

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИГАТЕЛЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫЕ МОЩНЫЕ МОП ПТ

### Аннотация

Сегодня МОП ПТ могут работать на следующих токах: непрерывный 28А и пиковый 70А при напряжении 100В. Их легко запараллеливать для работы при больших токах, и они являются привлекательными кандидатами для управления скоростью электрических двигателей с токами до нескольких сотен ампер. Эта статья демонстрирует экспериментальный преобразователь постоянного напряжения в постоянное, использующий параллельно соединенные мощные МОП ПТ для управления скоростью двигателя постоянного тока с отдельным выходом. Схема работает от 48-вольтового аккумулятора с максимальными токами двигателя и регенерации 200А и 140А, соответственно.

### Введение

Эффективное управление скоростью двигателей постоянного тока, работающих от источников постоянного напряжения, сегодня осуществляется при помощи схем переключающихся преобразователей, использующих принудительно коммутируемые тиристоры или биполярные транзисторы. Системы, работающие на аккумуляторах с токами в сотни ампер, имеют широкое использование в контроллерах вилочных погрузчиков и электрических транспортных средствах. Преобразователи на тиристорах большого размера, работающие на токах в тысячи ампер при постоянных напряжениях до 1500В, используются в тяговых железнодорожных устройствах высокой мощности. В таких областях применения мощные МОП ПТ могут иметь некоторые преимущества; очень высокий коэффициент усиления, устойчивые рабочие характеристики и очень быстрые скорости переключения. Мощный МОП ПТ по своей природе готов к параллельному включению (при условии, что предприняты нужные предосторожности), и преобразователи на мощных МОП ПТ, работающие на токах в несколько сотен ампер, технически вполне возможны. В этой статье мы демонстрируем техническую осуществимость схемы преобразователя, использующую параллельно соединенные МОП ПТ, обеспечивающие выход 200А, 48В для управления скоростью двигателя. Свойством схемы является ее способность выполнять электрическое торможение двигателя с помощью подачи электрической энергии обратно в источник постоянного напряжения. Это осуществляется с помощью диода МОП ПТ, который действует как компонент схемы и обеспечивает функции «инерции» и «обратного хода» для режимов «вращения» и «регенерации».

### Мощный МОП - транзистор

Базовая структура МОП ПТ показана на рис.1, а электрическая схема на рис.2. Ток протекает из области истока вертикально, затем через канал горизонтально, затем вытекает вертикально через исток. Конструкция МОП ПТ основана на вертикальной D-МОП технологии. Замкнутые гексагональные ячеистые структуры с изолированным кремниевым затвором позволяют оптимально использовать кремний и создают высоконадежный прибор. Особенность МОП ПТ (впрочем, всех мощных МОП ПТ) заключается в том, что он в структуре имеет встроенный обратно включенный диод, показанный пунктиром на рис.2. Работа обратного диода поясняется на рис.1. Ток свободно протекает через середину каждой ячейки истока через прямо смещенный P-N переход и вытекает из стока.

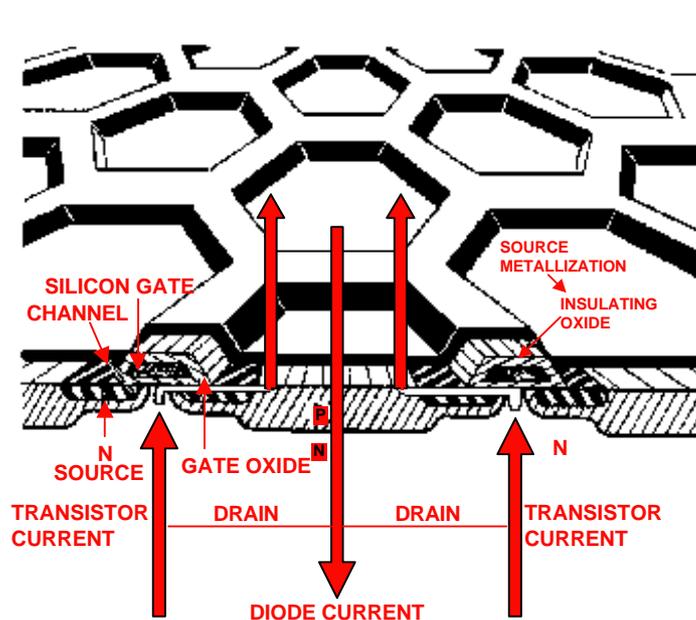


Рис. 1. Базовая структура МОП ПТ ГС (с гексагональной структурой)

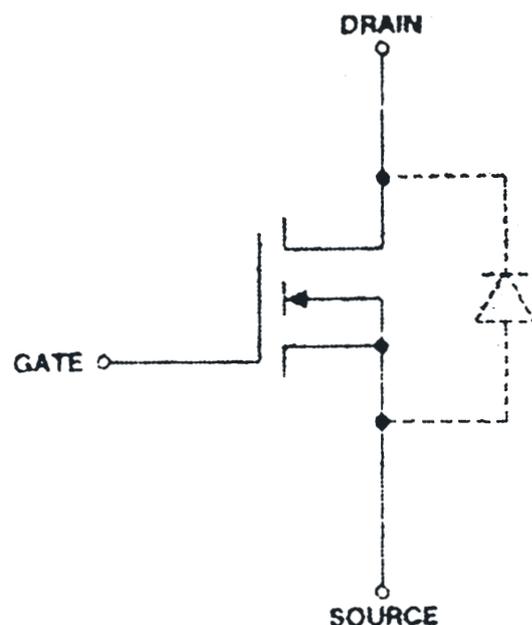


Рис.2. Обозначение мощного МОП ПТ с диодом сток-подложка

Путь этого «обратного» тока, по крайней мере, сравним в поперечном сечении с «транзисторным» каналом «прямого» тока. Не являясь ненужным, «паразитным» компонентом, этот интегральный, обратно включенный диод, следовательно, является реальным элементом схемы, способным проводить ток того же порядка, что и транзистор. В практической схеме этот интегральный, обратно включенный диод может быть важным или может не быть таковым. В некоторых схемах он не имеет значения, так как работа схемы такова, что напряжение на переключающем приборе никогда не меняет полярности и характеристики прямой проводимости диода. Например, так происходит в случае простой схемы преобразователя постоянного напряжения в постоянное для управления двигателем, которая построена без регенерации энергии и в которой напряжение двигателя никогда не превышает напряжение источника. Схема преобразователя постоянного напряжения в постоянное для управления скоростью двигателя, которая обеспечивает возможность регенеративного торможения, требует подключения выпрямительных диодов на переключающий прибор; в этом случае обратно включенный диод может быть использован для этой цели, и он, действительно, уменьшает необходимость в дополнительных дискретных выпрямительных диодах.

**Потенциальные преимущества мощных МОП ПТ для приводов двигателей**

Мощный МОП ПТ имеет ряд уникальных свойств, которые делают его потенциально привлекательным переключающим компонентом для приводов с преобразователями. Эти свойства кратко изложены ниже:

**Высокий коэффициент усиления**

МОП ПТ - это прибор, управляемый напряжением. Затвор изолирован электрически от истока слоем окисла кремния. Затвор пропускает только незначительный ток утечки, порядка наноампер, и коэффициент усиления по постоянному току, используемый для биполярных транзисторов, для МОП ПТ не имеет смысла. Более полезным параметром является проводимость. Это изменение тока стока, вносимое изменением на 1В напряжения на затворе. Проводимость МОП ПТ IRF150 имеет типовое значение 10 А/В.

Другим важным преимуществом является то, что в отличие от биполярного транзистора коэффициент усиления МОП ПТ не уменьшается с увеличением тока. Это означает, что МОП ПТ способен проводить высокий пиковый ток без проявления тенденции биполярного транзистора «выходить из насыщения». Типовые соотношения между напряжением затвор-исток и током стока показаны на рис.3. Так как коэффициент усиления МОП ПТ очень высок, то требуемая схема запуска относительно проста. Однако, следует ясно представлять, что, хотя затвор фактически не потребляет ток при стационарных условиях, это совсем не так в условиях переключения и переходных процессах. Собственные емкости затвор-исток и затвор-сток должны соответственно заряжаться и разряжаться, чтобы достигать желаемой скорости переключения, и схема запуска должна иметь существенно малый выходной импеданс, чтобы поддерживать требуемый ток заряда и разряда. Даже если эти требования нужно выполнять, остается фактом то, что схемотехника включения МОП ПТ существенно проще, чем та, что требуется для биполярного транзистора.

