

# Особенности применения интеллектуальных силовых модулей

Одна из основных тенденций современной микроэлектроники — это увеличение степени интеграции, объединение на одном кристалле или в одном корпусе максимального количества компонентов для полного решения какой-либо задачи. В области силовой техники эта тенденция привела в свое время к разработке силовых модулей полумостовых и мостовых конфигураций. Наивысшим достижением интегральной силовой техники на сегодняшний день является создание интеллектуальных силовых модулей IPM (Intelligent Power Module) — мощных импульсных высоковольтных усилителей, управляемых логическими сигналами.

Андрей Колпаков

kai@megachip.ru

Современный IPM — это гибридный модуль, содержащий скоростные IGBT-транзисторы, соединенные в определенной конфигурации, схему управления, оптимизированную по характеристикам управления затвора для данных транзисторов, схему защиты от перегрузок и схему индикации состояния. Для надежной работы модуля схема защиты должна уметь анализировать режим перегрузки по току (overload), режим короткого замыкания нагрузки (SC — short circuit), режим пробоя (breakdown), а также падение напряжения управления (UVLO — Under Voltage LockOut) и перегрев (overheat).

Стоимость IPM во всех случаях оказывается выше, чем стоимость набора дискретных комплектующих, способных решить ту же задачу. Однако повышение надежности, упрощение процесса сборки, снижение весо-габаритных показателей несомненно

стоят того, чтобы использовать в своей разработке именно интеллектуальный силовой модуль.

## Мощностные характеристики выпускаемых модулей

В табл. 1 приведены данные о предельных характеристиках транзисторов, модулей и интеллектуальных модулей, выпускаемых ведущими мировыми производителями. Таблица дает возможность увидеть колоссальный прогресс, достигнутый за последние годы в технологии производства IGBT.

В табл. 2 представлены некоторые типы IPM различных производителей для преобразователей стандартного ряда мощности, данного в 1 столбце. Предельное напряжение большинства выпускаемых интеллектуальных силовых модулей составляет 1200 или 1700 В, что является оптимальным

Таблица 1. Предельные характеристики модулей IGBT различных производителей

Производитель	Предельный ток I <sub>c</sub> , А при напряжении U <sub>се</sub> , В					Предельный ток I <sub>c</sub> , А (U <sub>се</sub> = 1200/1700 В)	
	600	1200 / 1400	1700	2400	3300	6(7)-pack	IPM
ABB	—	300	225	1300	—	300	—
DYNEX SEMICONDUCTOR	500	2400	2400	—	1200	—	—
EUROCOMP / APT	100	55	—	—	—	—	—
Fairchild Semiconductor	300	100	60	—	—	100	50
Fuji Electric	300	800	—	—	—	100	—
Hitachi	600	600	1800	1200	1200	150	—
EUPEC	300	2400	300	500	500	150	—
International Rectifier / Omirel	500	400	—	—	—	—	—
Intersil / Harris	50	30	—	—	—	—	—
IXYS Semiconductor	90	670	30	—	—	85	—
Mitsubishi Electric	800	1000	—	—	—	100	800
SEMIKRON	1600	2800	2000	—	—	600	1200
STMicroelectronics	50	50	—	—	—	—	—
Toshiba	800	1000	1800	—	—	50	300

Таблица 2. Типы интеллектуальных силовых модулей IGBT на напряжении 1200/1700 В

Мощность, кВт	SEMIKRON	TOSHIBA	Mitsubishi
37		MIG150Q101H (HB) MIG150Q6C (6-pack)	PM150DSA120 (HB)
45		MIG200Q101H (HB) MIG200Q6C (6-pack)	PM200DSA120 (HB) PM200DVA120 (HB)
55	132GD120-318CTV (6-pack)		PM300DSA120 (HB) PM300DVA120 (HB)
90	232GD120-313CTV (6-pack)		PM400HSA120 (Single)
110	342GD120-314CTV (6-pack)		PM600HSA120 (Single)
132			PM800HSA120 (Single)
160	632GB120-315CTV (6-pack)		
220	792GB170-373CTV (6-pack)		
280	942GB120-317CTV (6-pack) 1213GB171-3DL (6-pack)		
375	1503GB171-3DL (6-pack)		

значением для безопасной работы от промышленной сети 380 В.

