

# Интеллектуальные силовые ключи.

## Технологические и схемотехнические проблемы монолитной интеграции

**Евгения Трудновская**  
**Александр Лагун**  
**Павел Машевич, к.т.н.**  
**Алексей Воробьев**  
**Михаил Сладков**  
**Антон Лукьянов**  
**Алексей Таболкин**

market@angstrem.ru

На рынке электронных ключей все еще доминируют дискретные силовые ДМОП-транзисторы. По основным параметрам — малым сопротивлениям (от единиц мОм), высоким напряжениям (до 1000 В), быстродействию (частота работы до 500 кГц) — они являются почти идеальными ключами и выпускаются в огромном количестве разными производителями.

Использование ДМОП-транзисторов требует комплектации их соответствующими драйверами и, для снижения динамических потерь мощности, быстро восстанавливающимися диодами. Основными недостатками дискретных ДМОП-транзисторов являются отсутствие внутренних защит от перегрузок по току и напряжению и необходимость построения внешних схем управления логикой работы ключей. Использование внешних защит не всегда эффективно, например перегрев кристалла ДМОП-транзистора должен контролировать температурный датчик, расположенный на том же кристалле. Перегрузку по току лучше контролировать отводом тока от истока в соотношении, например, 1:5000. Для дискретного транзистора это приводит к появлению дополнительного вывода.

Из-за больших плотностей тока и работы на индуктивные нагрузки дискретные ДМОП-транзисторы в нештатных ситуациях могут выходить из строя и приводить к отказу соответствующей электронной системы. Поэтому с самого начала массового использования мощных ДМОП-транзисторов использовались различные внешние схемы защиты, а также возникали идеи интегрировать транзистор со встроенной защитой и схемой управления логикой работы.

Термин «интеллектуальная мощная ИС» впервые появился в 1985 г. в статье Г. Бирмана в журнале

*Electronics*. С тех пор ведущими полупроводниковыми компаниями проделана огромная работа и достигнут значительный прогресс.

Массовая замена дискретных ДМОП-транзисторов интеллектуальными силовыми ключами (ИСК) началась с автомобильной промышленности, где действуют высокие стандарты безопасности. Все крупные полупроводниковые компании, такие как Infineon (Siemens), STMicroelectronics, Philips, Motorola, Fuji Electric, International Rectifier и др., выпустили семейства автомобильных интеллектуальных ключей на напряжения 12, 24 и 42 В. В настоящее время сфера применения ИСК расширяется, затрагивая, в первую очередь, те направления, где нужна повышенная надежность. Это относится, прежде всего, к военной технике, авиации, транспорту, связи и т. д.

В статье рассмотрены технологические и схемотехнические проблемы интеграции ИСК с малыми сопротивлениями в открытом состоянии. В настоящее время по этому параметру хорошо изучен диапазон коммутируемых напряжений до 60 В, для которого используется вертикальная конструкция силового ДМОП-транзистора с традиционной  $n-n^+$  эпитаксиальной структурой. Более высоковольтный диапазон коммутируемых напряжений с малыми сопротивлениями в открытом состоянии в настоящее время не имеет удовлетворительного решения в монолитном исполнении.

### Элементная база интеллектуальных силовых ключей

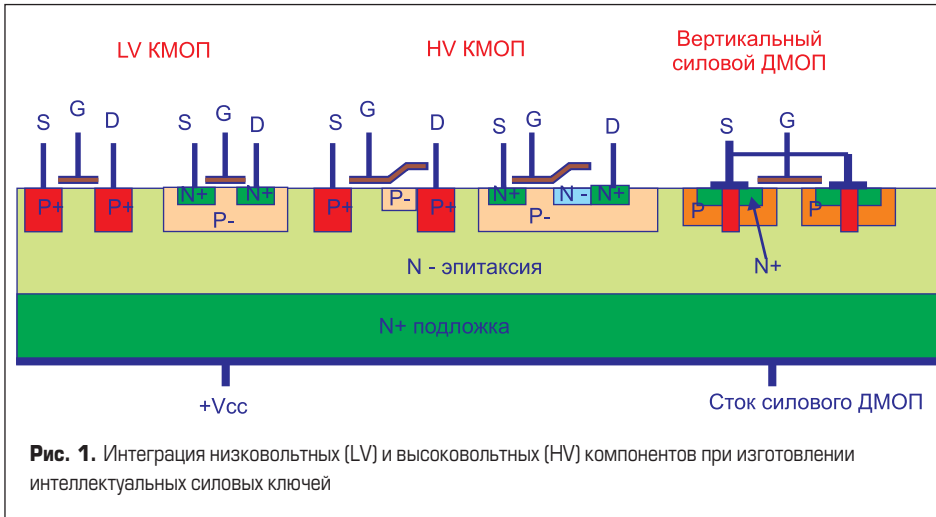
В работах [1–6] рассмотрены технологические процессы и элементная база, используемые для разработки монолитных ИСК на коммутируемые напряжения до 60 В. Для обеспечения защитных функций, управления мощным ДМОП-транзистором и вывода информации о состоянии ключа на контроллер (употребляется термин «интеллектуальные функции») технологический процесс должен обеспечить широкую номенклатуру компонентов, приведенную в таблице 1.

