

# Использование силовых транзисторов

## в линейном режиме

При работе в линейном режиме силовой транзистор скорее можно назвать частично открытым, чем полностью закрытым или открытым. Линейный режим дает возможность управлять или ограничивать ток через силовой транзистор. Если же функции силового каскада, работающего в линейном режиме, будут дополнены еще и возможностью полного включения транзистора, то силовой каскад станет чрезвычайно полезным в таких устройствах, как электронные нагрузки, автоматические выключатели, твердотельные реле, ограничители пусковых токов и даже ограничители переходных напряжений. Благодаря универсальности силового транзистора все перечисленные функции могут быть реализованы внутри одного блока, например «интеллектуального» твердотельного реле, которое защищает не только нагрузку, но и само устройство.

Додж Джонатан

Перевод:  
Михаил Некрасов

mik@icquest.ru

Теоретически, добиться работы в линейном режиме очень просто. Для этого достаточно подать на затвор напряжение определенной величины и следить за соблюдением требований документации в области безопасной работы в прямом смещении (ОБР-П). В действительности же задача реализации силовой схемы, работающей в линейном режиме, — одна из самых непредсказуемых: многие простые решения проявляют себя так, что могут стать кошмарным сном разработчика. В данной статье будут показаны «подводные камни» линейного режима и даны рекомендации и примеры реализации высоконадежных схем, работающих в таком режиме. В описаниях в основном будет идти речь о силовых МОП-транзисторах, хотя все сказанное в равной мере может быть отнесено и к IGBT-транзисторам.

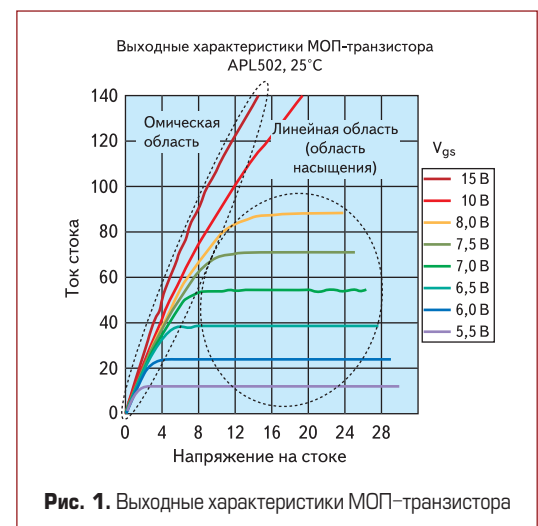
### Проблемы линейного режима

Реализация силовой схемы, работающей в линейном режиме, связана с тремя фундаментальными проблемами:

1. Информация, приведенная в документации производителя, часто является неадекватной или даже некорректной по отношению к линейному режиму работы.
2. Тепловая неустойчивость ограничивает возможности силового транзистора, работающего в линейном режиме, по управлению нагрузкой относительно значений, которые следуют из паспортных данных максимальной рассеиваемой мощности или температуры перехода кристалла.
3. Пороговые напряжения и крутизна транзисторов с изолированным затвором (МОП и IGBT) могут существенно отличаться даже у однотипных транзисторов.

### Тепловая неустойчивость и коэффициент передачи

Для управления током стока достаточно регулировать напряжение затвор-исток. Тем не менее, под влиянием некоторых различий температуры вдоль кристалла в нем возникает температурно-индуцированное изменение тока. Если температурно-зависимое изменение плотности тока окажется температурно-нестабильным (что нормально для линейного режима работы), то результатом может быть локальный разогрев и колебания тока в кристалле. Следствием разогрева может быть выход из строя, идентичный вторичному пробую биполярных транзисторов. Исходя из этого, границы действительной ОБР-П могут быть существенно меньшими, чем те, что получены только на основании тепловых сопротивлений,



часто публикуемых в документации. Исключение возможности отказа является самой большой проблемой при создании силовой схемы, работающей в линейном режиме. Таким образом, есть смысл в том, чтобы разобраться, что же вызывает выход транзистора из строя.