**Надежность**

Одним из замечательных свойств МОП ПТ является то, что он не подвержен явлению вторичного пробоя биполярного транзистора и, как результат этого, он имеет устойчивые рабочие характеристики переключения. Этому преимуществу есть простое физическое объяснение. Если внутри МОП ПТ происходит локализованный, деструктивный нагрев, то в этой области снижается подвижность носителей. В результате, прибор имеет положительный температурный коэффициент и обладает действием самозащиты, заставляя токи распределяться равномерно по всему кремнию. Область безопасной работы МОП ПТ IRF150 показана в качестве примера на рис.4. Обратите, что область безопасной работы для 10 мксек

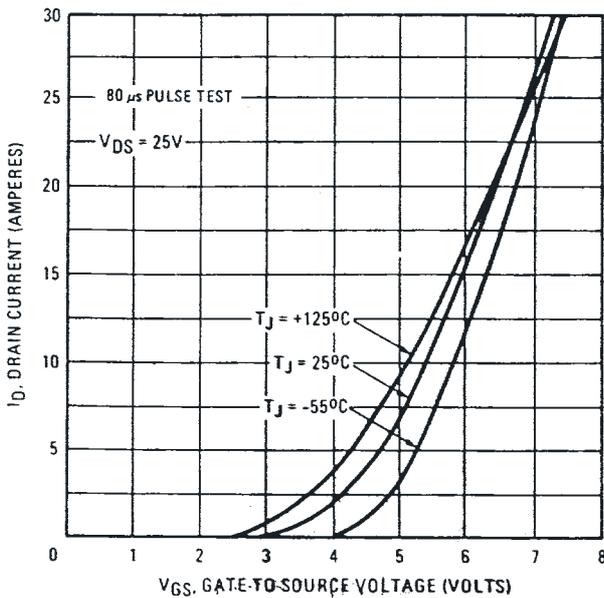


Рис.3. вольт-амперные характеристики IRF150

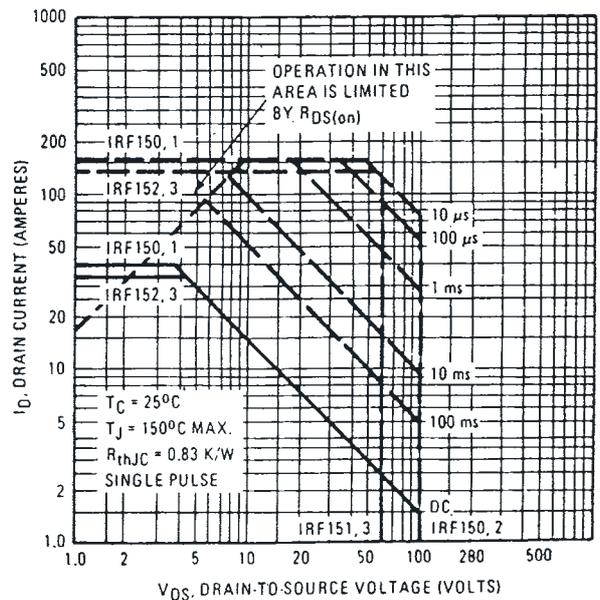


Рис.4. Максимальная область безопасной работы IRF150

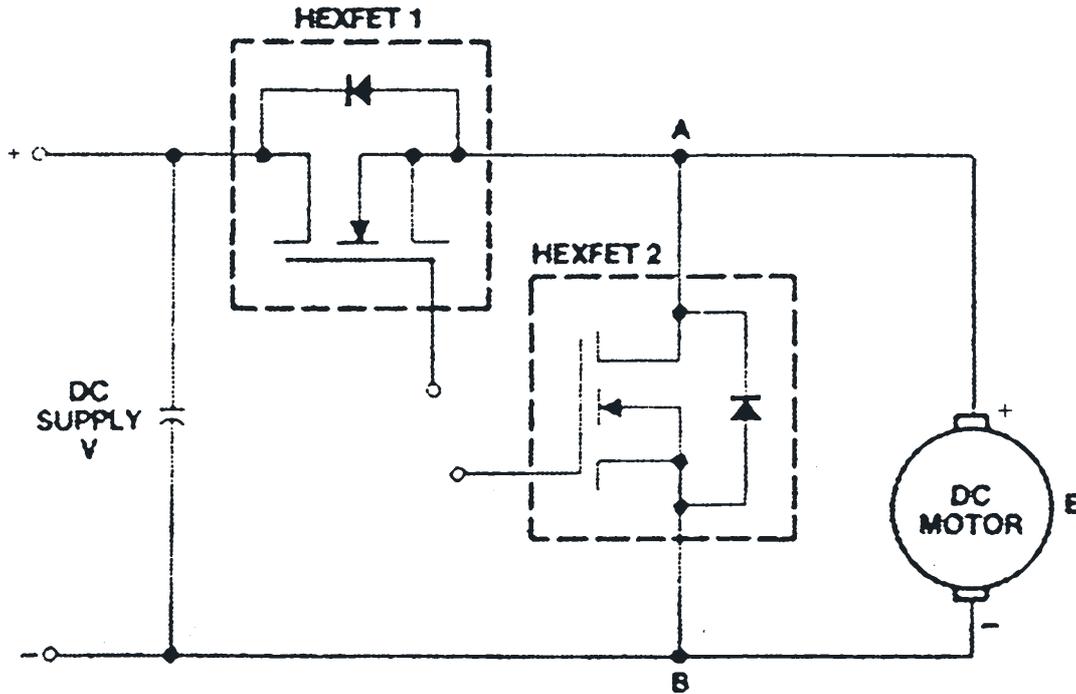


Рис.5. Базовая двухступенчатая схема преобразователя постоянного тока на МОП ПТ

полностью прямоугольная; это означает, в принципе, что этот прибор может переключать 70А при 100В. Конечно, хорошая практика разработки не предлагает работать на этом пределе. Конечно, отсутствие вторичного пробоя важно для схем применения этого типа.

**Легкость параллельного соединения**

Мощные МОП ПТ, в принципе, легко включать параллельно, так как положительный температурный коэффициент заставляет ток распределяться по параллельным приборам. Поэтому эти приборы пригодны для конструкций преобразователей, предназначенных для токов в несколько сотен ампер, и проблема запаралеливания будет значительно меньше, чем при использовании биполярных транзисторов.

**Базовая двухквadrантная схема преобразователя на МОП транзисторах**

Рис.5 показывает базовую схему преобразователя постоянного напряжения в постоянное, которая обеспечивает непрерывное управление скоростью в режиме «вращения». (т.е. когда двигатель получает энергию от источника постоянного напряжения), а также обеспечивает функцию, когда двигатель возвращает регенеративную энергию источнику постоянного напряжения по всему диапазону скорости. Идеализированные формы сигналов, описывающие работу, показаны на рис.6, а рис.7 показывает два рабочих квадранта схемы. В режиме работы «вращения» МОП ПТ 1 включается и

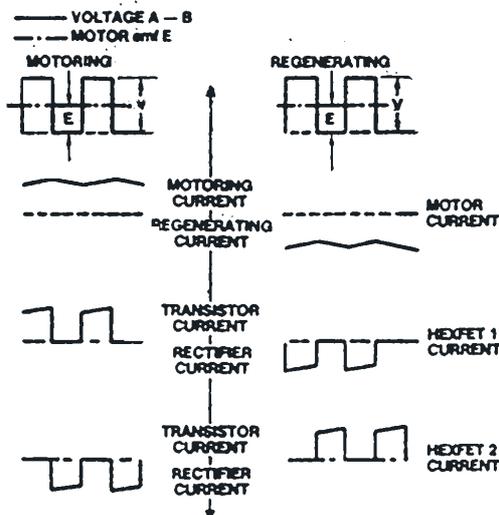


Рис.6. Идеальная форма сигналов при работе схемы на рис. 5

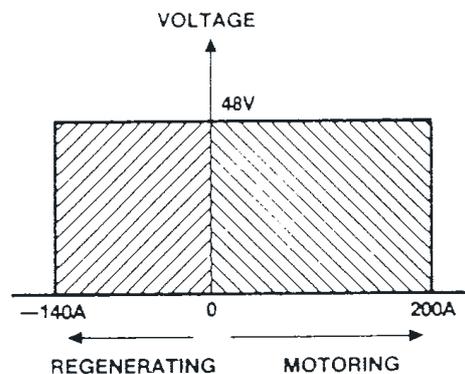


Рис.7. Цикл вращения двигателя и регенерации тока в схеме рис.5.

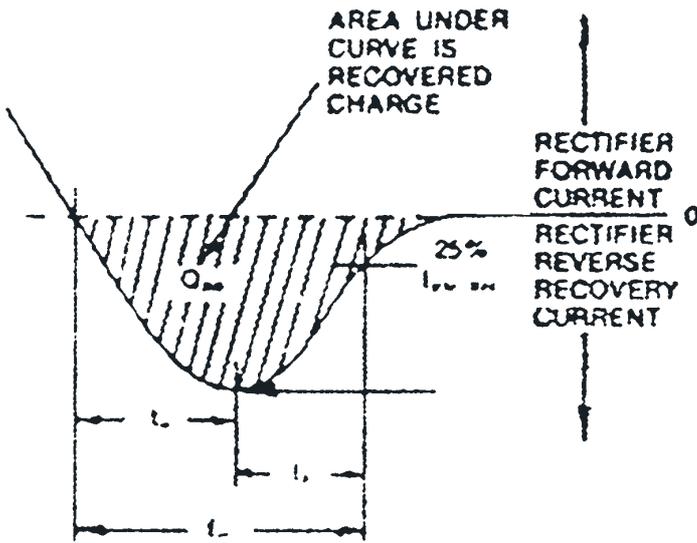


Рис. 8. Диаграмма обратного восстановления диода

выключается с соответствующей скоростью повторения и обеспечивает управление средним напряжением, подаваемым на двигатель. МОП ПТ 2 выключен, но его интегральный, обратно включенный диод тело-сток действует как обычный инерционный выпрямительный диод и проводит инерционный ток двигателя во время периодов времени, когда МОП ПТ 1 выключен. Когда требуется, чтобы двигатель работал как генератор, и возвращал энергию источнику постоянного напряжения, МОП ПТ 2 включается и выключается и управляет током, подаваемым от двигателя к источнику. В этом режиме работы МОП ПТ 1 выключен, но его интегральный, обратно включенный выпрямительный диод проводит ток двигателя обратно к источнику постоянного напряжения со время интервалов времени, когда МОП ПТ 2 выключен. Для того, чтобы двигатель «регенерировал», необходимо, чтобы он имел либо шунт, либо отдельно возбуждаемую обмотку. Последовательно включенная обмотка возбуждения невыполнима, кроме случая, когда соединения к ней являются реверсивными для регенеративного режима работы, что не является распространенным,

Главными задачами данной статьи являются демонстрация работы группы параллельно соединенных МОП ПТ при токах порядка сотен ампер и использования обратно включенного диода в качестве равноправного элемента схемы в базовой двух-квadrантной схеме преобразователя, показанной на рис.5. Для достижения этих целей необходимо рассмотреть некоторые детали работы МОП ПТ. Мы это делаем в следующем разделе.