### Технологические проблемы монолитной интеграции

В ОАО «Ангстрем» силовые интеллектуальные ключи выполнены по эпитаксиальной технологии на  $n^+$ -подложке с «самоизоляцией» компонентов

Таблица 1. Основные параметры компонентов

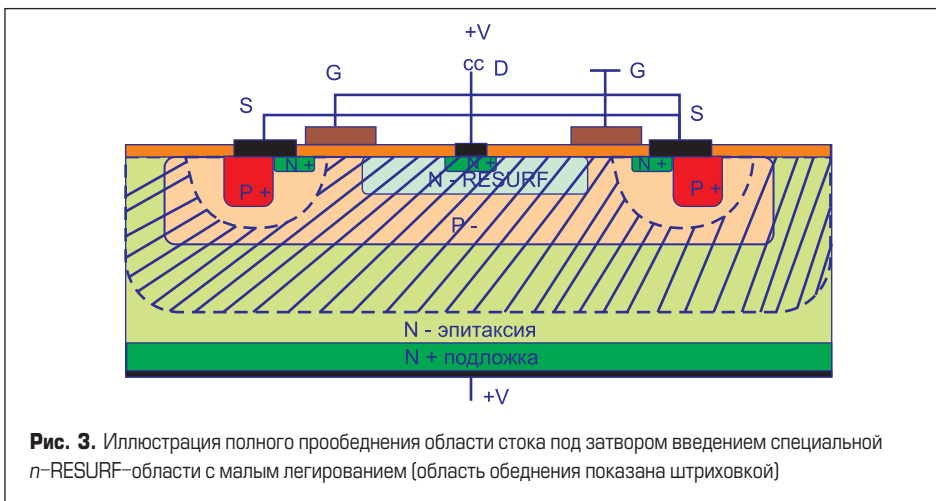
Компоненты	Максимальное рабочее напряжение, В
Высоковольтные (HV) КМОП-транзисторы	90
Низковольтные (LV) КМОП-транзисторы	15
Силовой ДМОП-транзистор	90
Высоковольтные $p-p$ -подложечные транзисторы	90
Высоковольтные (HV) $p$ МОП-транзисторы со встроенным каналом	90
Высоковольтные (HV) резисторы, $R_s = 1-5$ кОм/кВ	90
Диоды Зенера (стабилитроны)	~7 и ~14
Низковольтные (HV) емкости	30
Высоковольтные (LV) емкости	90



и интеграцией перечисленных в таблице 1 компонентов на одном кристалле. На рис. 1 представлены основные низковольтные и высоковольтные компоненты, используемые при изготовлении интеллектуальных силовых ключей. Не показаны стабилизаторы двух типов, высоковольтные рМОП транзисторы со встроенным каналом и LV- и HV-емкости.

При разработке конструкции транзисторов и маршрута изготовления выявились следующие основные технологические проблемы:

- Создание на относительно слаболегированной эпитаксиальной пленке ( $\rho_v = 2-5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) и толщиной порядка 8–10 мкм HV КМОП- и силового ДМОП-транзисторов с пробивными напряжениями 90–100 В.
- Разработка конструкции и технологии HV КМОП-транзисторов с напряжениями пробоя 90–100 В по технологии с полным прообеднением стоковой области под затвором, т.н. RESURF-технология (REDUCED SURFACE FIELD).