Работа в линейном режиме возможна в области «насыщения» передаточной характеристики (смежная с омической область), как показано на рис. 1.

При работе в этой области ток стока зависит от напряжения затвор-исток  $V_{GS}$  и от порогового напряжения  $V_{TH}$ :

$$i_D = k (V_{GS} - V_{TH})^2, \quad (1)$$

где  $k = (\mu_e C_{OZ} W) / 2L$ ,  $\mu_e$  — подвижность электронов,  $C_{OZ}$  — емкость оксидного слоя затвора,  $W$  — ширина канала,  $L$  — длина канала.

Коэффициент передачи и значение  $k$  тем выше, чем больше ширина канала  $W$  и чем меньше его длина  $L$ . Поскольку значение  $\mu_e$  снижается по мере роста температуры, то рост температуры также вызовет снижение  $k$ . (Емкость не зависит от температуры, но зато зависит от напряжения сток-исток). Значение  $V_{TH}$  тоже снижается с ростом температуры. Поскольку работа прибора в линейном режиме связана с его разогревом, то снижение подвижности электронов приведет к снижению тока стока, таким образом, поддерживая тепловую устойчивость. В противоположность этому, снижение порогового напряжения приводит к возрастанию тока стока. Таким образом, отрицательный температурный коэффициент порогового напряжения является фактором тепловой неустойчивости. Данные соотношения можно выразить математически. Для этого нужно продифференцировать (1) по температуре и выполнить подстановку в зависимость рассеиваемой мощности от температуры. В итоге получаем коэффициент устойчивости  $S$ :

$$S = R_{\theta} \times V_{DS} \left[ -2\sqrt{k \times i_D} \frac{\partial V_{TH}}{\partial T} + \frac{\partial k}{\partial T} \times \frac{i_D}{k} \right]. \quad (2)$$

Чем выше значение  $S$ , тем большей тепловой неустойчивостью будет обладать транзистор. Это означает, что локальное возрастание температуры оказывает регенеративное влияние. Если же  $S$  имеет отрицательное значение, прибор будет температурно-устойчивым в линейном режиме. Обратите внимание, что значения  $dV_{TH}/dT$  и  $dk/dT$  всегда отрицательны.

Пользуясь выражением (2), можно сформулировать факторы улучшения тепловой устойчивости (когда  $S$  имеет меньшие значения):

1. Снижение теплового сопротивления.
2. Снижение напряжения сток-исток.
3. Увеличение тока стока.
4. Снижение коэффициента передачи (а следовательно и  $k$ ).
5. Снижение абсолютного значения температурного коэффициента порогового напряжения  $dV_{TH}/dT$ .

Факторы 4 и 5 полностью зависят от конструкции транзистора. Таким образом, при его проектировании могут быть предприняты меры по улучшению тепловой устойчивости и,

как следствие, расширению области безопасной работы в линейном режиме. Таким мерам были подвергнуты серии линейных МОП-транзисторов и большинство РЧ МОП-транзисторов серий ARF компании Microsemi (ранее Advanced Power Technology).

На рис. 2 показаны передаточные характеристики МОП-транзистора для трех температур. На нем наглядно демонстрируется фактор тепловой устойчивости, описанный выражением (2). Существует одна точка, в которой

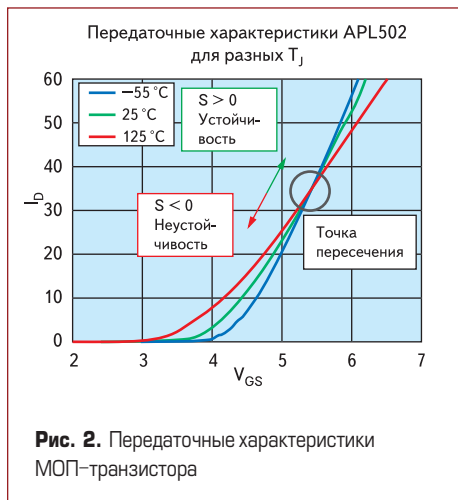


Рис. 2. Передаточные характеристики МОП-транзистора

пересекаются все кривые. Ниже этой точки преобладает влияние порогового напряжения, и поэтому локальные изменения тока вызывают температурную неустойчивость. Выше этой точки преобладает влияние изменения коэффициента передачи, и транзистор будет температурно-устойчивым.

