Силовые компоненты ST показывают наилучшие характеристики в жестких условиях

Особенности устройства и применения интеллектуального ключа VNN7NV04

Станислав Косенко, заслуженный рационализатор РФ
Юрий Емельянов, директор по маркетингу «ПетроИнТрейд»
st@petrointrade.ru

В прошлом номере «Вестника электроники» [1] приводилась общая характеристика интеллектуальных силовых ключей (ИСК) нижнего плеча, к семейству которых относится микросхема VNN7NV04 [2]. Благодаря чрезвычайной надежности и универсальности подобные приборы широко применяют не только в автомобильной промышленности, но и в различных устройствах силовой электроники (автоматизированное металлообрабатывающее оборудование, электрифицированная запорная и расходорегулирующая аппаратура и др.). В чрезвычайно жестких условиях эксплуатации данный коммутирующий прибор полностью соответствует двум основным противоречивым требованиям — при незначительных размерах он способен оперировать достаточно большими токами.

Как можно видеть на рис. 1, внешне микросхема VNX7NV04 (индекс X определяется типом корпуса) ничем не отличается от сходных по целевому предназначению 3-выводных полевых транзисторов (MOSFET), оформленных в одном из корпусов, представленных на рисунке, где функциональное назначение выводов прибора обозначено следующим образом: 1 — вход (затвор); 2 — сток; 3 — исток. Для корпуса SO-8 назначение выводов следующее: вход — вывод 4; исток — выводы 1–3; сток — выводы 5–8.

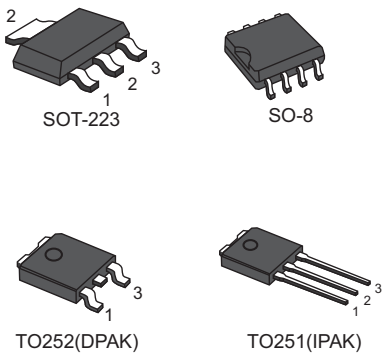


Рис. 1. Возможное корпусное исполнение микросхем VNN7NV04

Основные электрические параметры VNN7NV04

- Внутреннее ограничение напряжения сток–исток, В:
  – типовое значение — 45;
  – минимальное/максимальное значение — 40/55.
- Входное открывающее напряжение, В — 0,5...2,5.
- Внутреннее ограничение напряжения вход–исток, В:
  – типовое значение — 6,8;
  – минимальное/максимальное значение — 6/8.
- Потребляемый по входу ток, мкА:
  – типовое/максимальное значение — 100/150.
- Потребляемый по стоку ток в отсутствие входного сигнала, мкА:
  – типовое/максимальное значение — 35/70.
- Сопротивление канала сток–исток во включенном состоянии, мОм:
  – типовое/максимальное значение — 60/120.
- Выходная емкость, пФ: 220.
- Время задержки при включении, нс ($R_{ген}$=150 Ом): 100...300.
- Время задержки при выключении, нс ($R_{ген}$=150 Ом): 500...1500.
- Длительность фронта коммутирующего импульса, нс ($R_{ген}$=150 Ом): 470...1500.
- Длительность спада коммутирующего импульса, нс ($R_{ген}$=150 Ом): 350...1000.
- Прямое падение напряжения на встроенном диоде сток–исток, В: 0,8.
- Внутреннее ограничение тока стока, А:
  – типовое значение: 9;
  – минимальное/максимальное значение — 6/12.
- Температура срабатывания тепловой защиты, °С:
  – типовое значение — 175;
  – минимальное/максимальное значение — 150/200.

Функции защиты

В автоматике и силовой электронике управление как полевыми транзисторами, так и ИСК чаще всего осуществляется с помощью микроконтроллера. При этом следует учитывать, что если в качестве силового ключа использовать полевой транзистор, его электрический пробой приводит также к повреждению соединенного с транзистором микроконтроллера. Такая ситуация исключена в случае применения ИСК, внутренняя структура которого показана рис. 2, так как в микросхеме мощный полевой транзистор дополнен элементами диагностики и защиты.

