

Основы теории и особенности применения линейных MOSFET

Данный материал нельзя назвать новым, поскольку он был опубликован на английском языке в начале 2000-х годов, но является актуальным и сегодня, поскольку объясняет фундаментальные особенности работы силовых MOSFET в линейном режиме.

**Абду Саттар
(Abdus Sattar)**

**Владимир Цуканов
(Vladimir Tsukanov)**

Перевод: Иван Полянский

Многие приложения, такие как активная нагрузка, линейные регуляторы и усилители класса А, требуют применения MOSFET в линейном режиме, для которого необходимо наличие расширенной области безопасной работы и возможность рассеивать большую мощность. Такой режим работы сильно отличается от «обычного» ключевого режима, когда транзистор находится либо во включенном, либо в выключенном состоянии. MOSFET, работающий в линейном режиме, подвержен воздействию большого тока протекающего при высоком приложенном напряжении, что приводит к значительной рассеиваемой мощности. Когда термоэлектрическое воздействие достигает некоторого критического уровня, возможно образование локальных перегревов, ведущих к выходу транзистора из строя.

На рис. 1 показана типовая выходная характеристика N-канального MOSFET, на которой присутствуют несколько рабочих областей. Область отсечки подразумевает, что напряжение на затворе ниже напряжения включения $V_{gs(th)}$ и транзистор находится в закрытом состоянии или цепь «сток–

исток» разорвана. Область омического сопротивления является зоной, где транзистор ведет себя подобно резистору, сопротивление которого R_{ds} эквивалентно соотношению V_{ds}/I_{ds} . В линейном режиме транзистор работает в режиме насыщения тока, и величина тока стока I_{ds} является функцией напряжения «затвор–исток» V_{gs} .

$$I_{ds} = K(V_{gs} - V_{gs(th)})^2 = g_{fs}(V_{gs} - V_{gs(th)}), \quad (1)$$

где K — параметр, зависящий от температуры и геометрии транзистора, а g_{fs} — коэффициент усиления тока или крутизна характеристики. Когда напряжение на стоке V_{ds} увеличивается, положительный потенциал на стоке приводит к снижению напряжения на затворе и снижению поверхностного потенциала канала. Область инверсного слоя в канале сужается при увеличении напряжения на стоке, вплоть до нулевого значения при значении напряжения стока на уровне $(V_{gs} - V_{gs(th)})$. Эта точка называется точкой сужения канала, в которой происходит насыщение тока стока [2].