### Механизм отказа

Поскольку пересечение передаточных характеристик происходит в точке с относительно большим током, работа в линейном режиме ниже этой точки практически всегда сопровождается тепловой неустойчивостью. Проблема состоит в том, что в более разогретых областях кристалла выше плотность тока, что еще больше усиливает нагрев.

У любого МОП- или IGBT-транзистора есть внутренний биполярный транзистор. Его коэффициент передачи возрастает при увеличении температуры прибора, а также при увеличении напряжения сток-исток. Сопротивление базы биполярного транзистора возрастает с нарастанием температуры, и снижается напряжение база-эмиттер. Учитывая данные факторы совместно, можно сделать вывод, что с ростом температуры повышается вероятность генерации напряжения на сопротивлении базы, достаточного для включения биполярного транзистора.

Таким образом, при определенном уровне нагретости кристалла может произойти отпирание расположенного в разогретой области биполярного транзистора. Вследствие этого работа в линейном режиме становится аварийной: разогрев становится необратимым, температура стремительно возрастает вплоть до перегорания аварийного участка, вызывающего закорачивание стока с истоком, а иногда и затвора с истоком. Некоторые повреж-

денные приборы еще могут работать в открытом состоянии, но после запираания они смогут работать только с напряжением, которое характеризуется большим током утечки, протекающим через поврежденную область.

### Рекомендации по реализации линейного режима

Первым этапом проектирования надежной силовой схемы, работающей в линейном режиме, является налаживание контакта с инженером по применению компании-производителя транзистора. Этот специалист может дать бесценную информацию и советы, которых нет в документации.

Второй этап — это нахождение действительной ОБР-П для выбранных приборов. К сожалению, этот этап работы нельзя выполнить с помощью инструментов моделирования, так как модели полупроводниковых приборов не позволяют определить, когда же происходит его повреждение. Для нахождения рабочей ОБР-П потребуются тестирования на отказ нескольких приборов. Здесь можно воспользоваться преимуществами первого этапа, потому что эта работа уже скорее всего была выполнена. После того как были собраны данные, при каких напряжениях и токах возникали отказы, могут быть построены кривые или составлена математическая модель. Добавив небольшой запас надежности, получим действительную ОБР-П.

В таблице 1 представлена информация по рассеиваемой мощности IGBT-транзистором APT200GN60J в линейном режиме, когда при фиксированном напряжении коллектор-эмиттер ток в линейном режиме возрастал вплоть до отказа транзистора. В результате в таблицу были внесены данные для нескольких напряжений коллектор-эмиттер.

Транзисторы были смонтированы на теплоотводе с водяным охлаждением. Измеренная температура корпуса  $T_C$  во время отказа составляла около 75 °С. С помощью аппроксимирующей кривой можно оценить среднюю температуру перехода, при которой возникает отказ, — это примерно 175 °С. Данная температура равна паспортной максимальной температуре перехода. Важно обратить внимание, что в линейном режиме отказ может произойти при средней температуре перехода, меньшей паспортного максимального значения.