**Использование диода МОП-транзистора**

При использовании внутреннего диода МОП ПТ важным является его характеристика обратного восстановления. Этот выпрямительный диод является обычным прибором с P-N переходом, и поэтому он обладает классическим зарядом обратного тока восстановления. Можно сказать, что выпрямительный диод выключается в обратном направлении на короткий период времени, как показано на рис.8. Время обратного восстановления зависит от рабочих условий. Для МОП ПТ IRF150, имеющего 28 А непрерывного тока при 100В (этот тип транзистора используется здесь), время обратного восстановления составляет около 400 нсек при максимальной рабочей температуре и около 260 нсек при 25°C для начального пикового прямого тока 70 А и di/dt, равной 100 А/мксек.

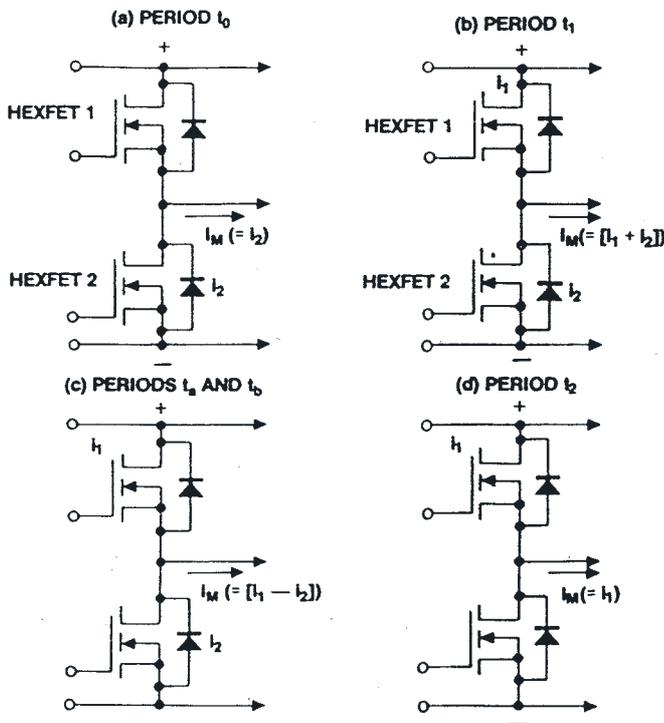


Рис. 9. Коммутация инерционного тока от диода 2 на транзистор 1. МОП ПТ 1 и 2 образуют последовательно соединенную пару на источнике постоянного питания

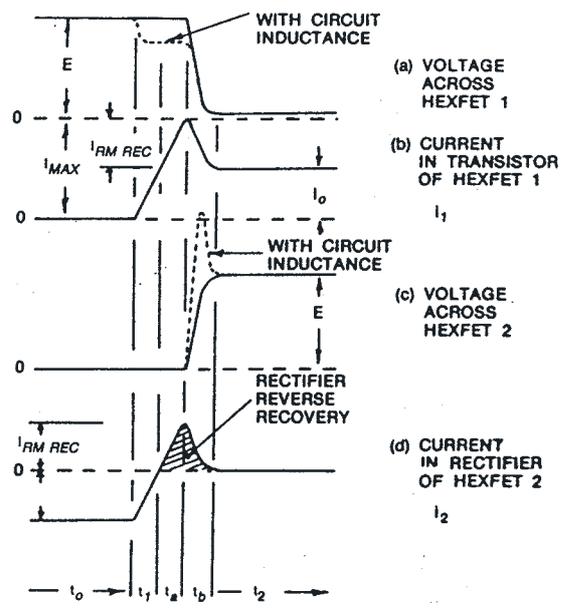


Рис. 10. Теоретическая форма сигналов тока и напряжения при последовательной коммутации на рис. 9

Обратное восстановление представляет потенциальную проблему при выключении любого выпрямительного диода. Чем медленнее выпрямительный диод, тем больше проблема. Хотя диод является относительно быстрым - не таким быстрым, как самые быстродействующие дискретные выпрямительные диоды, однако быстрее, чем сравнимые по параметрам выпрямительные диоды общего назначения - по сравнению с самим МОП ПТ он достаточно медленный. Это представляет проблему в схеме преобразователя. Чтобы проиллюстрировать эту проблему, мы рассмотрим рабочий режим. Рабочее условие, которое грозит неприятностями, имеет место тогда, когда инерционный ток коммутируется от диода тело-сток МОП ПТ 2 на транзистор МОП ПТ 1. Рабочая последовательность изображена на рис.9. Теоретические формы сигналов показаны на рис.10. Исходя из последовательности коммутации, которая короче полного основного цикла работы схемы, предполагается, что постоянный ток  $I_M$  протекает через двигатель. В течение рабочего периода  $t_0$  ток  $I_M$  по инерции протекает через выпрямительный диод МОП ПТ 2. В начале рабочего периода  $t_1$ , МОП ПТ 1 включается и ток нагрузки начинает передаваться на транзистор МОП ПТ 1. Ток  $I_1$ , в МОП ПТ 1 возрастает в то время, как ток  $I_2$  протекающий в выпрямительном диоде МОП ПТ 2, снижается. Сумма  $I_1$  и  $I_2$  равна  $I_M$ . В конце периода времени  $t_1$ , ток, протекающий в МОП ПТ 1, равен току двигателя  $I_M$  и ток, протекающий в выпрямительном диоде МОП ПТ, медленно становится равным нулю.

Заметьте, что в течение периода времени  $t_1$  а также во время последующего периода времени  $t_2$ , напряжение на МОП ПТ 1 теоретически равно полному напряжению источника. Это потому, что пока выпрямительный диод МОП ПТ 2 остается в проводящем состоянии, напряжение на нем может быть только напряжением его проводимости; разница между этим относительно малым напряжением и полным напряжением источника появляется на МОП ПТ 1.

Эти рассуждения не принимают во внимание индуктивность схемы. На практике некоторая часть напряжения источника будет падать на индуктивности схемы и напряжение на МОП ПТ 1 будет меньше напряжения источника питания на величину падения напряжения на этой индуктивности. Типовое напряжение на МОП ПТ 1 с учетом падения напряжения на индуктивности схемы представлено пунктирной линией на рис.10.

Если выпрямительный диод работал без восстановления заряда, то процесс коммутации будет завершен к концу периода времени  $t_1$ . На практике ток выпрямительного диода меняет направление в течение периодов восстановления  $t_a$  и  $t_b$ . В течение периода времени  $t_a$  обратный ток  $I_2$  увеличивается, пока не достигнет сетевой пиковой величины  $I_{RM(rec)}$ . Ток  $I_1$  теперь является суммой обратного тока выпрямительного диода  $I_2$  и тока двигателя  $I_M$  и его пиковое значение  $I_{max}$  является суммой  $I_M$  и  $I_{RM(rec)}$ . Напряжение на МОП ПТ 1 теоретически еще остается высоким, так как напряжение на выпрямительном диоде МОП ПТ 2 еще относительно низкое.

В течение второй части периода времени восстановления  $t_b$  выпрямительный диод МОП ПТ 2 начинает поддерживать обратное напряжение. Ток восстановления выпрямительного диода  $I_2$  снижается и напряжение на МОП ПТ 1 падает до своего нижнего уровня проводимости. Отметьте влияние, которое оказывает индуктивность схемы на переходные процессы с избыточным напряжением на выпрямительном диоде, что показано пунктирной линией на рис.10.