- Обеспечение поверхностной изоляции HV компонентов созданием поликремниевых расширенных электродов,  $n^+$  и  $p^+$  охранных колец.
- Обеспечение высоких пробивных напряжений исток-подложка LV рМОП-транзисторов, учет влияния потенциала подложки на изменение порогового напряжения рМОП-транзисторов.

Основной недостаток представленной на рис. 1 схемы интеграции заключается в том, что необходимо обеспечивать высокое пробивное напряжение исток-подложка LV рМОП-транзисторов. Необходимо также моделировать работу схемы с учетом правильно определенного коэффициента влияния подложки. На рис. 2 представлена зависимость порогового напряжения LV рМОП-транзисторов от напряжения на подложке.

На рис. 3 представлен HV нМОП транзистор с n-RESURF-областью в области стока. Схема включения такого транзистора предполагает подачу положительных напряжений на сток D и  $n^+$ -подложку, а потенциал истока S с затвором G близок к потенциалу земли. При правильно выбранных концентрациях в p-кармане и n-RESURF-области, при подаче соответствующего положительного напряжения область обеднения распространяется до поверхности стока под затвором прежде, чем наступит лавинный пробой. Таким образом обеспечивается повышение пробивных напряжений HV КМОП-транзисторов.

Известно, например [7], чтобы RESURF область обеспечивала прообеднение слоя до наступления пробоя, произведение толщины слоя на его концентрацию  $d \times N$  не должно превышать  $1,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

Области p- и n-RESURF широко используются в различных конструктивных вариантах для обеспечения высоковольтности МОП-транзисторов. Интегральная RESURF-технология успешно используется для получения пробивных напряжений отдельных компонентов до напряжений 700 В. Естественно, выбирается соответствующая величина удельного сопротивления подложки или эпитаксиального слоя.

Для изготовления интеллектуальных силовых ключей с рабочими напряжениями до 60 В был разработан технологический маршрут, включающий 12 фотокопий. Напряжение изоляции всех компонентов 95 В. Схема маршрута:

1. Фотокопия «Метки совмещения»;
2. Фотокопия «p-карман»;
3. Фотокопия «n-карман 1»;
4. Фотокопия «n-карман 2»;
5. Фотокопия «Активные области»;
6. Фотокопия «Затворы»;
7. Фотокопия «D-карман»;
8. Фотокопия « $n^+$ -сток-исток»;
9. Фотокопия «Контактные окна»;
10. Фотокопия «Металл 1»;
11. Фотокопия «VIA»;
12. Фотокопия «Металл 2»;

Разработанный технологический процесс обеспечил формирование компонентов, необходимых для изготовления монолитных силовых

Таблица 2. Параметры компонентов

Наименование компонента	$V_{bь}$ , В	$V_{тr}$ , В	Примечания
LV NМОП L/W = 6/10 (мкм/мкм)	18	1,1	
LV PМОП L/W = 13/10 (мкм/мкм)	45	1,6	$V_{bss} = 90$ В
HV NМОП L/W = 5/48 (мкм/мкм)	95	-1,4	
HV PМОП L/W = 13/32 (мкм/мкм)	95	-1,4	
Силовой ДМОП, S = 7,2 мм <sup>2</sup>	95	2,3	$R_{dson} = 50$ мОм
HV nМОП со встроенным каналом	95	-1,5	
Стабилитроны	7,5/14		
LV-конденсатор	45		$C_{уд.} = 0,65$ Ф/мкм <sup>2</sup>
HV-конденсатор	120		$C_{уд.} = 0,2$ Ф/мкм <sup>2</sup>
Толщина подзатворного окисла во всех компонентах 500 Å			

интеллектуальных ключей. Параметры разработанных компонентов приведены в таблице 2.

На рис. 4 представлены типовые выходные характеристики HV nМОП- и pМОП-транзисторов, изготовленных по разработанному технологическому маршруту. Фотографии сделаны с экрана прибора для измерения параметров транзисторов ПНХТ-2.