Отметим, что полевой транзистор в составе микросхемы обеспечивает

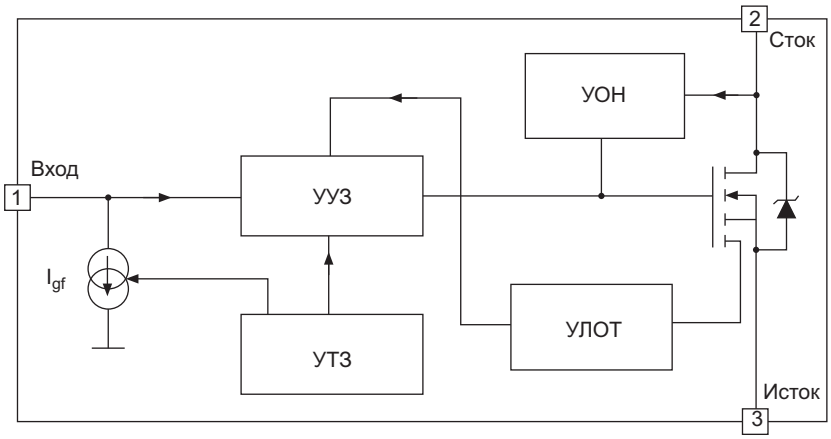


Рис. 2. Типовая структурная схема интеллектуального силового ключа

коммутацию постоянного или импульсного (частотой до 50 кГц) тока в нагрузке с типовым амплитудным значением 9 А. Такое внутреннее ограничение тока наряду с другими защитными цепями, о которых мы расскажем отдельно, обеспечивает практически стопроцентную надежность функционирования ИСК при коммутации нагрузки в автомобиле, каковой чаще всего являются электромагнитные реле, электродвигатели и лампы накаливания. Известно, что при низкой температуре окружающей среды сопротивление нити накаливания может быть, по крайней мере, в десять раз меньше, чем в раскаленном состоянии. Это значит, что если в рабочем режиме суммарный потребляемый ток составляет единицы ампер, то в пусковом режиме он будет измеряться десятками ампер. То же справедливо и по отношению к электродвигателям, в которых пусковой и рабочий ток может различаться в десятки раз.

Чтобы предотвратить повреждение транзистора чрезмерно большими токами, в ИСК применен узел ограничения тока в линейном режиме (на рисунке — УЛОТ). Датчиком тока служит специально сформированный на кристалле транзистора резистивный элемент в его истоковой цепи. Такое техническое решение освобождает микроконтроллер, управляющий транзистором, от мониторинга рабочего режима ключа и недопущения его выхода за предельно допустимые значения. При этом время реакции узла управления затвором (УУЗ), зависящее от временной задержки в схеме узла и скорости нарастания тока, составляет примерно 10 мкс. Далее транзистор переводится в линейный режим с нормированным предельным значением тока в экстремальной ситуации.

Однако в линейном режиме транзистор открывается не до насыщения, а лишь частично, и сопротивление открытого канала сток–исток может существенно превышать исходное значение 60 мОм. В свою очередь возрастание сопротивления канала, сопровождаемое значительным коммутируемым током, может привести к перегреву ИСК, максимально допустимая температура кристалла составляет 175 °С.

С целью исключения отказа прибора в экстремальном тепловом режиме его внутренняя структура дополнена узлом тепловой защиты УТЗ (см. рис. 2), отключающим входной управляющий сигнал от затвора транзистора. Такая коммутация достигается включением аварийного (Fault Gate Current) генератора тока I_{gf}=15 мА, шунтирующего затвор транзистора. Поскольку в рабочем режиме втекающий по выводу INPUT входной ток не превышает 150 мкА, шунтирование входа микросхемы, сопровождающееся существенным снижением управляющего напряжения, может быть отслежено микроконтроллером. Реакция тепловой защиты позволяет программно-аппаратными средствами диагностировать исправное состояние ИСК, а при необходимости сигнализировать о возникновении перегрева.

Тепловая защита настолько быстродействующая, что способна отследить резкое возрастание температуры полупроводникового кристалла в микросхеме также при коротком замыкании в нагрузке и своевременно ее отключить, защищая транзистор от повреждения. После срабатывания УТЗ потребуется несколько минут, чтобы температура кристалла снизилась на 15 °С в результате естественного или принудительного охлаждения, после чего работа ИСК автоматически возобновляется.