На рис. 3 проиллюстрированы данные из таблицы 1, а также теоретические кривые

Таблица 1. Данные по отказам транзистора APT200GN60J при работе в линейном режиме

VCE, В	IC, А	P, Вт
500	0,227	114
450	0,25	113
400	0,338	135
350	0,413	145
300	0,473	142
250	0,565	141
200	0,68	136
150	1	150
100	1,84	184

ОБР-П, построенные из условий постоянства рассеиваемой мощности при температурах  $T_j = 175^\circ\text{C}$  и  $T_c = 75^\circ\text{C}$  и  $25^\circ\text{C}$ . Обратите внимание, насколько меньше действительная область ОБР-П, чем те, что получены расчетным путем на основании постоянства рассеиваемой мощности и ограниченные только тепловым сопротивлением (представлены кривыми для температур  $T_c = 25^\circ\text{C}$  и  $75^\circ\text{C}$ ). В большинстве документов публикуются кривые ОБР-П для температуры корпуса  $25^\circ\text{C}$ . Если полагаться на эти данные, то окажется, что при больших напряжениях ток может быть в 6 раз

больше, чем на самом деле способен пропустить транзистор!

Но даже если ориентироваться на более низкий ток, соответствующий температуре корпуса  $75^\circ\text{C}$ , он все равно окажется намного выше тока, при котором наступает отказ прибора вследствие локального разогрева. Решить эту проблему можно только одним способом: проверить несколько транзисторов, для того чтобы найти условия, вызывающие их повреждение.

На рис. 3 показана аппроксимирующая кривая, построенная по результатам тестирования

на отказ при протекании постоянного тока (статическая ОБР-П). Затем, пользуясь данными по переходным тепловым сопротивлениям, были построены ОБР-П при импульсном протекании тока (импульсные ОБР-П). Результат показан на рис. 4. Полученные кривые являются рабочими ОБР-П транзистора APT200GN60J. Использование температуры перехода  $125^\circ\text{C}$  (ниже температуры, при которой происходит повреждение транзистора) позволяет создать некоторый запас надежности. Обратите внимание, если сопоставить кривую статической ОБР-П с кривой испытания на отказ на рис. 3, то первая кривая окажется ниже. Именно так нужно поступать при использовании транзистора в линейном режиме, принимая запас минимум в  $20^\circ\text{C}$  относительно средней температуры перехода, при которой наступает отказ. На рис. 4 за максимальную рекомендованную температуру перехода принято значение  $125^\circ\text{C}$ , таким образом, запас надежности составляет  $50^\circ\text{C}$  относительно предельной температуры.

Далее рассмотрим ОБР-П МОП-транзистора APL502J, который был специально создан для работы в линейном режиме.

Рабочие ОБР-П транзистора APL502J представлены на рис. 5. По сравнению с APT200GN60J (рис. 4) APL502J имеет более широкую область ОБР-П. Границы ОБР-П находятся в противоречии с потерями проводимости. При полном включении и токе нагрузки  $200\text{ A}$  типичное значение напряжения коллектор-эмиттер APT200GN60J составляет всего лишь  $1,7\text{ V}$  в разогретом состоянии ( $1,5\text{ V}$  при комнатной температуре). Более надежный транзистор APL502J при токе  $26\text{ A}$  и температуре  $125^\circ\text{C}$  характеризуется примерно в 6 раз большими потерями по сравнению с APT200GN60J.

Обратите внимание, что кривые ОБР-П на рис. 4 и 5 загибаются в области повышенных напряжений (обе оси имеют логарифмический масштаб). Кривые ОБР-П, построенные на основании постоянства рассеиваемой мощности, являются прямолинейными. Если в документации вы увидите прямолинейную ОБР-П для статического режима работы, будьте бдительны! Этот график, скорее всего, неадекватен линейному режиму.

### Примеры применения транзисторов в линейном режиме

#### Твердотельное реле для коммутации постоянного тока

APT200GN60J прекрасно работает в составе твердотельных реле (ТТР), где обеспечивает ограничение тока заряда больших конденсаторных батарей за счет работы в линейном режиме, а затем переходит в полностью открытое состояние для минимизации потерь проводимости. Чтобы вписаться в пределы ОБР-П IGBT-транзистора, необходимо существенно ограничить ток заряда емкости. Если к времени заряда нет строгих требований, то решение этой задачи не будет проблемой.