Рис. 4. Выходные характеристики HV nМОП- и pМОП-транзисторов

### Схемотехнические проблемы монолитной интеграции

Современные силовые ключи должны обеспечивать все типы резистивных, индуктивных и емкостных нагрузок. В зависимости от подключения к напряжению питания силового ДМОП-транзистора интеллектуальные ключи делятся на ключи нижнего уровня и ключи верхнего уровня (рис. 5).

В ОАО «Ангстрем» были разработаны и изготовлены образцы кристаллов монолитных интеллектуальных силовых ключей верхнего и нижнего уровня с n-канальным мощным ДМОП-транзистором.

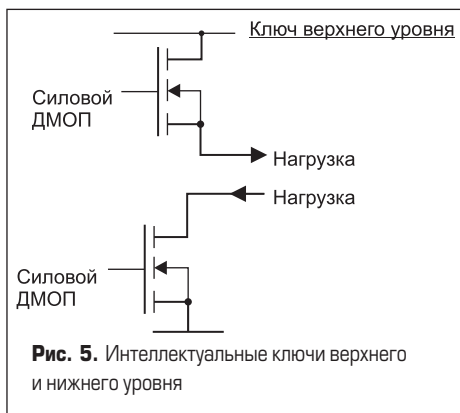


Рис. 5. Интеллектуальные ключи верхнего и нижнего уровня

### Интеллектуальные силовые ключи верхнего уровня

Ключ верхнего уровня работает с накачкой заряда в диапазоне рабочих напряжений до 42 В и состоит из мощного ДМОП-транзистора и схемы управления, выполняющей различные встроенные защитные функции. Ключ верхнего уровня имеет совместимый с КМОП вход, диагностическую обратную связь и контролируемый по току вывод — пропорциональный датчик тока, монолитно интегрированный в конструкцию силового ДМОП-транзистора для контроля тока нагрузки.

Защитные функции ключа верхнего уровня:

- КМОП-совместимый вход;
- отключение при перенапряжении и низком напряжении с автоматическим перезапуском и гистерезисом;
- быстрое размагничивание индуктивных нагрузок;
- отсутствие зависимости логической «земли» от земли нагрузки;
- защита от короткого замыкания;
- защита от перегрузки по току;
- выключение при превышении температуры;
- защита от перенапряжения (включая сброс нагрузки) с внешним резистором;
- защита от обратного тока с внешним резистором;
- защита от потери «земли» и напряжения питания;
- защита от статического электричества;

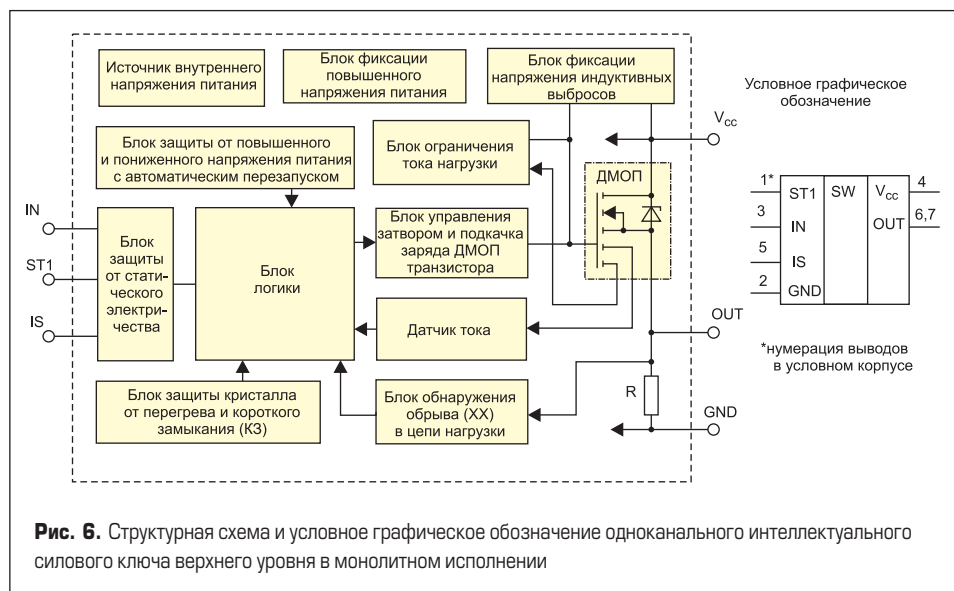


Рис. 6. Структурная схема и условное графическое обозначение одноканального интеллектуального силового ключа верхнего уровня в монолитном исполнении

- датчик тока, пропорциональный нагрузочному току;
- диагностическая обратная связь с выходом типа «открытый сток»;
- выявление обрыва нагрузки в выключенном состоянии с внешним резистором;
- обратная связь при отключении по температуре во включенном состоянии.