Микросхема в действии

Рассмотрим особенности функционирования ИСК с индуктивной нагрузкой, активным сопротивлением которой при рассмотрении временной диаграммы процесса коммутации, показанного на рис. 3, можно пренебречь. Сплошная линия соответствует импульсам входного напряжения, управляющего работой ключа. Пунктирная линия отображает процесс намагничивания индуктивного компонента рабочим током под воздействием прямоугольных импульсов напряжения и размагничивания — в паузе между ними. При намагничивании разогревается канал сток–исток транзистора, при размагничивании — встроенный диод, подключенный анодом к истоку полевого транзистора, катодом — к стоку (см. рис. 2).

Понятно, что внутренняя обратная связь в контуре линейного регулиро-

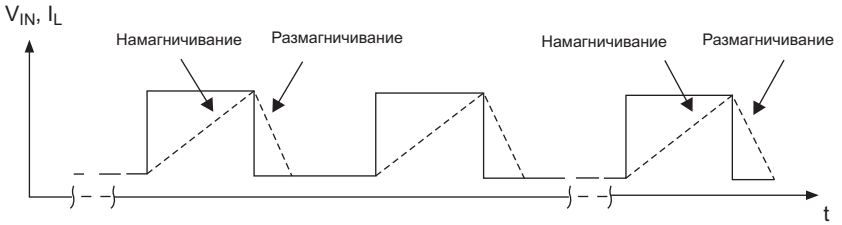


Рис. 3. Процесс намагничивания и размагничивания индуктивного компонента, коммутируемого силовым ключом

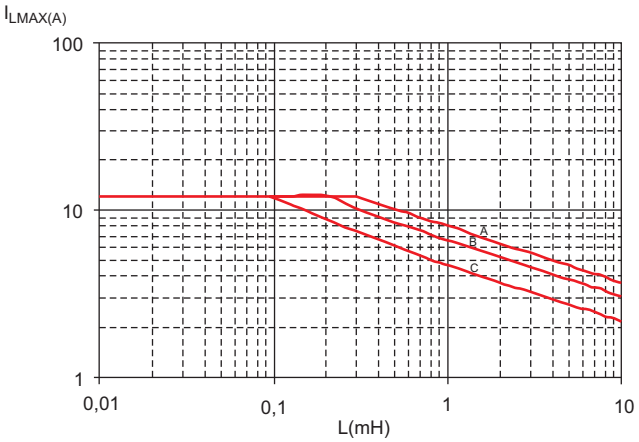


Рис. 4. Расчетные номограммы, определяющие предельное значение коммутируемого тока в зависимости от индуктивности нагрузки

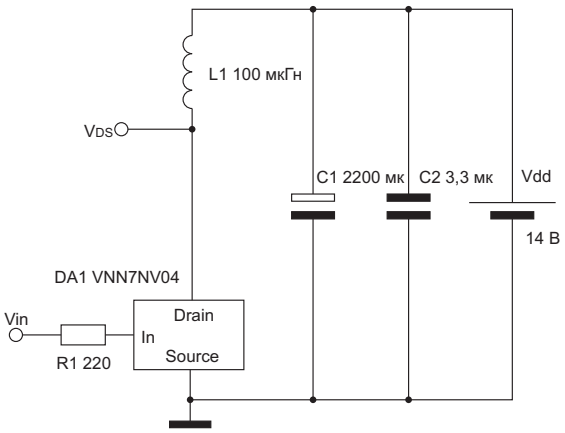


Рис. 5. Схема лабораторной установки для практического измерения параметров ИСК при коммутации индуктивной нагрузки

вания максимального тока будет работать и в данном случае, но при этом скорость нарастания тока в канале транзистора будет зависеть как от индуктивной нагрузки, так и от реакции УЛОТ. Выделяющаяся на транзисторе и обратном диоде тепловая энергия будет рассеиваться на корпусе ИСК и прилежащем участке платы, соединенной печатным монтажом с выводами микросхемы, за счет естественной конвекции окружающего воздуха. Результирующая температура корпуса прибора будет определяться тепловым сопротивлением на участке кристалл–окружающая среда в соответствии с ТУ на микросхему [2] для ИСК. Для корпуса SOT-223 тепловое сопротивление составляет 96 °С/Вт при монтаже на печатную плату, односторонне фольгированную медью толщиной 35 мкм, все стоковые выводы прибора соединены пайкой с контактными площадками 0,5 мм^2 каждая.