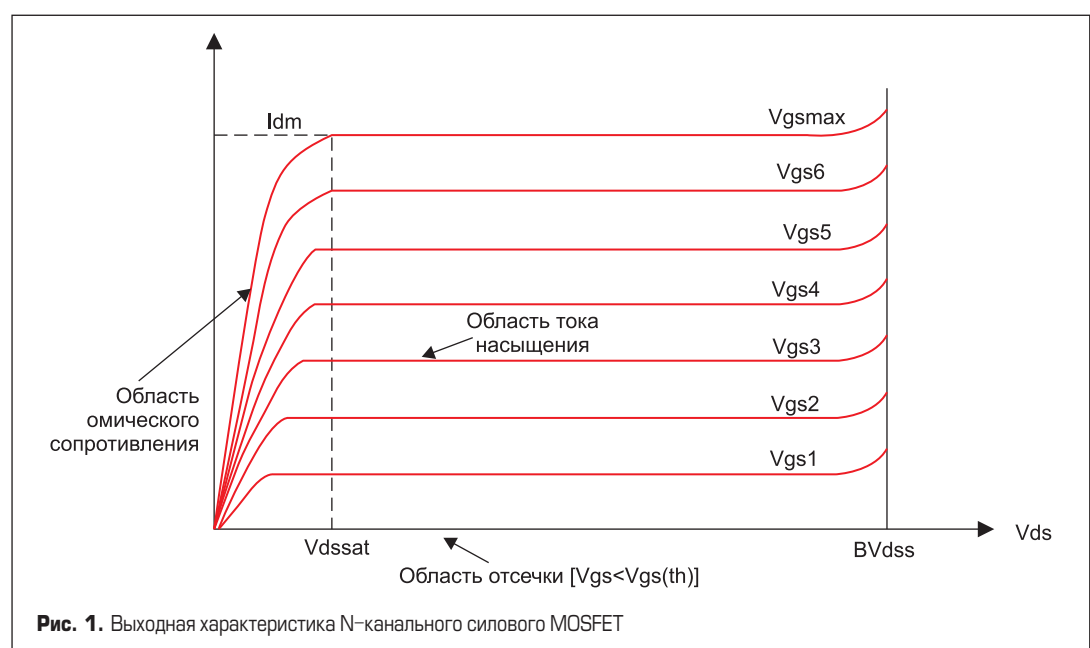


Рис. 1. Выходная характеристика N-канального силового MOSFET

График FBSOA в документации на MOSFET позволяет определить максимально допустимые границы использования конкретных транзисторов в определенных режимах. На рис. 2 показан типовой график FBSOA для N-канального силового MOSFET.

Он ограничен максимальным напряжением «исток–сток» V_{ds} , максимальным коммутируемым током I_{dm} и константой максимальной рассеиваемой мощности для импульсов заданной длительности. На графике приведены кривые для постоянного тока, а также для одиночных импульсов длительностью 10 и 1 мс, 100 и 25 мкс. Верхняя часть графика имеет излом и состоит из двух областей: левая часть имеет положительный наклон и определяет максимальный допустимый ток за счет сопротивления открытого канала $R_{ds(on)}$. Правая часть графика имеет отрицательный наклон (спадает) и определяется максимальной допустимой мощностью рассеивания на транзисторе P_d . С правой стороны график ограничен максимально допустимым напряжением «исток–сток» V_{ds} .

Максимально допустимая рассеиваемая мощность на транзисторе определяется формулой:

$$P_d = [T_{j(max)} - T_C] / Z_{thJC} = V_{ds} I_d \quad (2)$$

где Z_{thJC} — тепловое сопротивление «кристалл–корпус», $T_{j(max)}$ — максимально допустимая температура кристалла MOSFET.

Константа максимальной рассеиваемой мощности, которая определяет правую, спадающую границу графика, является теоретической величиной, предполагающей равномерное распределение температуры по всей площади кристалла транзистора. Но это допущение не всегда является верным, особенно для кристаллов MOSFET большой площади. Во-первых, края кристалла, которые имеют контакт с элементами корпуса, обычно имеют более низкую температуру, чем центр. Во-вторых, неоднородность материалов (пустоты и шероховатости в местах контакта) может приводить к локальным ухудшениям параметров теплопроводности и к увеличению локальной температуры. В-третьих, неравномерности в концентрации примесей и толщине изолирующего оксидного слоя могут приводить к разбросу напряжения открывания и коэффициента передачи в разных областях кристалла, что, в свою очередь, будет приводить к неоднородности локальной температуры в разных областях кристалла.

Неравномерность локальной температуры различных областей кристалла несущественна при ключевом режиме работы MOSFET, но данные особенности могут привести к плачевным результатам при эксплуатации транзистора в линейном режиме, при длительности импульса, большей, чем время распространения тепла от кристалла к радиатору. Современные MOSFET оптимизированы для работы в ключевом режиме и имеют ограниченные возможности применения в правой нижней части графика FBSOA — по причине