Очевидны некоторые важные моменты. Первое:  $t_1$ ,  $t_a$  и в меньшей степени  $t_b$  являются периодами времени с высоким рассеиванием мощности. Второе: пиковый ток в МОП ПТ 1 является суммой тока двигателя и обратного тока восстановления выпрямительного диода, и этот пиковый ток возникает в момент, когда напряжение в МОП ПТ высокое. Важно, чтобы этот пиковый ток не превышал норму тока  $I_{DM}$  МОП ПТ. Действительно, если МОП ПТ переключается со скоростью, близкой к своим предельным возможностям, и никаких специальных мер предосторожности не принято, то это произойдет. Если пиковый ток существенно превысит эту норму, произойдет выход из строя диода, как объяснено в литературе (1). В основном, пиковый обратный ток восстановления выпрямительного диода может быть снижен только замедлением скорости изменения тока в процессе коммутации. Это иллюстрируется рис.11. Скорость изменения тока может управляться либо установкой индуктивности в схему, либо специальным замедлением фронта нарастания импульса затвора, которым запускается МОП ПТ 1. Линейная катушка индуктивности, установленная в схему для замедления скорости изменения тока, когда МОП ПТ включается, не применима, т.к. она способствует образованию пика напряжений при переключении в момент выключения, не говоря уже ничего о том, что это добавочный компонент. Более хорошим практическим решением является простое замедление включения МОП ПТ путем замедления запускающего сигнала. Пиковый ток, проводимый МОП ПТ, может быть снижен почти до любой желаемой величины за счет увеличения мощности рассеивания. Это является необходимым компромиссом для того, чтобы поддерживать пиковый ток в безопасных пределах, практически потери переключения при усреднении по полному рабочему циклу оказываются относительно малы для рабочих частот, которые интересны в этой схеме применения (обычно от нескольких сотен до нескольких тысяч Гц). Отметьте, что нет необходимости замедлять выключение, следовательно, энергия рассеивания при выключении будет относительно небольшой по сравнению с энергией при включении. Как объясняется подробно в литературе (1), в этой схеме применения вероятно приложение существенной  $dv/dt$  на МОП ПТ, который работает как диод во время его обратного восстановления. Так как в это время прибор чувствителен к  $dv/dt$ , необходимо добавлять схему гашения между стоком и истоком, как показано на рис.21.

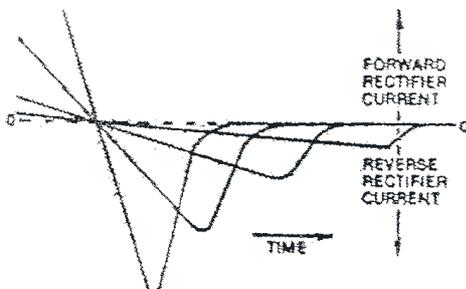


Рис. 11. Уменьшение пика выпрямленного обратного тока при снижении скорости изменения тока

### Параллельное соединение МОП-транзисторов

Ключевым вопросом, который является основным для успешного функционирования преобразователя, работающего на сотнях ампер, является возможность запараллеливания МОП ПТ. Должны быть рассмотрены два вопроса: (1) - «зафиксированное» распределение тока (2) - динамическое распределение тока в условиях переходных процессов переключения,

### Фиксированное распределение тока

В периоды времени вне переходных процессов переключения ток в группе параллельных МОП ПТ будет распределяться по отдельным приборам обратно пропорционально их сопротивлению во включенном состоянии. Прибор с наименьшим сопротивлением будет проводить наибольший ток. Это будет в некоторой мере самокомпенсацией, т.к. потери мощности в этом приборе будут наибольшими. Он будет разогреваться больше всех при работе, и увеличение сопротивления во включенном состоянии из-за нагрева будет больше, чем у других приборов, что будет приводить к уравниванию тока.

Анализ «наихудшего случая» тока прибора в группе из «N» параллельно соединенных приборов может быть основан на упрощающем допущении, что (N-1) приборов имеют наивысшую предельную величину сопротивления во включенном состоянии в то время, как только один прибор имеет наименьшее предельное значение сопротивления во включенном состоянии. Тогда анализ может учитывать ток одного прибора.

Эквивалентная электрическая схема, показанная на рис. 12, упрощает анализ еще больше с помощью допущения, что число приборов существенно велико, и что ток, протекающий через каждый из приборов с высоким сопротивлением, примерно равен  $I_{TOT}/(N-1)$ . При этом предположении падение напряжения на одном приборе с низким сопротивлением и, следовательно, ток в нем могут быть рассчитаны.

Сопротивление во включенном состоянии каждого из приборов с «высоким сопротивлением» при рабочей температуре T будет равно:

$$R_{(max)T} = R_{(max)25} \left( 1 + \left[ (T_A - 25) + \frac{I_{TOT}^2}{(N-1)^2} R_{(max)T} R_{JA} \right] K \right)$$

где  $R_{(max)25}$  - предельное максимальное значение сопротивления, во включенном состоянии при 25°C,  $R_{JA}$  - полное тепловое сопротивление переход-окружающая среда в °C/Вт, а K-изменение сопротивления во включенном состоянии на °C.

$$R_{(max)T} = \frac{R_{(max)25} (1 + [T_A - 25] K)}{1 - R_{(max)25} \frac{I_{TOT}^2}{(N-1)^2} R_{JA} K}$$

Падение напряжения V на параллельной группе будет:

$$V = \frac{I_{TOT}}{(N-1)} R_{(max)T}$$

Сопротивление одного низкоомного прибора при его рабочей температуре будет:

$$R_{(min)T} = R_{(min)25} \left( 1 + [(T_A - 25) + V I_{(max)} R_{JA}] K \right)$$

где  $R_{(min)25}$  - предельное минимальное значение сопротивления во включенном состоянии при 25°C, а  $I_{(max)}$  - ток в этом приборе.

$$R_{(min)T} = \frac{V}{I_{(max)}}$$

$$I_{(max)} = \frac{-b + \sqrt{(b^2 + 4aV)}}{2a}$$

где

$$b = R_{(min)25} (1 + [T_A - 25] K)$$

$$a = R_{(min)25} V R_{JA} K$$

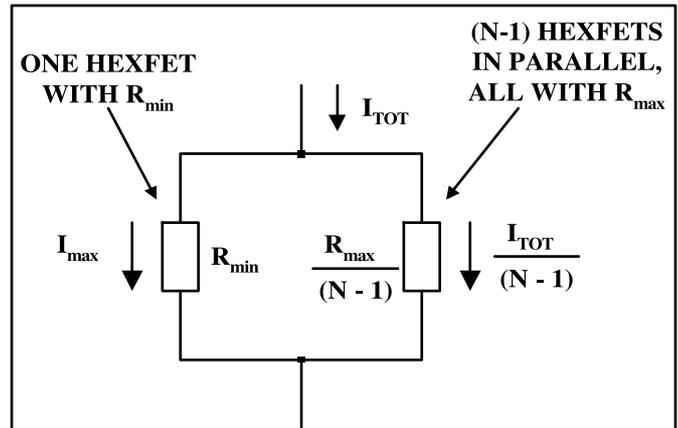


Рис. 12. Упрощенная эквивалентная схема, показывающая разбаланс тока для квазиустойчивого состояния

Нижеприведенный пример показывает наихудшую степень распределения тока, которая может ожидаться при применении вышеуказанных формул к МОП ПТ |RF150 при следующих предположениях:

$$R_{(\max) 25} = 0.045\Omega$$

$$R_{(\min) 25} = 0.035\Omega$$

$$R_{JA} = 3^\circ\text{C}/\text{Вт}$$

$$\frac{I_{\text{ТОГ}}}{(N-1)} = 20\text{А}$$

$$K = 0.006 \text{ на } ^\circ\text{C}$$

$$T_A = 35^\circ\text{C}$$

Используя первые три соотношения из приведенных выше, можно вычислить, что максимальная величина тока прибора для «наихудшего случая» равна 27 А для гипотетической ситуации, когда все приборы, кроме одного, имеют высокое предельное сопротивление во включенном состоянии, равное 0,045 Ом, и каждый проводит 20 А, в то время, как один оставшийся имеет низкое предельное сопротивление во включенном состоянии, равное 0,03 Ом.

### Динамическое распределение тока в условиях переключения

#### **Включение**

Необходимо предпринять определенные действия, чтобы убедиться, что ток распределяется должным образом между группой параллельно соединенных приборов во время переходного процесса переключения. Так как не все МОП ПТ имеют идентичные характеристики порогов и коэффициентов усиления, некоторые из них будут стремиться переключиться раньше, чем другие, и пытаться получить большую долю тока. К этой проблеме добавляется то, что часть индуктивности схемы, связанная с каждым прибором, может отличаться друг от друга, и это также будет вносить дисбаланс в схему при переключении. Подробный анализ этих сигналов можно найти в литературе (2). Здесь мы ограничимся кратким качественным описанием различных явлений, происходящих во время переходного процесса переключения.

Проблема будет представлена рассмотрением форм сигналов переключения для базовой схемы преобразователя, показанной на рис.5, которая содержит один МОП ПТ в каждом «рабочем» и «регенерирующем» положении. Рабочим режимом мы будем считать такой режим, когда МОП ПТ 1 включается и выключается, в то время как ток двигателя (предполагаемый плавным благодаря индуктивности двигателя) чередуется между этим МОП ПТ и диодом тело-сток МОП ПТ 2, который действует как инерционный выпрямительный диод.