В таблицах приняты следующие обозначения:

**IPM** — интеллектуальный силовой модуль;

**HB** — полумост;

**Single** — одиночный модуль;

**6-pack** — полный трехфазный транзисторный мост и трехфазный выпрямитель;

**7-pack** — полный трехфазный транзисторный мост с тормозным транзистором и трехфазный выпрямитель;

**Ic** — ток коллектора;

**Vce** — напряжение коллектор-эмиттер.

**Конструкция IPM**

Интеллектуальные силовые модули (IPM) объединяют в одном устройстве силовой ключ (одиночный, полумостовой или 3-фазный мостовой), драйвер, оптимизированный по сигналам управления, и устройство защиты. Минимальные длины линий связи позволяют получить низкие значения распределенных индуктивностей, что уменьшает уровень переходных перенапряжений и уровень EMI. Хорошая тепловая связь элементов кристалла повышает надежность работы схемы защиты.

IPM представляют собой многослойную конструкцию с эпоксидной изоляцией (в мало мощных модулях) или керамической изоляцией (в модулях средней и большой мощности). Медные линии связи элементов модуля напыляются непосредственно на изолятор, что исключает пайку. Элементы схемы управления расположены на печатной плате, которая устанавливается непосредственно на силовой модуль. Эта плата также является многослойной и обычно имеет специальный экран для повышения стойкости к EMI. Один из вариантов конструкции IPM показан на рис. 1.

**Область безопасной работы и схема защиты IPM**

Область безопасной работы (ОБР или SOA — safe operating area) определяет допустимые сочетания токов и напряжений, при которых не нарушается безопасная работа модуля. Поэтому желательно, чтобы

схема защиты ограничивала режимы не по предельному току, а по параметрам области безопасной работы. IPM имеют встроенные цепи управления и защиты, что позволяет повысить надежность функционирования по сравнению с обычными модулями. Для IPM обычно задается 2 вида области безопасной работы — ОБР для режима

короткого замыкания (Short Circuit SOA — SC SOA) и ОБР для импульсного режима (Switching SOA — SSOA).

SSOA задает ограничения на ток и напряжение, одновременно действующие на модуль при выключении. В IPM, как правило, исключены многие недопустимые сочетания за счет алгоритма работы драйвера и настройки схемы защиты. Поэтому безопасным для IPM считается режим, когда напряжение питания не превышает определенного для модуля напряжения источника питания (VCC), а перенапряжение при выключении не превышает предельного значения напряжения коллектор-эмиттер (VCES).

При коротком замыкании в схеме с нулевым импедансом источника питания ток КЗ определяется только характеристиками силового ключа. SC SOA гарантирует безопасную работу в **однократном** режиме КЗ при напряжении питания ниже значения VCC, при перенапряжении в цепи коллектор-эмиттер каждого модуля, меньшем VCES, и температуре кристалла ниже 125 °С. Тер-