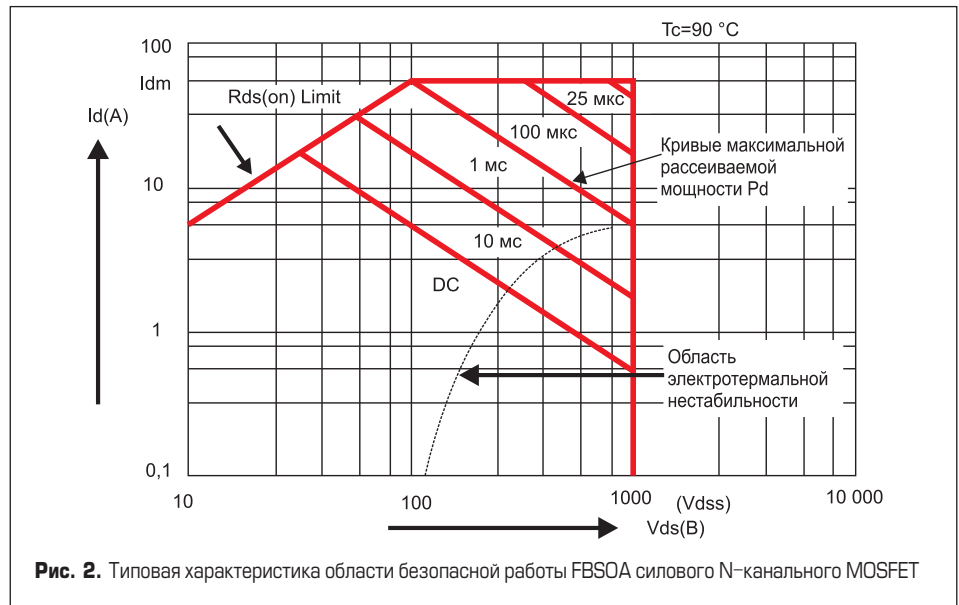


Рис. 2. Типовая характеристика области безопасной работы FBSOA силового N-канального MOSFET

области электротемпературной нестабильности, обозначенной на рис. 2.

Электротемпературная нестабильность (ETI) может быть понята как результат действия механизма положительной обратной связи на поверхности силового MOSFET, работающего в линейном режиме:

- возникает локальное увеличение температуры в определенной области кристалла;
- возникает локальное снижение порогового напряжения V_{gs} (этот параметр имеет отрицательный температурный коэффициент) в локальной области;
- увеличивается локальная плотность тока $J_{ds} \sim (V_{gs} - V_{gs(th)})$;
- увеличение локального тока приводит к увеличению локальной выделяемой мощности, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему локальному увеличению температуры.

В зависимости от длины импульса, особенностей распространения тепла и топологии кристалла электротемпературная нестабильность может приводить к концентрации всего коммутируемого тока в малых локальных

областях структуры, создавая очаги перегрева. Это обычно приводит к потере контроля управления в данной области и включению паразитного биполярного транзистора, которое приводит к лавинообразному выходу из строя всей структуры.

Компания IXYS разработала структуру и технологию производства силовых MOSFET, обладающих расширенной областью безопасной работы FBSOA и способных подавлять положительную обратную связь в эффекте электротемпературной нестабильности ETI. Новая структура MOSFET имеет неравномерное распределение ячейки и различные пороги управляющего напряжения [3]. Каждая ячейка нового транзистора имеет встроенный резистор в цепи стока, который ограничивает коммутируемый ток [4]. Паразитный транзистор имеет шунтирование и не способен включиться даже в самых крайних режимах. В дополнение, выходной контроль предполагает 100%-ное измерение скорости распространения тепла в транзисторе для исключения влияния пайки и других технологических процессов.