На рис. 13 показаны формы сигналов тока стока, напряжения сток-исток и напряжения затвора во время интервала включения. Мы уже видели, что для того, чтобы ограничить пиковый ток восстановления внутреннего диода МОП ПТ 2, напряжение запуска затвора МОП ПТ 1 должно подаваться с управляемой скоростью. По этой причине подаваемый импульс запуска показан возрастающим с относительно малой скоростью. В момент времени  $t_0$  импульс запуска начинает свой подъем. В момент  $t_1$ , он достигает порогового значения МОП ПТ и ток стока начинает возрастать. В этой точке происходят два события, которые заставляют сигнал напряжения затвор-исток отклоняться от своего «оригинального пути». Первое - индуктивность, включенная последовательно с истоком, которая является общей для схем затвора, развивает индукционное напряжение в результате возрастания тока истока. Это напряжение противодействует прилагаемому напряжению запуска затвора и замедляет скорость нарастания напряжения,

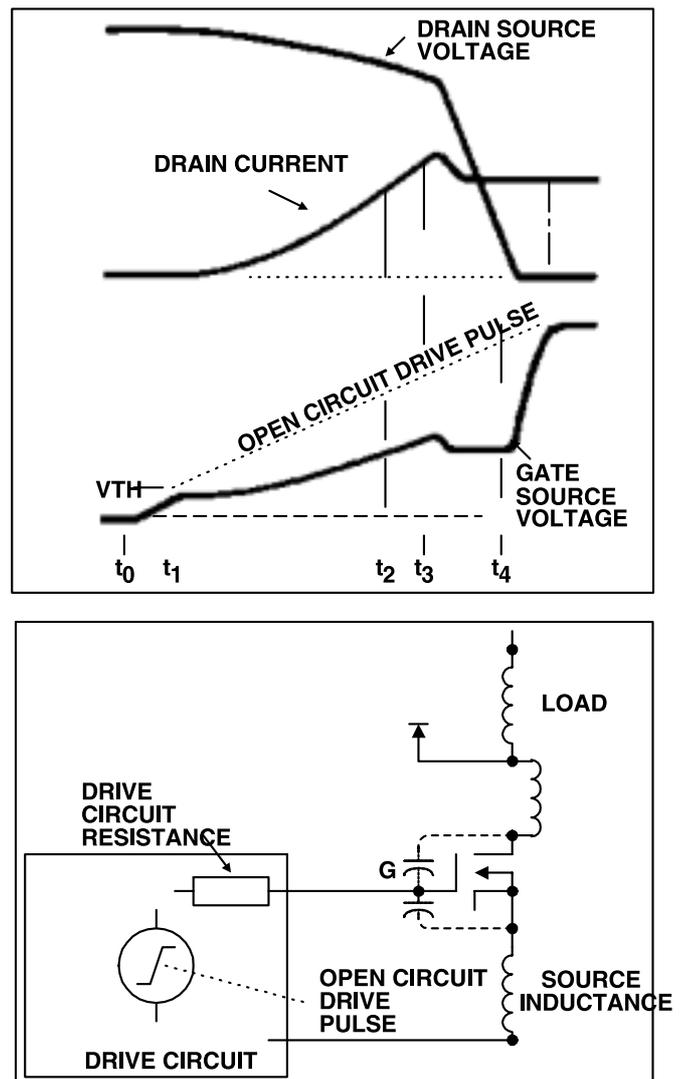


Рис. 13. Форма сигналов при включении МОП ПТ

появляющегося прямо между выводами затвора и истока; это в свою очередь замедляет скорость нарастания тока истока. Это эффект отрицательной обратной связи, увеличение тока в истоке создает противодействующее напряжение на затворе, которое стремится оказывать сопротивление изменению тока.

Вторым фактором, влияющим на напряжение затвор-исток, является так называемый «эффект Миллера». В течение периода времени от  $t_1$  до  $t_2$  определенная величина напряжения падает на индуктивность схемы, последовательной со стоком, и напряжение сток-исток начинает падать. Снижение напряжения сток-исток отражается на емкости сток-затвор, проходя через нее ток разряда увеличивает эффективную емкостную нагрузку на схеме запуска. Это в свою очередь увеличивает падение напряжения на импедансе схемы запуска и снижает скорость нарастания напряжения, появляющегося между выводами затвора и истока. Это тоже эффект отрицательной обратной связи, увеличение тока в стоке приводит к падению напряжения сток-исток, что в свою очередь замедляет нарастание напряжения затвор-исток и имеет тенденцию к противодействию увеличению тока стока. Эти процессы иллюстрированы графически на рис. 14.

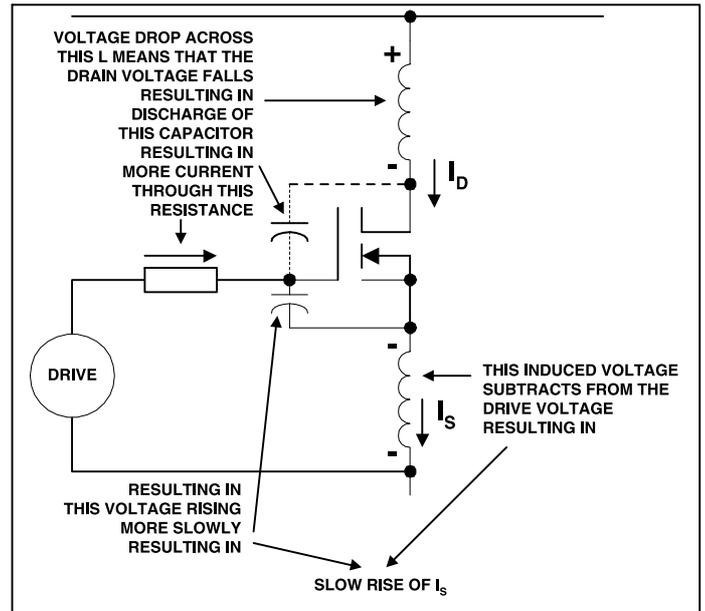


Рис. 14. Диаграмма процессов при включении МОП ПТ

Это продолжается в течение всего периода времени от  $t_1$  до  $t_2$ , в то время как ток в МОП ПТ увеличивается до уровня тока  $I_M$ , уже втекающего в выпрямительный диод, и это продолжается в течение следующего периода времени от  $t_2$  до  $t_3$ , в то время как ток продолжает возрастать при обратном восстановлении выпрямительного диода.

В момент времени  $t_3$  выпрямительный диод начинает поддерживать напряжение, в то время как ток стока и напряжение стока начинают падать. Скорость спада напряжения стока теперь подчиняется эффекту Миллера, и достигается состояние равновесия, при котором напряжение стока падает со скоростью, необходимой для того, чтобы напряжение между выводами затвора и истока удовлетворяло уровню тока стока, установленного нагрузкой. Вот почему напряжение затвор-исток падает с падением тока восстановления выпрямительного диода, а затем остается постоянным на уровне, соответствующем току двигателя, в то время как напряжение стока падает.

И наконец, в момент времени  $t_4$  МОП ПТ полностью включается и напряжение затвор-исток быстро поднимается до величины напряжения «открытой схемы».

Форма сигнала напряжения затвор-исток для схемы, показанной на рис.5 только с одним прибором в каждой позиции, дает ключ к разрешению трудностей, которые можно ожидать от параллельно соединенных приборов. Первой потенциальной трудностью является то, что если мы подадим общий запускающий сигнал на все затворы в параллельной группе, тогда включение первого прибора - с наименьшим пороговым напряжением - будет вести к замедлению подъема напряжения на затворах остальных транзисторов и последующей задержке включения этих приборов. Это будет происходить из-за эффекта Миллера. С другой стороны, эффект индуктивной обратной связи влияет только на напряжение затвора своего собственного прибора (предполагая, что каждый исток имеет свою собственную отдельную индуктивность).

Второй потенциальной трудностью является то, что если индуктивности отдельных истоков не равны, тогда это приведет к динамическому разбалансу схемы, даже если сами приборы прекрасно совместимы. Очевидно, для решения этого нужно убедиться, что индуктивности, относящиеся к отдельным приборам, имеют как можно более близкую друг к другу величину. Это может быть сделано путем тщательной разводки топологии схемы.

Как подробно рассмотрено в литературе (3), имеется ряд других параметров схемы и прибора, которые вносят свой вклад в динамический разбаланс. Выводы, представленные в вышеуказанной статье, указывают однако, что проблема не очень трудна, пока речь идет о нижеперечисленных пунктах, для того чтобы быть уверенным в успешном распределении тока между параллельными МОП ПТ при включении:

- пороговые напряжения должны быть в пределах нормы;
- паразитные индуктивности по всей схеме должны быть уравнены правильной разводкой топологии;
- затворы должны быть развязаны индивидуальными резисторами, но не более, чем это действительно требуется, как это будет пояснено дальше.

**Выключение**

Подобные же рассуждения применяются к динамическому распределению тока в течение интервала выключения. Рис. 15 показывает теоретические формы сигналов для МОП ПТ 1 в схеме на рис.3 в течение интервала выключения. В момент  $t_0$  напряжение на затворе начинает падать. В момент 11 напряжение затвора достигает уровня, который только поддерживает ток стока  $I$ . Теперь напряжение сток-исток начинает расти. Эффект Миллера управляет скоростью подъема напряжения стока и удерживает напряжение затвор-исток: на уровне, соответствующем постоянному току стока. В момент 13 подъем напряжения стока завершен и напряжение затвора начинает падать со скоростью, определяемой импедансом схемы затвор-исток, в то время как ток стока падает до нуля.