#### Требования

Рассмотрим ситуацию, когда необходимо зарядить конденсаторную батарею  $1500\text{ мкФ}$  с напряжения  $0\text{ V}$  до  $400\text{ V}$ . Сколько будет длиться заряд емкости, значения не имеет. Для

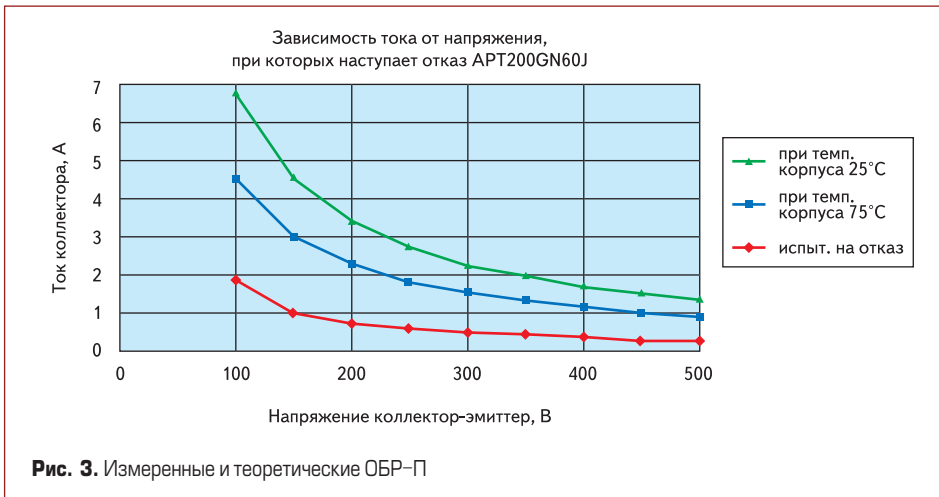


Рис. 3. Измеренные и теоретические ОБР-П

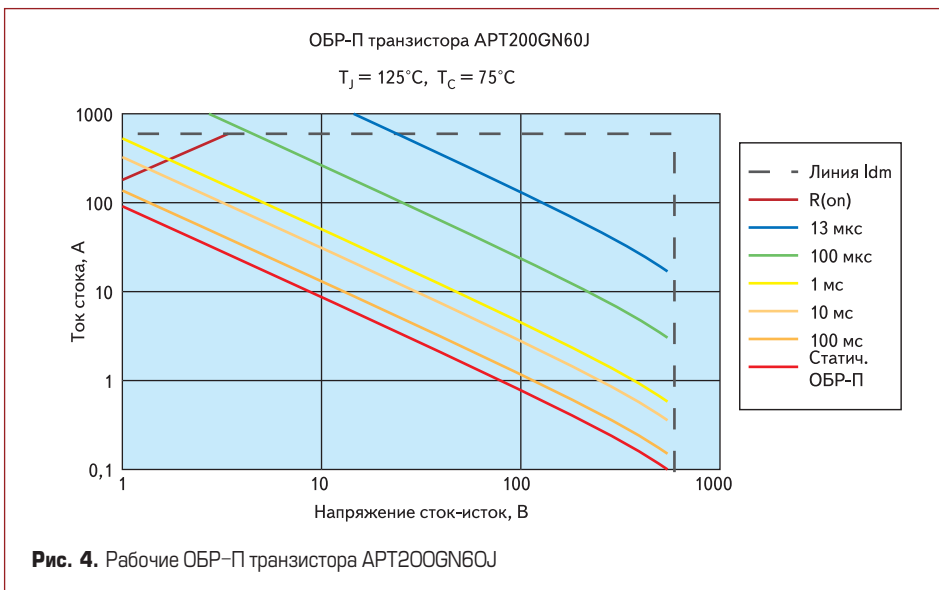


Рис. 4. Рабочие ОБР-П транзистора APT200GN60J

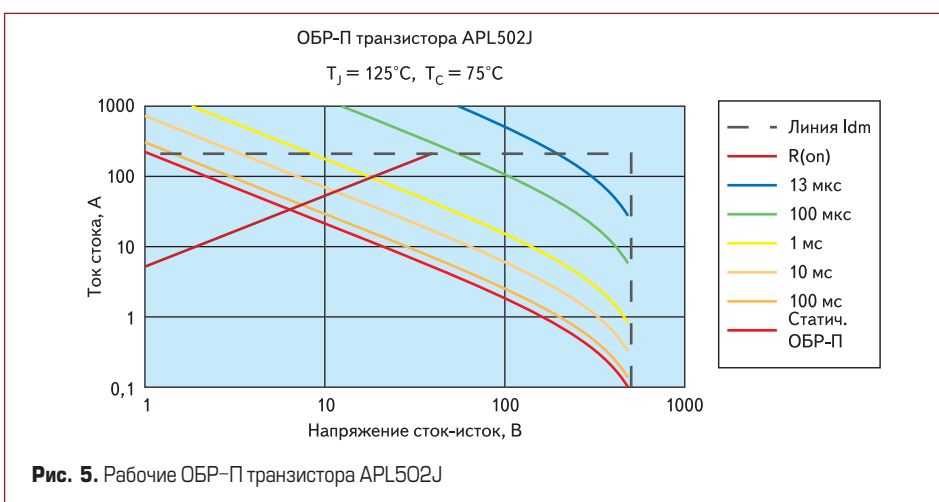


Рис. 5. Рабочие ОБР-П транзистора APL502J

поддержания температуры корпуса ТТР на уровне 75 °С или менее может понадобиться теплоотвод.

**Решение**

В соответствии с графиком ОБР-П (рис. 4) ток больше всего ограничивается при максимальном прикладываемом напряжении, которое в данном случае составляет 400 В. Из данных, которые использовались для создания рис. 4, следует, что безопасный ток заряда конденсаторов при напряжении 400 В составляет 0,16 А (примерно вдвое меньше, чем ток в точке повреждения транзистора по данным из таблицы 1, таким образом, есть хороший запас надежности). При токе заряда 0,16 А заряд конденсаторной батареи с напряжения 0 В до 400 В произойдет за 3,75 с. Ускорить заряд, конечно же, можно, если, следуя по кривой ОБР-П, увеличивать ток заряда по мере нарастания напряжения на конденсаторе (то есть когда снижается напряжение коллектор-эмиттер). Тем не менее, поскольку нет требований по времени заряда, вариант заряда постоянным током ввиду простоты схемного решения более приемлем.