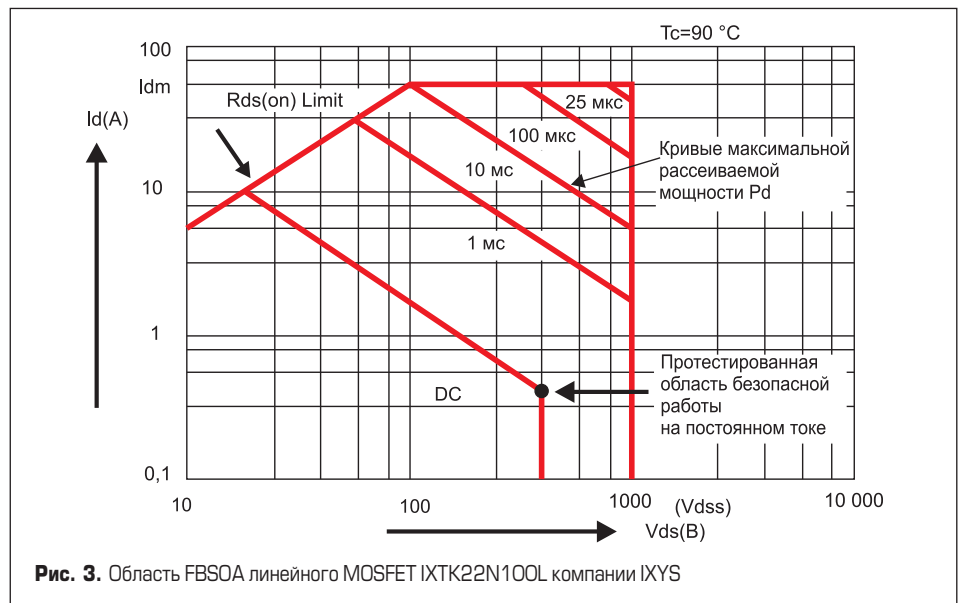


Рис. 3. Область FBSOA линейного MOSFET IXTK22N100L компании IXYS

Таблица. Линейные силовые MOSFET компании IXYS

Модель	$V_{DSS\ max}$, В	$I_{D\ (cont)}$, А ($T_c = +25^\circ C$)	$R_{DS(on)\ max}$ ($T_J = 25^\circ C$), Ом	$C_{iss\ typ}$, пФ	$Q_g\ typ$, нКл	$t_{rr\ typ}$, нс	P_D , Вт	$R_{thJC\ max}$, К/Вт	Корпус	
IXTH80N075L2	75	80	0,024	3600	103	160	357	0,35	TO-247	
IXTP80N075L2									TO-220	
IXTH64N10L2	100	64	0,032	3620	100	180	357	0,35	TO-247	
IXTH110N10L2		110	0,018	10 500	260	230	600	0,21	SOT-227	
IXTN200N10L2		178	0,011	23 000	540	245	830	0,15		
IXTH60N20L2	200	60	0,045	10 500	255	330	540	0,23	TO-247	
IXTH80N20L		80	0,032	6160	180	250	520	0,240	TO-264	
IXTK110N20L2		110	0,024	23 000	500	420	960	0,13		
IXTN90N25L2	250	90	0,033	23 000	640	266	735	0,17	SOT-227	
IXTK90N25L2							960	0,13	TO-264	
IXTH15N50L2	500	15	0,480	4080	123	570	300	0,42	TO-247	
IXTH24N50L		24	0,300	2500	160	500	400	0,310		
IXTH30N50L2		30	0,200	8100	240	500	400	0,31		
IXTH40N50L2		40	0,170	10 400	320	500	540	0,23		
IXTK46N50L		46	0,160	7000	260	600	700	0,180		TO-264
IXTN60N50L2		53	0,100	24 000	610	980	735	0,17		SOT-227
IXTN62N50L		62	0,100	11 500	550	500	800	0,156		SOT-227B
IXTH30N60L2		60	30	0,240	10 700	335	710	540		0,23
IXTH12N100L	1000	12	1,300	2500	155	1000	400	0,310	TO-247	
IXTK22N100L		22	0,600	7050	270		700	0,180	TO-264	
IXTN30N100L		30	0,450	13 700	545		800	0,156	SOT-227B	
IXTK17N120L	1200	17	0,900	8300	155	1830	700	0,180	TO-264	
IXTK8N150L	1500	8	3,600	8000	250	1700	700	0,180	TO-264	

Таким образом, компания IXYS предлагает новое семейство линейных MOSFET, имеющих расширенную область FBSOA и пригодных для применения в линейном режиме. Документация на эти транзисторы содержит гарантированную характеристику FBSOA. Для примера на рис. 3 показан пример FBSOA для линейного транзистора IXTK22N100L, где кривая DC является результатом реальных тестов. Список доступных линейных MOSFET

первого поколения (сейчас выпущены и более новые версии — см. www.ixys.com) приводится в таблице.