Рис. 16 показывает теоретические формы сигналов для двух параллельно соединенных МОП ПТ, у которых затворы напрямую соединены. Для рассмотрения индуктивность стока предполагается равной нулю. В момент  $t_1$  напряжение затвора достигает точки, в которой МОП ПТ «В» больше не может поддерживать свой ток стока. Теперь перераспределяется ток нагрузки. Ток в МОП ПТ «В» снижается в то время, как в МОП ПТ «А» возрастает.

В момент  $t_2$  МОП ПТ «В» не может больше поддерживать свой ток. Оба МОП ПТ сейчас работают в своих «линейных» областях, и напряжение стока начинает возрастать. Напряжение затвор-исток практически поддерживается постоянным эффектом Миллера, в то время как токи в двух МОП ПТ имеют свои значения. Сказать точнее - разбаланс тока в этом примере значителен. Хотя разбаланс при выключении является потенциально более серьезной проблемой, анализ в литературе (3) показывает, что это не так на практике, если выключаемые приборы имеют схему с очень низким импедансом в цепи запуска затвора. Это само по себе будет почти гарантировать ограниченный разбаланс при выключении. Подводя итог, для достижения хорошего распределения тока при выключении должны приниматься те же самые меры предосторожности, что и при включении с добавлением «тяжелого» запуска. Рис. 17 показывает, что при использовании параллельных приборов создается путь с низким импедансом, который может быть склонен к паразитному самовозбуждению. По этой причине необходима развязка затворов, достаточная для предотвращения генерации.

**Полная схема функционального управления для двухквадрантного преобразователя**

Упрощенная функциональная схема схемотехники управления и запуска для двухквадрантного преобразователя на МОП ПТ показана на рис. 18. Она направлена на демонстрацию базового рабочего принципа всей системы преобразователя, а различия в некоторых незначительных деталях от действительной практической схемотехники будут представлены ниже (рис.22).

Система управления имеет внешнюю петлю обратной связи по напряжению, которая сравнивает напряжение на двигателе с опорным напряжением и вырабатывает результирующий сигнал «ошибки», чтобы поддерживать напряжение на двигателе равным величине опорного напряжения. В практической схеме петля управления напряжением может дополняться сигналом, пропорциональным падению напряжения на роторе, чтобы создать стабилизацию действительной скорости двигателя. В качестве альтернативы, сигнал обратной связи по напряжению может быть заменен сигналом от тахогенератора, чтобы создать более точную стабилизацию скорости. Внутренняя петля управления стабилизирует ток до уровня, требуемого для удовлетворения нагрузки на двигатель. Обратная связь управления током также определяет частоту переключения преобразователя, стабилизируя ток пульсаций от пика к пику между предварительно установленными верхним и нижним пределами. Это достигается включением МОП ПТ всякий раз, когда ток падает на заданную величину ниже опорного значения и выключает МОП ПТ всякий раз, когда ток поднимается на заданную величину выше опорного значения. Петля управления током также обеспечивает мгновенное ограничение пикового тока МОП ПТ и двигателя. Это осуществляется просто установкой максимального предела для сигнала опорного тока и

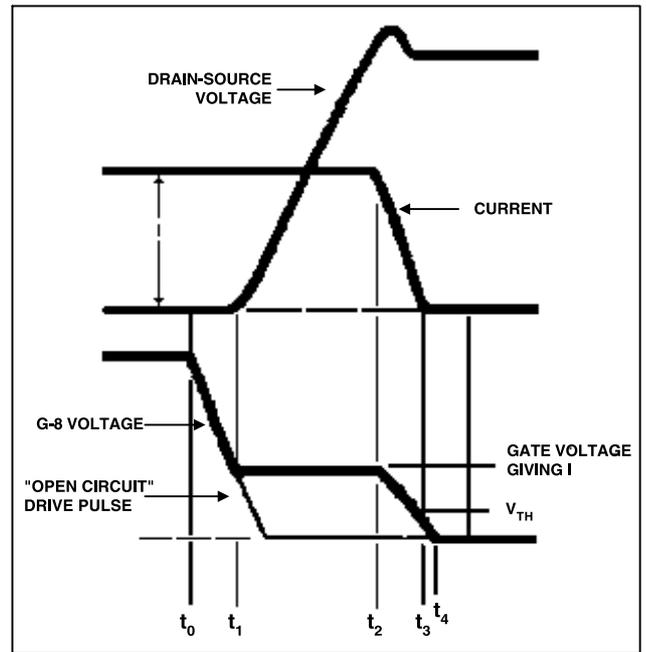


Рис. 15. Форма сигналов при выключении МОП ПТ

создается путь с низким импедансом, который может быть склонен к паразитному самовозбуждению. По этой причине необходима развязка затворов, достаточная для предотвращения генерации.

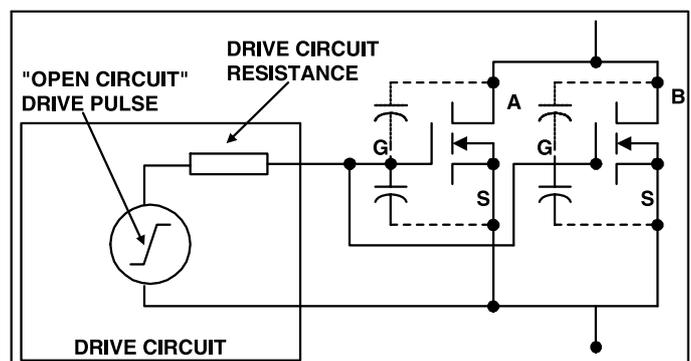
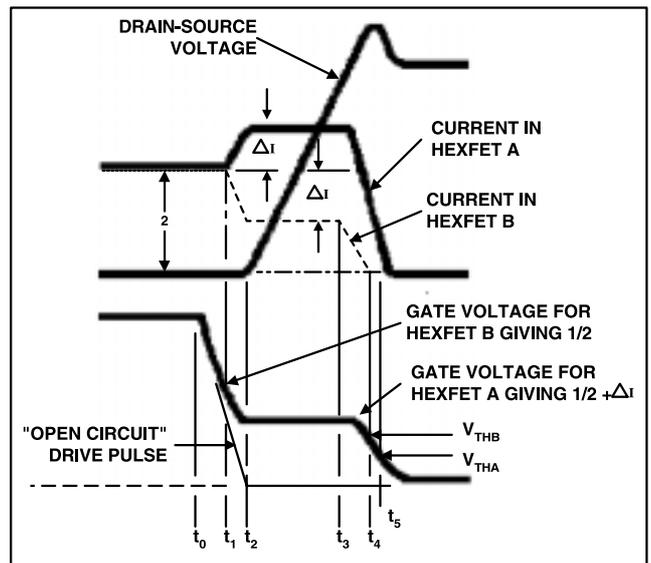


Рис. 16. Форма сигналов при выключении для двух МОП ПТ с общими затворами и истоками

фиксацией его на этом уровне. Как только моментальный ток двигателя пытается превысить максимальный опорный ток больше, чем на предварительно установленный пиковый ток пульсации, МОП ПТ немедленно выключается. Таким образом, система полностью защищает себя от перегрузки по току. Из функциональной диаграммы на рис. 18 видно, что опорное значение напряжения сравнивается с напряжением на двигателе, а сигнал ошибки усиливается усилителем ошибки по напряжению. Выходом этого усилителя является сигнал опорного тока. Сигнал ошибки по напряжению также подается в логический компаратор двигатель - регенерация. Когда ошибка напряжения положительна, опорный ток также положителен и схема управления требует «рабочий» ток. Выход логического компаратора двигатель - регенерация находится в высоком логическом состоянии, сигнал работы имеет значение логической «1», в то время как сигнал регенерации имеет логическое значение «0». Ключи А и D замкнуты, в то время как ключи В и С разомкнуты. Когда опорный ток отрицателен, схема управления требует ток «регенерации». Логический выход компаратора на вывод регенерации двигателя отрицателя. Сигнал регенерации имеет значение логического «0». Ключи В и С замкнуты, а А и D разомкнуты, компаратор на выводе двигатель - регенерация имеет встроенный гистерезис для предотвращения нежелательного «перескакивания» между режимами «регенерации» и «работы» при низких уровнях тока. Рассмотрим «рабочий» режим работы. Положительный сигнал опорного тока сравнивается с действительным током двигателя, разница усиливается усилителем ошибки тока. Выход этого усилителя подается через ключ А, который замкнут, на компаратор двигателя. Этот компаратор вырабатывает выходной сигнал «0», как отклик на положительный входной сигнал, превышающий заранее установленный пороговый уровень, и выходной сигнал «1», как отклик на отрицательный входной сигнал, ниже заранее установленного уровня.

