их базы может течь только при наличии тока в коллекторной цепи транзи-сторов VT1 и VT2. Электродвигатель М1 отключен от источника питания, его вал не вращается.

При подаче логической единицы на вход «Вперед» возникает электрический ток через резистор R1 и эмиттерные переходы транзисторов VT1 и VT6. Эти транзисторы открываются, в результате чего ток протекает и через резистор R3 и эмиттерный переход транзистора VT3. Он также отрывается. Транзистор VT3 обеспечивает подключение нижнего по схеме вывода электродвигателя к плюсу источника питания, а транзистор VT6 – верхнего вывода к минусу. Вал двигателя M1 начинает вращаться в прямом направлении. Для остановки двигателя необходимо снять сигнал логической единицы с входа «Вперед».

При подаче логической единицы на вход «Назад» открываются транзисторы VT2, VT4 и VT5. При этом полярность подключения электродвигателя M1 к источнику питания противоположна рассмотренной выше. Его вал вращается в обратном направлении.

Подавать сигналы единичного уровня на оба входа схемы нельзя, так как в этом случае открываются все транзисторы VT3…VT6, что приводит к короткому замыканию источника питания и при отсутствии устройств защиты выводит из строя транзисторы или источник питания. Динамическое торможение в схеме на рис. 1.14 невозможно.

Сопротивление резисторов R3 и R4 значительно меньше сопротивлений R1 и R2, так как для управления мощными выходными транзисторами VT3…VT6 требуется больший ток.

В мостовой схеме на рис. 1.14 для ограничения импульса напряжения при отключении электродвигателя применены стабилитроны. Напряжение стабилизации необходимо выбирать бóльшим, чем напряжения питания, так как в противном случае при включении двигателя возникнет короткое замыкание. Вместо стабилитронов можно использовать четыре диода, включенные обратно между каждым выводом электродвигателя и каждым полюсом источника питания.

Для повышения надежности схемы и обеспечения возможности динамического торможения целесообразно включать выходные транзисторы с общим коллектором, а их базы подключать к выходу усилителя напряжения. В этом случае может потребоваться больше, чем шесть транзисторов, а схема их соединения зависит от соотношения напряжений управляющих сигналов и источника питания.

Максимальная мощность электродвигателя М1, который можно использовать в схеме, ограничивается максимально допустимыми значениями токов (до 1 А) и напряжений (до 40 В) выходных транзисторов. Для управления мощными электродвигателями необходимо выбрать более мощные радиодетали. Схема останется прежней. Однако силовые ключи, построенные на биполярных транзисторах, имеют ряд серьезных недостатков, главными из которых являются [4]:

– низкое быстродействие, по сравнению с силовыми ключами других типов;

– низкий коэффициент передачи по току в области больших нагрузок и, как следствие, сложность и большая стоимость систем управления;

– малая стойкость к перегрузкам.

В настоящее время биполярные транзисторы почти полностью вытеснены более эффективными силовыми ключами, кроме устройств массового применения, где определяющим фактором является низкая стоимость на единицу мощности.

Удобно использовать полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET или МОП) [4]. В отличие от биполярных транзисторов они управляются не током, а напряжением. По этой причине при разработке мостовой схемы необходимо учитывать соотношение напряжения источника питания и напряжения управления. Привести одну схему для различных случаев затруднительно.

Какие бы элементы не использовались в мостовой схеме управления электродвигателем постоянного тока, она является сложной. Поскольку вариант ее реализации в большинстве применений не имеет значения, целесообразно применять специализированные микросхемы и блоки для управления коллекторными электродвигателями, широкая номенклатура которых выпускается производителями электроники разных стран для различных отраслей промышленности. Это, например, микросхемы AN8377N, AN8389S для CD-проигрывателей, универсальная микросхема L293D, микросхемы BTS7700G, BTS7750GP для электрооборудования автомобилей. Ознакомиться с устройством этих микросхем можно с использованием официальной документации производителя (datasheet), которую несложно найти в сети Интернет по наименованию микросхемы. Такие микросхемы, как правило, допускают подачу любой комбинации входных сигналов и обеспечивают возможность режима динамического торможения, а также имеют в своем составе специализированные блоки ШИМ.

Выбор микросхем для управления маломощными электродвигателями по-стоянного тока очень широк. Для поиска конкретной микросхемы целесообразно использовать соответствующие справочные издания, например, книгу [13] и сай-ты сети Интернет.

В цепях переменного тока могут эффективно работать схемы с электронным управлением на основе тиристоров [4]. В цепях постоянного тока применение ти-ристоров неэффективно, так как для отключения (закрывания) тиристора необхо-димо уменьшить напряжение на нем почти до нуля, т.е. отключить от цепи каким-то другим коммутирующим прибором. В цепях переменного тока такое снижение напряжения обеспечивается автоматически при изменении его полярности в другом полупериоде