Специальные расчетные номограммы, показанные на рис. 4, позволяют определить максимальное значение коммутируемого тока в зависимости от индуктивности нагрузки в трех режимах: А — при коммутации одиночным импульсом (начальная температура кристалла 150 °С); В — при коммутации последовательностью импульсов (начальная температура кристалла 100 °С); С — при коммутации последовательностью импульсов (начальная температура кристалла 125 °С). Например, для произвольного исполнительного механизма с индуктивностью 100 мкГн максимальное значение коммутируемого тока во всех режимах составит 12 А. Но для другого исполнительного механизма индуктивностью 1 мГн составит 8 А в режиме А; 6,5 А — в режиме В; 4,7 А — в режиме С.

Не менее важным аспектом применения ИСК для коммутации индуктивной нагрузки является необходимость нейтрализации индуктивного выброса напряжения. При включенном коммутаторе к моменту его выключения в нагрузке накапливается энергия, пропорциональная индуктивности и квадрату пикового значения тока (см. рис. 3). Поскольку накопленная энергия не может быть мгновенно рассеяна, выключение коммутатора вследствие возникающей в индуктивном элементе ЭДС самоиндукции приводит к смене полярности напряжения, а затем к линейному снижению тока в разрядной цепи. В отсутствие ограничивающих элементов напряжение на стоке коммутирующего транзистора из-за возникающего выброса может превысить предельно допустимое значение и повредить канал сток–исток. В представленной на рис. 2 структурной схеме ИСК узел ограничения напряжения УОН ограничивает выброс напряжения до безопасного уровня 45 В.

Схема лабораторной установки для практического измерения параметров ИСК при коммутации индуктивной нагрузки показана на рис. 5. Если предположить, что активное сопротивление элементов пренебрежимо мало, а переходные коммутационные

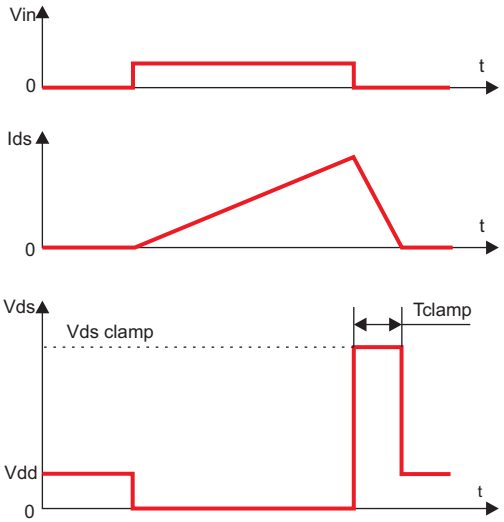


Рис. 6. Идеализированные диаграммы напряжений и токов в коммутаторе индуктивной нагрузки

процессы отсутствуют, идеализированные диаграммы напряжений и токов будут выглядеть так, как это показано на рис. 6. Здесь V_{in} — входной управляющий сигнал; I_{ds} — пилообразный ток в цепи «источник питания – индуктивный элемент – канал сток–исток коммутирующего транзистора»; V_{ds} — импульсное напряжение на стоке транзистора относительно истока (общего провода); $V_{ds\ clamp}$ — напряжение ограничения индуктивного выброса на стоке ИСК; T_{clamp} — время ограничения индуктивного выброса, необходимое для рассеяния энергии намагничивания. Представленные диаграммы наглядно иллюстрируют процессы коммутации в схеме с индуктивной нагрузкой и позволяют отчетливо представить физическую суть описанных выше явлений.

Анализ испытаний

Однако даже незначительное отличие идеализированных и реальных диаграмм способно весьма существенно влиять на реакцию управляемых механизмов, и в конечном итоге схемотехнически верно спроектированное устройство может выполнять свое целевое предназначение с ошибками из-за неверно выбранного ИСК или параметров дискретных элементов в схеме. В качестве примера проанализируем реальные осциллограммы напряжений для макета (рис. 5), показанные на рис. 7а. Приведенные на текстовых полях скриншотов экрана цифрового осциллографа сведения позволяют достаточно точно выполнить анализ исследуемых импульсных сигналов.