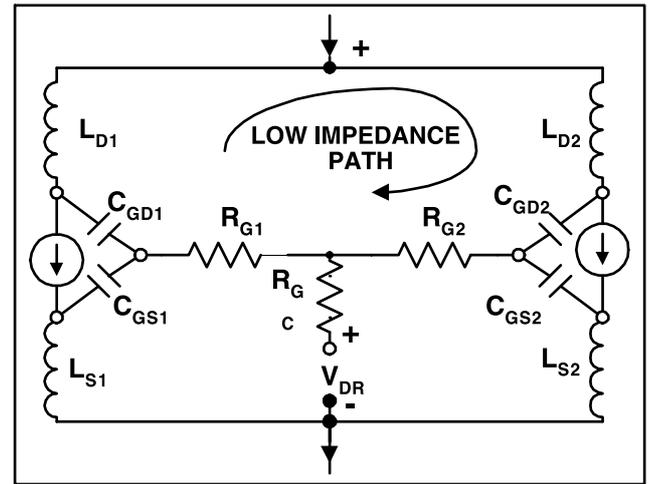


Рис. 17. Паразитные колебания с узкоимпедансной связью для случаев ее разбалансированных контуров

Выходной сигнал компаратора двигателя изолирован и сформирован так, чтобы быть сигналом для управления затвором «рабочего» МОП ПТ. «Рабочий» МОП ПТ включается, когда ток падает на заранее определенную величину ниже опорного значения и выключается, когда ток двигателя поднимается выше предопределенного значения над опорным значением, в

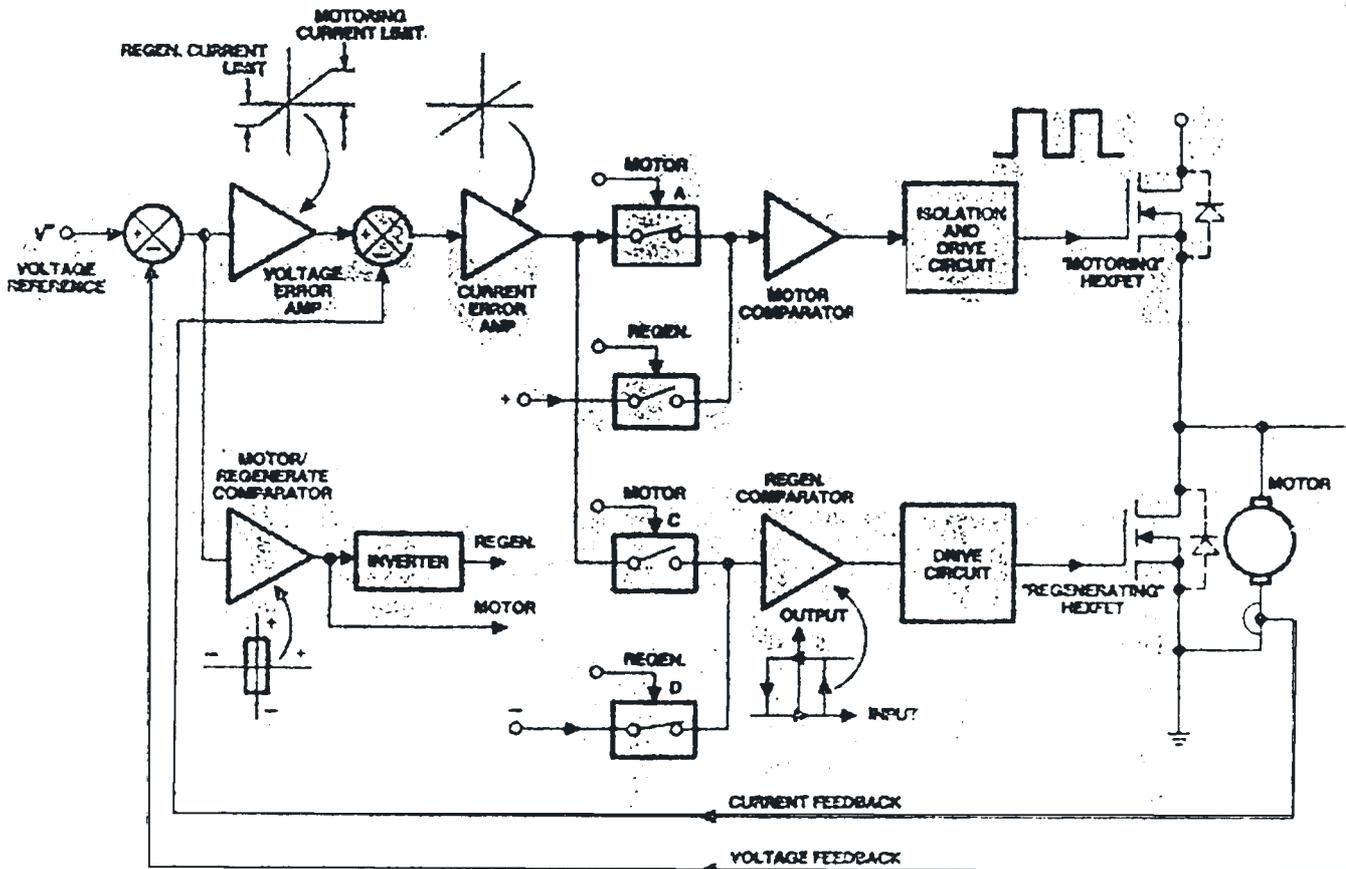


Рис. 18. Упрощенная схема управления

то время как частота переключения автоматически подстраивается сама, чтобы поддерживать ток пульсаций от пика к пику постоянным. Ток пульсации от пика к пику и рабочая частота могут регулироваться путем подстройки гистерезиса компаратора двигателя. Отметим, что в рабочем режиме работы ключ D замкнут, подавая постоянное отрицательное входное значение на компаратор регенерации и запирая сигнал управления затвором МОП ПТ «регенерации». Теоретические формы сигналов, иллюстрирующие работу этой схемы в рабочем режиме, показаны на рис.19. В режиме работы регенерации ключи В и С замкнуты, непрерывный положительный сигнал подается на вход компаратора двигателя, запирая сигнал запуска «рабочего» МОП ПТ. Опорный ток отрицателен, и сигнал ошибки тока подается на вход компаратора регенерации. Этот компаратор выдает выходной сигнал «1» как отклик на положительный входной сигнал, выше определенного заранее установленного уровня, и выходной сигнал «0», как отклик на отрицательный входной сигнал ниже заданного предварительно установленного уровня. «Регенерирующий» МОП ПТ теперь включается всякий раз, когда ток регенерации от двигателя падает на заданную величину ниже опорного значения, и выключается всякий раз, когда ток двигателя поднимается на предварительно заданное значение выше опорного значения. Теоретические формы сигналов, иллюстрирующие режим работы регенерации, показаны на рис.20.

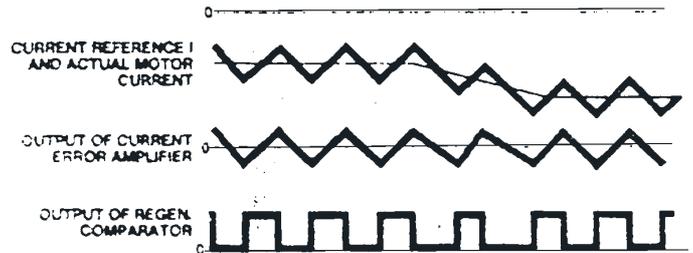


Рис. 19. Теоретическая форма сигналов при вращении двигателя

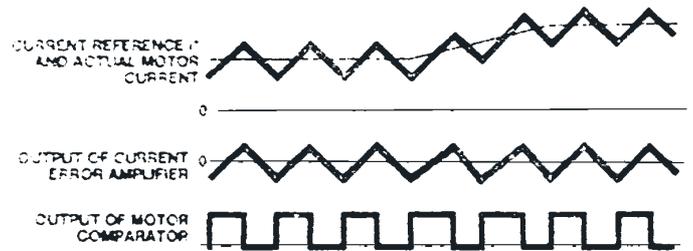


Рис. 20. Теоретическая форма сигналов при регенерации тока в двигателе

### Схема управления и запуска

Рис.22 показывает схему управления и запуска. Она основана на функциональной схеме, показанной на рис. 18, и не требует дополнительных пояснений кроме указания, что в практических целях некоторые полярности сигналов противоположны тем, что даны в упрощенной схеме на рис. 18.