Исходя из формулы (2), для одиночного MOSFET, подобного IXTK22N100L на напряжении 1000 В, максимальная рассеиваемая мощность составит 700 Вт. Этот уровень мощности обычно характерен для ключевого режима работы транзистора и не является верным для линейного режима. Так, в линей-

ном режиме, на напряжении 800 В при токе $I_d = 0,3$ А и $T_c = +90^\circ C$, гарантированная рассеиваемая мощность составит 240 Вт.

Примеры применения

Активная нагрузка

Предположим, что есть некий регулируемый источник питания на 2 А/600 В, который должен быть протестирован на активной нагрузке, собранной из нескольких MOSFET, работающих в параллель. В этом случае MOSFET должен иметь максимальное напряжение не ниже 1000 В и иметь способность рассеивать максимальную мощность источника, плюс некий запас на проверку работоспособности защиты от превышения тока.

Транзистор IXTK22N100L имеет максимальное напряжение 1000 В и максимальную рассеиваемую мощность 700 Вт в ключевом режиме. Но эта мощность не может быть использована при тепловом расчете в линейном режиме. Для линейного режима необходимо оперировать областью безопасной работы SOA с максимальной рассеиваемой мощностью 240 Вт при напряжении 800 В, $I = 0,3$ А, $T_c = +90^\circ C$. Выберем запас 20% что означает максимальную рассеиваемую мощность 192 Вт.

Максимальная выходная мощность источника питания равна 1200 Вт. При запасе на проверку защиты от короткого замыкания в 20%, мощность сборки из параллельно включенных MOSFET должна составить не менее 1440 Вт. Количество параллельно включенных MOSFET составит $1440/192 = 8$ шт. Типовая схема включения показана на рис. 4.

Резисторы R_{s1}–R_{s8} служат для контролирования тока стока каждого MOSFET. Разброс их сопротивления будет определять точ-

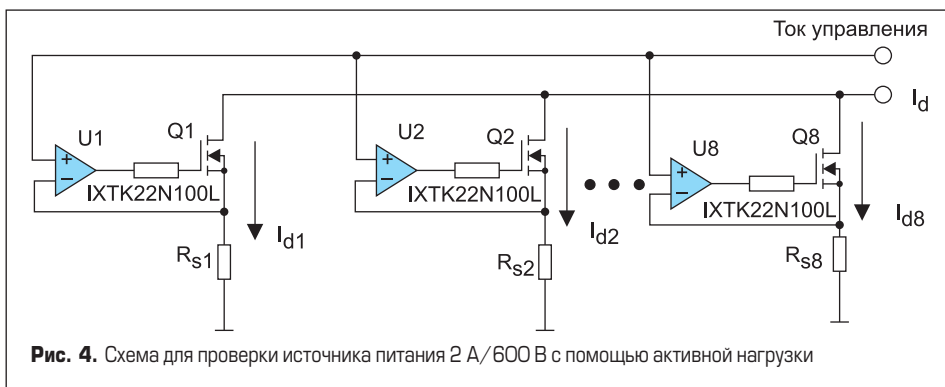


Рис. 4. Схема для проверки источника питания 2 А/600 В с помощью активной нагрузки