На рис. 6 представлена структурная схема монолитного ключа верхнего уровня.

Внутренний стабилизатор напряжения преобразует напряжение питания ИСК в напряжение питания блока логики (~5 В). Блок фиксации повышенного напряжения питания защищает все блоки (кроме мощного ДМОП-транзистора) от повышенного напряжения (с внешним резистором в цепи GND). Блок фиксации напряжения индуктивных выбросов открывает мощный ДМОП-транзистор при возникновении индуктивного выброса и таким образом защищает его от пробоя высоким напряжением. Блок защиты от повышенного и пониженного напряжения питания с автоматическим перезапуском обеспечивает выключение мощного ДМОП-транзистора при повышенном и пониженном напряжении питания. Блок защиты кристалла от перегрева и короткого замыкания защищает ключ при достижении критической температуры кристалла ( $T_{O} > 150$  °С) и выдает сигнал ошибки на выход состояния ST1. После охлаждения ключ автоматически запускается вновь и работоспособность восстанавливается. Если перегрузка не устранена, то такие температурные циклы будут периодически повторяться. Блок ограничения тока нагрузки подключен к отводу тока мощного ДМОП-транзистора, ток в цепи отвода пропорционален току нагрузки, при достижении критического значения тока нагрузки блок уменьшает напряжение на затворе мощного ДМОП-транзистора, что приводит к увеличению сопротивления  $R_{DS(ON)}$  и к уменьшению тока нагрузки. Блок обнаружения обрыва (холостого хода) в цепи нагрузки определяет обрыв нагрузки при выключенном ключе и подключенном внешнем резисторе «подтяжки» к напряжению питания. Блок логики обеспечивает управление всеми блоками интеллектуального ключа.

Дополнительный выход состояний ST1 позволяет контролировать состояние ключа во время работы и при включении. Сигнал состояния ключа имеет выход с открытым «стоком». Состояние с открытым стоком требует подключения к выходу ST1 резистора 5 кОм. Несколько выходов с открытым стоком могут подключаться к одному резистору. Эта комбинация («проводное «И»») дает высокий уровень сигнала, когда нет ошибочных сигналов, и низкий уровень, если один или больше выходов с открытым стоком выдают сигнал ошибки.

Накачка заряда формирует увеличенное напряжение на затворе, необходимое для быстрого срабатывания мощного ДМОП-транзистора. «Зарядовый насос» активируется входным сигналом, утравивая напряжение питания, которое подается на затвор мощного ДМОП-транзистора.

В таблице 3 представлено обозначение и назначение выводов ключа верхнего уровня в монолитном исполнении

Таблица 3. Обозначение и назначение выводов ключа верхнего уровня в монолитном исполнении

№ вывода	Обозначение	Функциональное назначение
6, 7	OUT	Защищенный выход
1	ST1	Выход диагностики Низкий уровень при срабатывании диагностики
2	GND	Общий вывод
3	IN	Вход управления, включает выход коммутируемого напряжения при высоком уровне логического сигнала
5	IS	Выход датчика тока, ток датчика пропорционален выходному току
4	Vcc	Вывод положительного напряжения питания

Таблица 4. Основные характеристики интеллектуальных силовых ключей верхнего уровня в монолитном исполнении

Число каналов	Число выводов	U <sub>вых макс</sub> , В	I <sub>ном</sub> , А	R <sub>DS(on)</sub> , мОм	V <sub>cc</sub> , В	Параметры защиты	
						I <sub>стобр</sub> , А	T <sub>выкл</sub> , °С
1	6	60	8	60	42	60	+150
2	20	60	12	30	42	60	+150

Таблица 5. Назначение выводов ключа нижнего уровня

Номер вывода	Обозначение	Назначение
1	IN	Вход
2	GND	Общий вывод, подключен к истоку ДМОП-транзистора
3	D*	Сток ДМОП-транзистора

**Интеллектуальные силовые ключи нижнего уровня**

Ключ нижнего уровня состоит из мощного ДМОП-транзистора и схемы управления, которая имеет встроенную защиту от перегрузок.