Обеспечение работы транзистора в пределах ОБР-П для статического режима — решение только половины проблемы. Необходимо оценить пиковое значение рассеиваемой мощности и результирующее пиковое значение температуры перехода. Поскольку ток заряда непрерывно поддерживается на постоянном уровне, то напряжение коллектор-эмиттер будет линейно снижаться с 400 В до практиче-

ски 0 В, так как напряжение на конденсаторной батарее возрастает. Следовательно, рассеиваемая мощность достигает пикового значения на уровне 64 Вт (0,16 А, 400 В) сразу после подачи напряжения, а затем будет линейно снижаться. Изменение рассеиваемой мощности во времени имеет треугольную форму.

На рис. 6 показан результат моделирования теплового переходного процесса, для чего использовалась RC-схема моделирования переходного теплового сопротивления транзистора APT200GN60J, на вход которой подавался линейно снижающийся импульс рассеиваемой мощности с пиковым значением 64 Вт. Пиковое значение падения температуры между переходом и корпусом составляет около 12 °С. Если температура корпуса достигнет 75 °С, то средняя температура перехода должна приблизиться к  $75 + 12 = 85$  °С, что существенно меньше предельно-допустимого значения 125 °С.

**Электронная нагрузка**

Линейный МОП-транзистор APL502J хорошо работает в схемах, требующих более широкую ОБР-П, как, например, схема электронной нагрузки. В данном применении для удовлетворения требований по рассеиваемой мощности, а также по максимальному падению напряжения в открытом состоянии может понадобиться параллельное включение транзисторов.