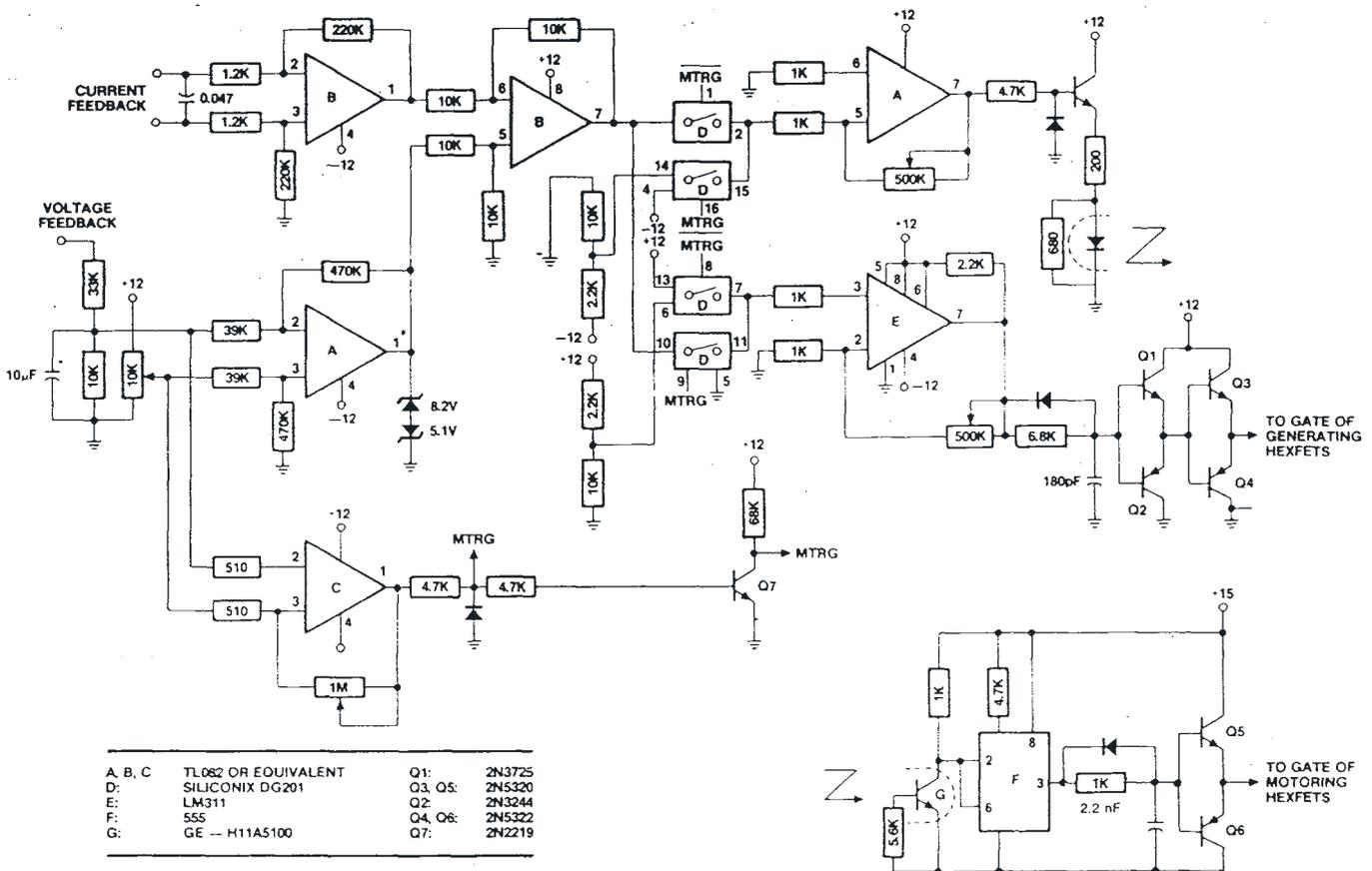
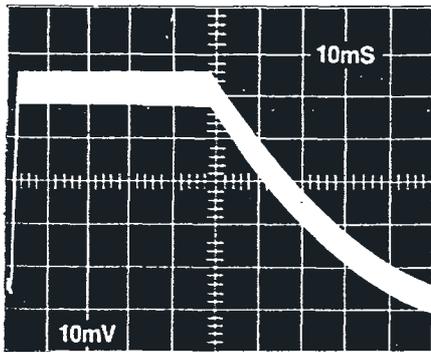
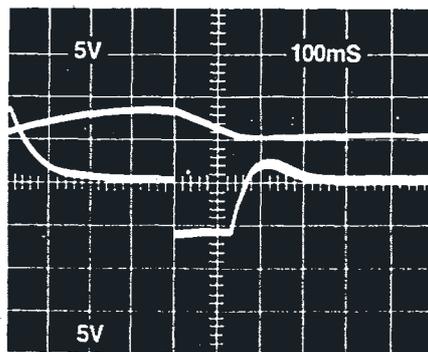


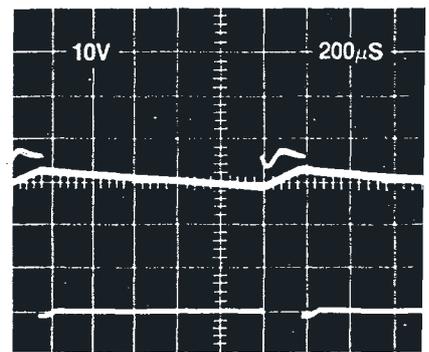
Рис.22. Блок-схема контроля и управления с обратной связью



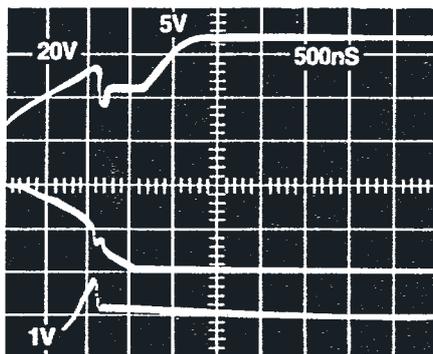
**Рис.23. Форма сигнала тока при пуске двигателя.**  
 Пиковый ток двигателя =220 А;  
 40 А/дел; 10 нсек/дел



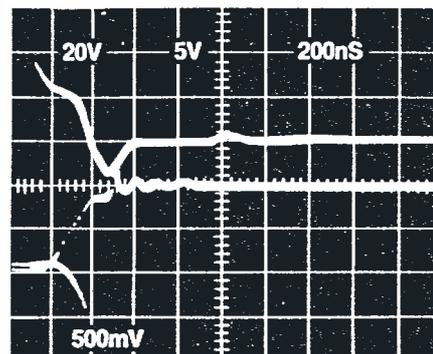
**Рис.24. Форма сигналов тока и напряжения при ускорении и замедлении вращения двигателя**  
 Пиковый ток =225 А;  
 пиковый ток при регенерации =140 А



**Рис.25. Форма сигнала напряжения и тока преобразователя при работе на пассивную индуктивную нагрузку-220 мсек/дел, нижняя кривая-10 В/дел**



**Рис.26. Форма сигналов при включении МОП ПТ.**  
 Полный выходной ток=120А,  
 верхняя кривая -напряжение затвор-исток 5В/дел,  
 средняя кривая - напряжение сток-исток 20 В/дел,  
 нижняя кривая-ток стока 10 А



**Рис.27. Форма сигналов при выключении МОП ПТ.**  
 Полный выходной ток=120А,  
 верхняя кривая-напряжение затвор-исток 5В/дел,  
 средняя кривая-напряжение сток-исток 5 В/дел,  
 нижняя кривая-ток стока 5 А

Практические результаты испытаний показаны на рис. с 23 по 27. Рис.23 показывает ток, когда двигатель ускоряется из состояния покоя до примерно половины скорости. Схема ограничения тока поддерживает пиковый ток двигателя чуть выше 200А. Частота преобразования примерно 2 кГц. Рис.24 показывает формы сигналов тока и напряжения двигателя, когда он ускоряется от половины значения скорости до почти полной скорости, а затем замедляется до половины значения скорости. Предел тока поддерживает пиковый рабочий ток около 205А, а пиковый ток регенерации около 140А. Рис.25 показывает выходные напряжение и ток преобразователя с пассивной индуктивной нагрузкой. Отметьте классический линейный подъем и спад тока, связанный с индуктивной нагрузкой. Рис.26 и 27 показывают, соответственно, осциллограммы включения и выключения для одного МОП ПТ при работе преобразователя с пассивной индуктивной нагрузкой на 120А. Эти формы сигналов в основном согласуются с ранее представленными теоретическими рассуждениями Однако отметьте на рис.27, что напряжение затвора становится обратным при выключении; это происходит из-за резонанса между емкостью затвора и индуктивностью схемы.

### **Выводы**

Эта статья продемонстрировала техническую возможность создания преобразователя постоянного напряжения в постоянное, использующего параллельно соединенные МОП ПТ, для управления скоростью двигателя, работающего на уровне тока 200А и использующего диод МОП ПТ для обеспечения инерции и функции обратной связи, необходимых для двухквadrантных схем. Потенциальной привлекательностью использования МОП ПТ является простота схемы управления, быстродействие, надежность, простота запараллеливания транзисторов и общая компактность. Мощные МОП ПТ обеспечивают преимущество в этом типе применения. Благодаря обеспечению работы на высокой частоте, отдельно возбуждаемой обмотки подмагничивания с дополнительным управлением двигателя и высокими рабочими параметрами системы, они становятся практически реальными для управления двигателями. Преобразователи сегодняшнего дня, использующие биполярные транзисторы и тиристоры, обычно работают на относительно низкой частоте (чтобы они оставались простыми) и требуют последовательно подключенной обмотки возбуждения, чтобы поддерживать ток пульсации двигателя на приемлемом уровне. При более высокой частоте преобразования, что делается возможным благодаря применению МОП ПТ, индуктивность ротора двигателя сама по себе достаточна для сглаживания тока, таким образом позволяет не связывать обмотку возбуждения со схемой ротора, и будучи отдельно управляемой, она дает системе лучшие рабочие характеристики и хорошую гибкость в управлении. Здесь имеют место улучшение конструкции схемы и МОП ПТ технологии, а также и стоимость приборов; тип системы, описанный в этой статье, будет экономически, а также технически превосходить сегодняшние системы преобразователей, использующие биполярные транзисторы и тиристоры.