Защитные функции ключа нижнего уровня:

- КМОП-совместимый вход;
- отключение при перегреве кристалла с защелкой;
- защита от перегрузки по току, короткого замыкания, перенапряжения;
- ограничение тока;
- проверка состояния с помощью внешнего резистора;
- возможность аналогового управления;
- защита входов от статического электричества.

Структурная схема ИСК нижнего уровня в монолитном исполнении с фиксированным током ограничения приведена на рис. 7.

Назначение выводов ключа нижнего уровня приведено в таблице 5.

Использование входа управления для диагностики режимов работы ключа позволяет обойтись всего тремя выводами корпуса. Малое количество выводов и простота схемы включения делают этот прибор более дешевым по сравнению с ключом верхнего уровня.

На рис. 8 представлена структурная схема ИСК нижнего уровня в монолитном исполнении с регулируемым током ограничения и датчиком тока.

Вход управления ключей этого типа одновременно является и входом диагностики рабочего состояния прибора по величине входного тока. Ключи этого класса защищены от перегрева кристалла (температура выключения +150 °С), имеют оптимизированные длительности фронтов и спада импульсов

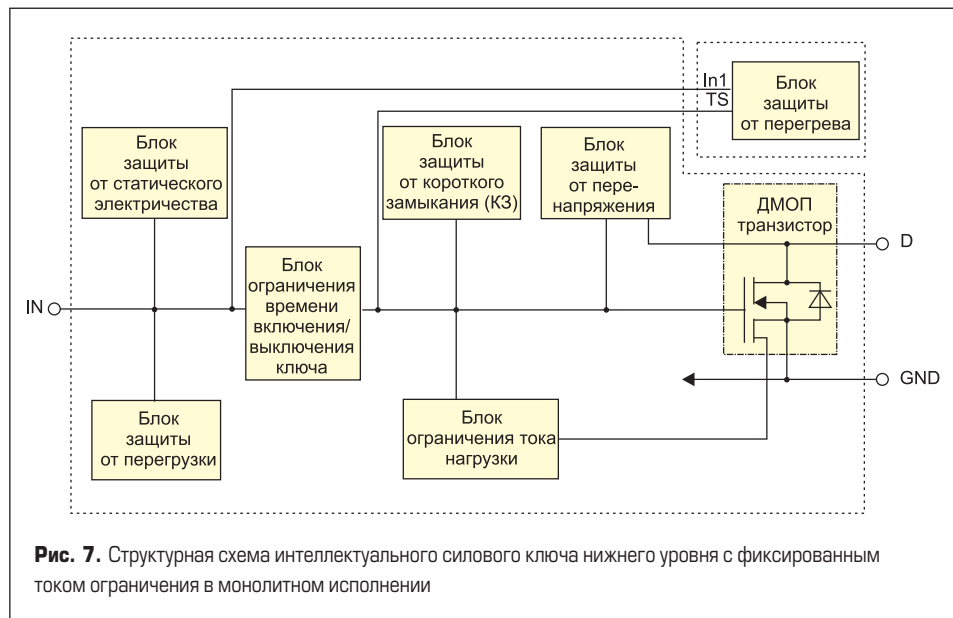


Рис. 7. Структурная схема интеллектуального силового ключа нижнего уровня с фиксированным током ограничения в монолитном исполнении