Как можно видеть, в канале 1 (вход управляющего сигнала) масштаб по вертикали установлен равным 5 В/дел, в канале 2 (напряжение на стоке транзистора) — 20 В/дел. Масштаб по горизонтали для обоих каналов соответствует 25 мкс/дел. Запуск схемы синхронизации производится по положительному перепаду напряжения в канале 2 на уровне 9,6 В. Амплитудное значение управляющего сигнала составляет 5 В, длительность — 75 мкс, частота повторения — примерно 200 Гц. Напряжение на стоке транзистора при воздействии управляющего сигнала снижается с 14 до 0 В, затем следует интервал 30 мкс ограничения индуктивного выброса. В отличие от идеализированной диаграммы, после выключения (закрывания) канала напряжение на стоке возрастает до уровня ограничения 50 В не мгновенно, а в течение 5 мкс. Данный интервал времени обусловлен обратным восстановлением диода, встроенного в транзистор, и сопротивлением соединительных проводников.

Следует также обратить внимание на задержку примерно в 5 мкс между спадом управляющего импульса и моментом выключения транзистора, вызванную разрядом входной емкости транзистора. Уменьшить данную задержку можно увеличением амплитудного значения управляющего сигнала до 8 В, как это показано на рис. 7б. При этом задержка между спадом импульса и моментом выключения ИСК практически отсутствует, что особо важно при проектировании, например, управляющих клапанов в тормозной магистрали антиблокировочной системы автомобиля или в электронной системе управления форсунками, подающими в автомобильный двигатель воздух (топливо), при установке ширины импульса впрыска в различных рабочих режимах.

Приведенные в настоящей статье сведения убедительно показывают, что конструирование и налаживание аппаратуры, коммутирующей сильноточную активную и индуктивную нагрузку, может быть выполнено в предельно сжатые сроки благодаря чрезвычайно широкой номенклатуре серийно производимых фирмой STMicroelectronics интеллектуальных силовых ключей. При этом сформированные на единственном полупроводниковом кристалле все необходимые узлы диагностики и защиты микросхемы способны обеспечить такую высокую надежность функционирования прибора в чрезвычайно неблагоприятных условиях эксплуатации, которую практически невозможно было бы получить в случае создания аналогичной схемы на дискретных элементах.

Литература

1. Косенко С., Емельянов Ю. Эргономичность автомобиля обеспечат силовые ключи ST // Вестник электроники. 2011, №1, с. 20–23.
2. Fully autoprotected Power MOSFET VNN7NV04, VNS7NV04, VND7NV04, VND7NV04-1

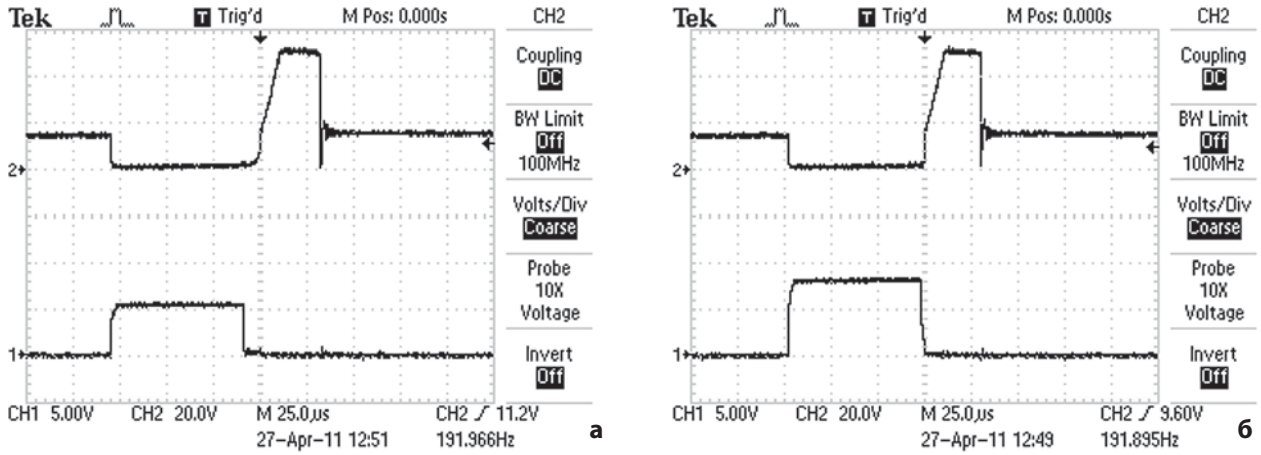


Рис. 7. Практические осциллограммы напряжений в схеме с силовым ключом VNN7NV04 при амплитудном значении управляющего сигнала 5 и 8 В