**Требования**

В рассматриваемом примере наша самодельная нагрузка должна иметь рабочие диапазо-

ны до 400 Вт, 400 В, 20 А и перепад напряжения при полном открытии с током 20 А не более 1 В. С помощью теплоотвода можно добиться поддержания температуры корпуса на уровне не более 75 °С.

**Решение**

Чтобы добиться температуры перехода менее 125 °С, воспользуемся кривыми ОБР-П, они представлены на рис. 5. Сначала проверим, выполняется ли требование к полностью открытому состоянию. При комнатной температуре (и токе 26 А) максимальное значение  $R_{DS(on)}$  транзистора APL502J составляет 0,090 Ом. При температуре 125 °С значение  $R_{DS(on)}$  удваивается и составляет 0,180 Ом у каждого транзистора. Общее максимально-допустимое сопротивление равно  $1 В/20 А = 0,050$  Ом. Теперь находим, какое минимальное число транзисторов позволит выполнить требование по падению напряжения в открытом состоянии:  $0,180 Ом/0,050 Ом = 3,6$ . Следовательно, необходимо минимум 4 транзистора. Обратите внимание, что при использовании токоизмерительных резисторов (об этом пойдет речь далее) падение напряжения на них также нужно учитывать при определении числа транзисторов.

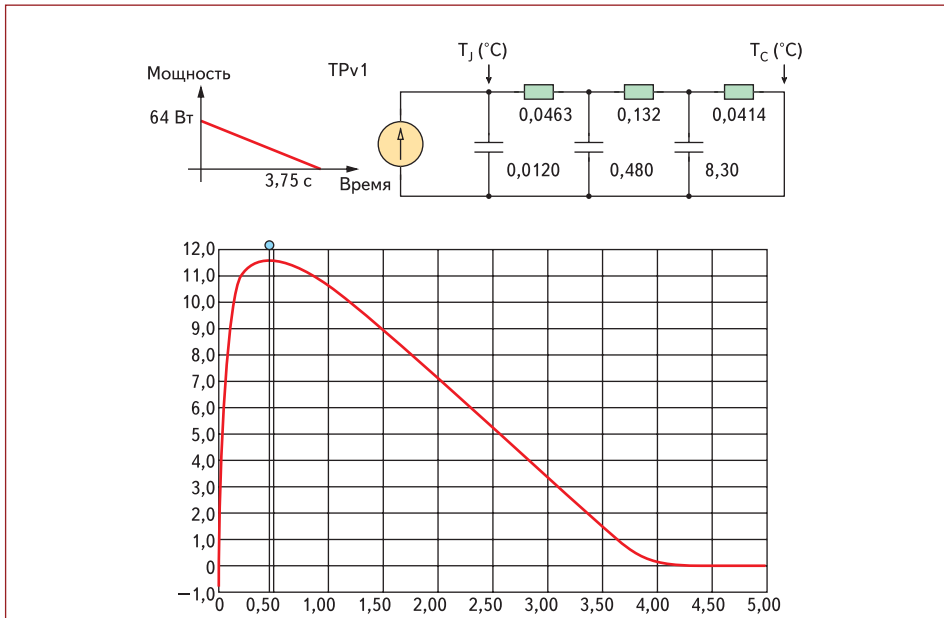


Рис. 6. Моделирование теплового переходного процесса

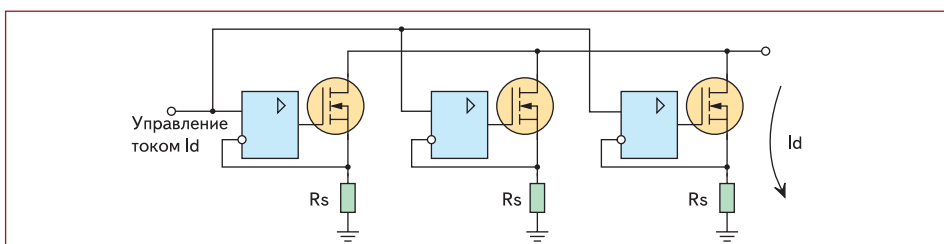


Рис. 7. Осуществление линейного режима при параллельном включении транзисторов



Рис. 8. Транзистор, токоизмерительный резистор и датчик температуры в одном корпусе SP1