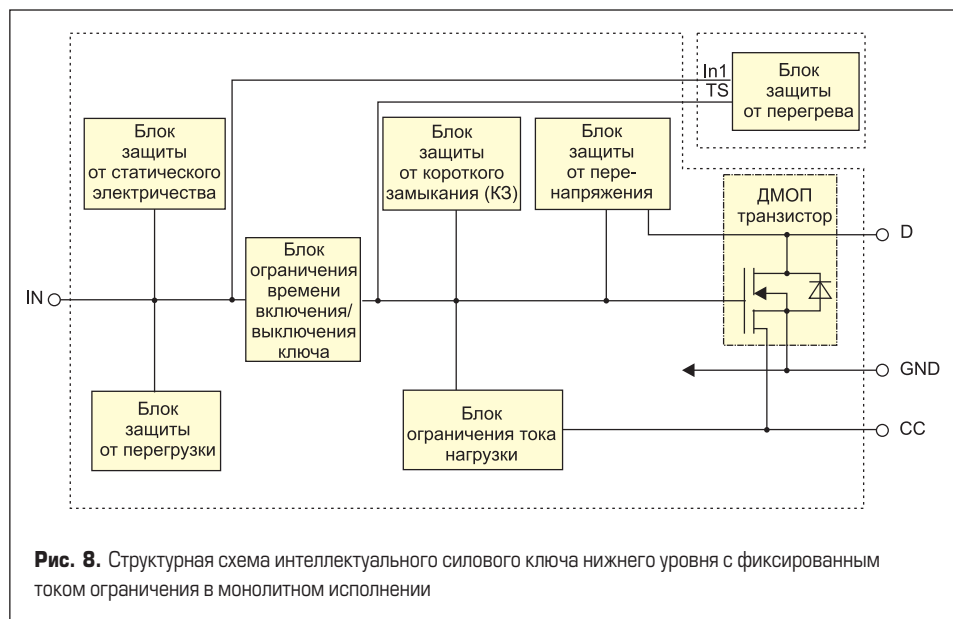


Рис. 8. Структурная схема интеллектуального силового ключа нижнего уровня с фиксированным током ограничения в монолитном исполнении

для минимизации создаваемых электромагнитных помех, реализована функция активного ограничения тока. Низкий входной ток и совместимость с логическими уровнями позволяют упростить управление ключами от микроконтроллера и исключить дополнительные электронные компоненты.

В таблице 6 представлено назначение выводов схемы ИСК нижнего уровня в монолитном исполнении с регулируемым током ограничения и датчиком тока.

В таблице 7 представлены основные характеристики ИСК нижнего уровня в монолитном исполнении, разработанных ОАО «Ангстрем».

### Заключение

В результате проведенной работы в ОАО «Ангстрем» были решены следующие задачи:

- Разработана технология создания кристаллов интеллектуальных силовых ключей верхнего и нижнего уровней в виде монолитных интегральных схем с развитой системой управления и контроля.
- Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы интеллектуальных силовых ключей верхнего и нижнего уровня в монолитном исполнении.

**Таблица 6.** Назначение выводов схемы интеллектуального силового ключа нижнего уровня в монолитном исполнении с регулируемым током ограничения и датчиком тока

Номер КП	Обозначение	Назначение
1	IN	Вход
2	CC	Вывод отвода тока ДМОП-транзистора с возможностью подключения внешнего резистора для коррекции предельного тока нагрузки
3	GND	Общий вывод, подключен к истоку ДМОП-транзистора
4	D*	Сток ДМОП-транзистора

**Таблица 7.** Основные характеристики интеллектуальных силовых ключей нижнего уровня в монолитном исполнении

Число выводов	$U_{\text{вых макс}}$ В	$R_{\text{DSON}}$ мОм	$I_{\text{ном}}$ А	$I_{\text{стоб}}$ А	$T_{\text{выкл}}$ °С	Вход управления и диагностики
3/4	60	40	19	30	150	Один вывод

### Литература

1. Dunn W. C. Driving and Protection of High Side NMOS Power Switches // IEEE Transaction on Industry Application 1992. V. 28. № 1.
2. Pribyl W. Integrated Smart Power Circuits Technology, Design and Application // Siemens Entwicklungszentrum für Mikroelektronik GmbH.
3. Zitta H. et al. A 60-V CMOS DC/DC-Converter for ISDN Application // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1988. V. 23. № 3.
4. Marty-Blavier A. et al. A Cost Effective Smart Power Technology for 45V Application // European Solid-State Device Research Conf. 1995.
5. Morimoto T. et al. High-Side Intelligent Power Switch Technology // Fuji Electric Review. 1994. V. 40. № 4.
6. Yoshida K. et al. A Self-Isolated CDMOS Technology for the Integration of Multi-Channel Surge Protection Circuits. // Power Semiconductor Devices and ICs. IEEE 15th International Symposium. 2003.
7. Study on Process Integration of High-Voltage BCD MOS IC. Agilent Technologies. 2006.