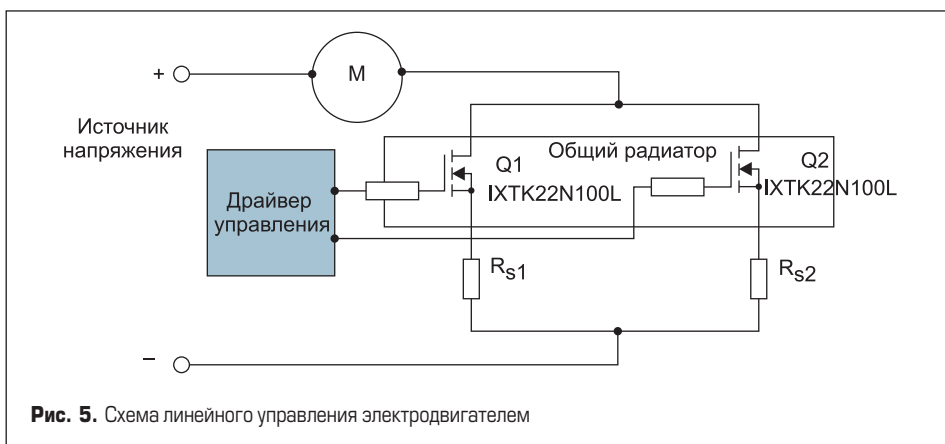


Рис. 5. Схема линейного управления электродвигателем

ность распараллеливания токов в параллельно работающих транзисторах. Напряжение с измерительных резисторов R_{s1} – R_{s8} подается на инвертирующий вход операционного усилителя, включенного в затвор MOSFET. Неинвертирующий вход операционного усилителя соединен с общим входом управления током стока [1].

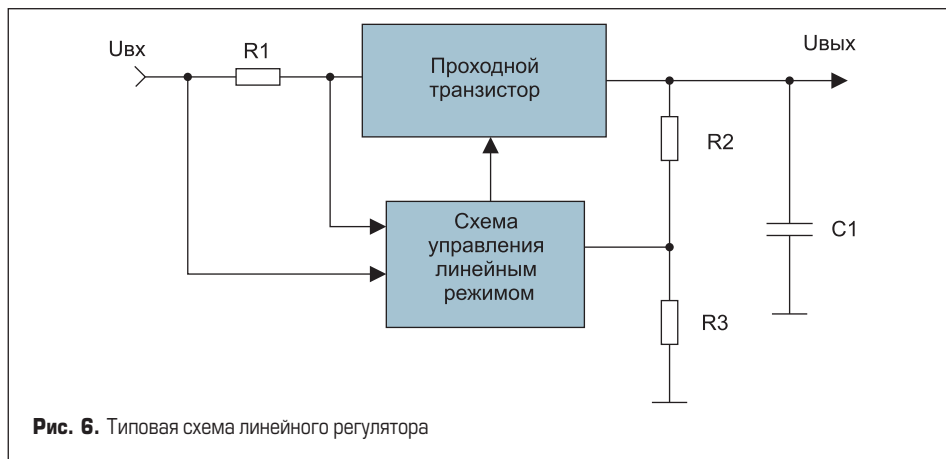
Управление двигателем

На рис. 5 показана схема управления электродвигателем, в котором питающее напряжение от батареи подается через два параллельно включенных MOSFET, установленных на одном радиаторе.

Ток стока силового MOSFET, работающего в линейном режиме, определяется напряжением «затвор–исток». Напряжение на электродвигателе равно разнице напряжения батареи минус напряжение «исток–сток». Управление осуществляется с помощью драйвера, который отслеживает ток через транзисторы и выставляет нужное напряжение на затворе.

Линейный регулятор

Рис. 6 иллюстрирует типовой линейный регулятор, в котором выходные параметры устанавливаются с помощью изменения падения напряжения на проходном транзисторе. Проходной транзистор работает в линейном



режиме, и его поведение похоже на переменный резистор. Данная схема требует рассеивания большой мощности и расширенной области безопасной работы FBSOA. *N*-канальные силовые MOSFET, приведенные в таблице, могут быть применены в данных приложениях для обеспечения большой выходной мощности.

Литература

1. Richard Frey, Denis Grafham, Tom Mackewich, "New 500V Linear MOSFETs for a 120 kW

Active Load" Application Note, Advanced Power Technology (APT), 2000.

2. B. Jayant Baliga, "Power Semiconductor Devices" PWS Publishing Company, 1996.
3. Nathan Zommer, Vladimir Tsukanov, "Non-Uniform Power Semiconductor Device" United States Patent # US 6710405B2, March 2004.
4. Nathan Zommer, "Monolithic Semiconductor Device and Method of Manufacturing Same" United States Patent # US 4860072, August 1989.