Рассматривая ограничения ОБР-П, определим минимальное значение мощности, которую можно рассеивать при наибольшем приложенном напряжении. В данном случае это 400 В. В случае применения APL502J с температурами корпуса и перехода, 75 °С и 125 °С соответственно, при напряжении 400 В максимальный ток равен 0,2 А, а рассеиваемая мощность 80 Вт. Минимальное число транзисторов, которое необходимо для управления всей нагрузкой мощностью 400 Вт, составляет  $400 Вт/80 Вт = 5$  шт. Таким образом, все поставленные требования выполняются при параллельном включении минимум 5 транзисторов APL502J.

Может возникнуть мысль о параллельном включении транзисторов с добавлением к затвору каждого транзистора отдельного резистора (для предотвращения генерации) и контролем тока в одной точке. Но, к сожалению, реализация такой идеи, несомненно, привела бы к выходу из строя транзисторов.

Наконец, нам осталось решить последнюю проблему при создании силовой схемы, работающей в линейном режиме. Она связана с разбросом пороговых напряжений у одно-

типных транзисторов. В линейном режиме транзисторы нельзя напрямую соединять параллельно; каждый транзистор должен пропускать через себя отведенную ему долю общего тока. Добиться этого можно с помощью различных способов.

При условии, что это позволяет требование по максимальному падению напряжения в открытом состоянии, последовательно с каждым МОП-транзистором может быть включено достаточно большое сопротивление, на которое будет возложена существенная часть тепловой нагрузки (резисторы будут нагреваться). С помощью резисторов можно также добиться уравнивания токов через МОП-транзисторы. Для этого между истоком каждого МОП-транзистора и возвратной линией цепи управления затвором должен быть предусмотрен отдельный резистор. Такое включение создает отрицательную обратную связь возле каждого затвора. Добиться идеального уравнивания токов невозможно.

Сортировка транзисторов по пороговому напряжению также не даст результата, так как даже незначительное различие МОП-транзисторов по пороговому напряжению приведет к существенному разбросу тока.

Поскольку рассматриваемая схема должна обладать малым падением напряжения в открытом состоянии, то эффективным в стоимостном плане может оказаться решение с отдельной стабилизацией тока у каждого МОП-транзистора с помощью усилительной схемы (управляет напряжением затвор-исток) и датчика тока. Данную идею иллюстрирует упрощенная схема на трех параллельно работающих МОП-транзисторах (рис. 7). Чтобы выполнить требование по малому общему падению напряжения, в схеме нужно использовать низкоомные резисторы или датчики Холла.

Для упрощения сборки и минимизации размеров и стоимости готового решения компания Microsemi выпустила серию приборов, предназначенных главным образом для ли-

нейного режима, но они способны работать и в качестве коммутаторов. Данные приборы содержат в компактном корпусе SP1 силовой транзистор (линейный МОП- или Field Stop IGBT-транзистор), токоизмерительный резистор (обладающий малой индуктивностью) и датчик температуры.

Встроенный токоизмерительный резистор установлен на том же керамическом изоляторе, что и силовой транзистор. Тем самым транзистор минимизирует индуктивность и достигает охлаждения резистора, который при максимальной нагрузке рассеивает мощность всего лишь несколько ватт. Такое решение упрощает одновременный контроль напряжения сток-исток, тока стока и температуры корпуса. В результате обработки данной информации в численном виде могут быть получены такие кривые ОБР-П, которые позволят более полно использовать возможности прибора и максимально снизить стоимость системы.