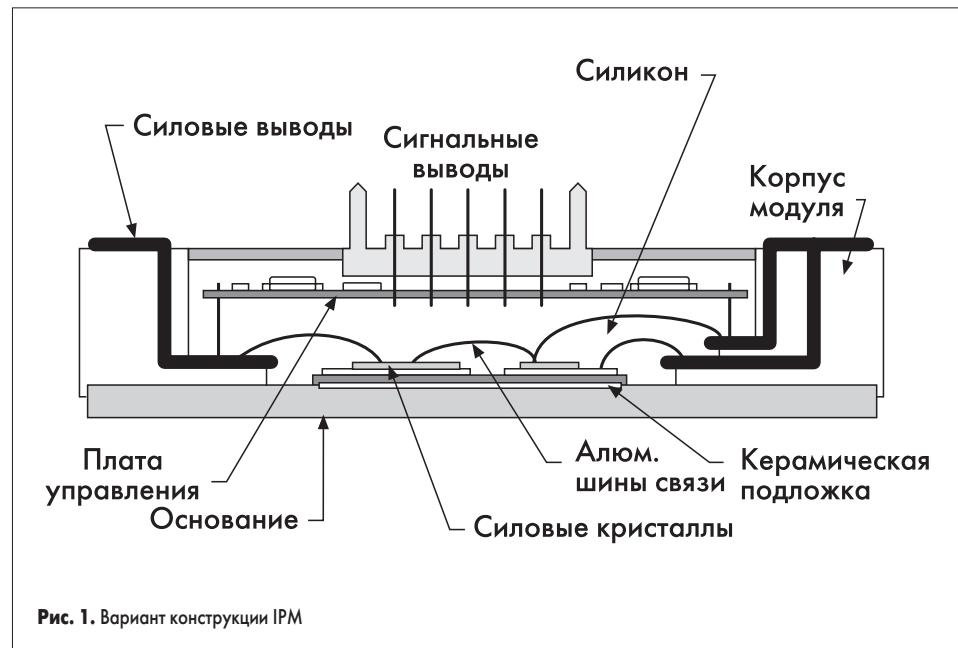


Рис. 1. Вариант конструкции IPM

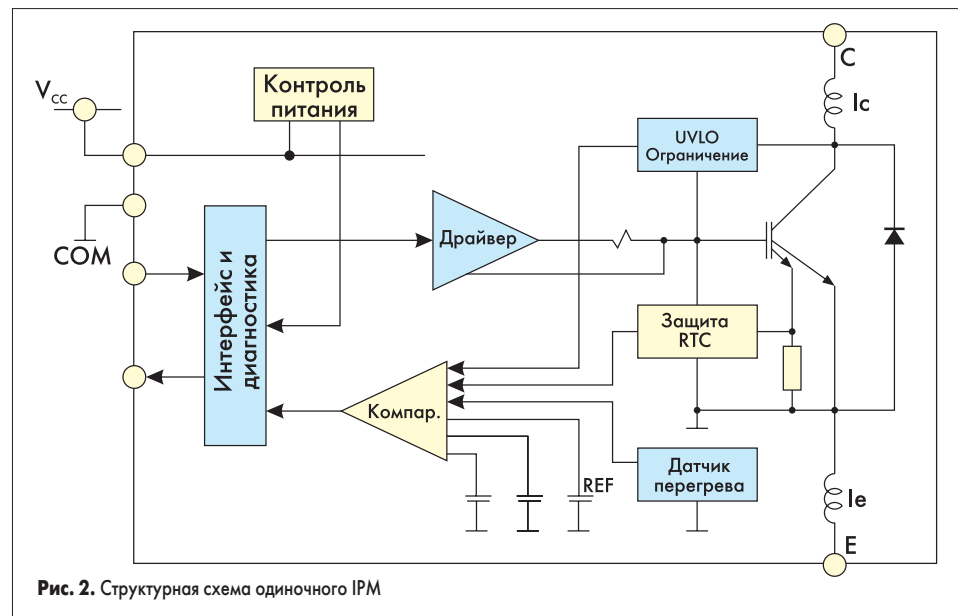


Рис. 2. Структурная схема одиночного IPM

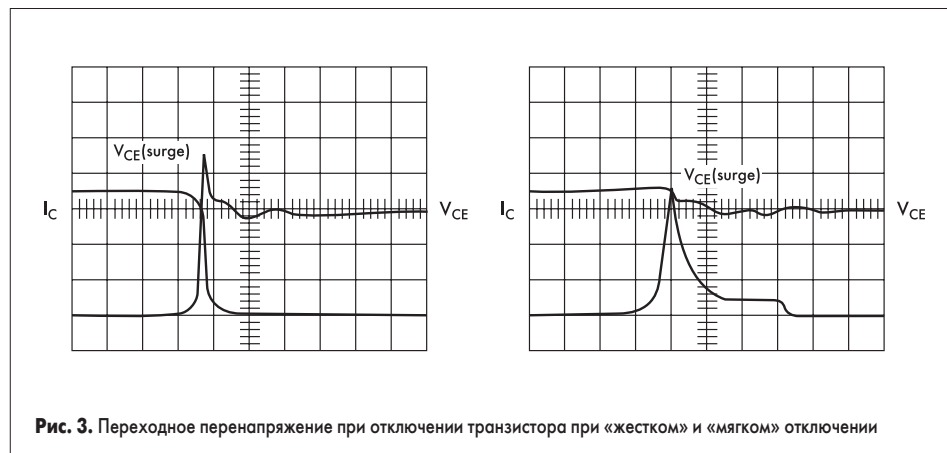


Рис. 3. Переходное перенапряжение при отключении транзистора при «жестком» и «мягком» отключении

мин «однократный режим КЗ» подразумевает, что количество коротких замыканий ограничено (оно приводится в технических характеристиках) и время между КЗ значительно больше тепловой постоянной времени кристалла.

Как и обычные IGBT-транзисторы, IPM не предназначены для работы в линейном режиме. Встроенный драйвер IPM исключает любую возможность линейного режима работы, отключая силовой транзистор при повышении напряжения насыщения выше допустимого уровня.

На рис. 2 приведена типовая структурная схема одиночного интеллектуального модуля. Схема защиты IPM определяет состояние перегрузки и короткого замыкания (защита RTC), превышения напряжения насыщения, падения напряжения питания (контроль питания и UVLO) и температуру кристалла (датчик перегрева). При отклонении от нормы любого из перечисленных параметров схема защиты отключает силовой транзистор и выдает сигнал неисправности. Модуль может также содержать встроенный супрессор (ограничение) для защиты от импульсных перенапряжений.

При перегреве модуля выше заданного значения датчик температуры, установленный на основании модуля, выдает сигнал неисправности. По этому сигналу схема управления отключает силовые транзисторы. В полумостовых и мостовых конфигурациях отключаются обычно транзисторы нижнего уровня. Повторное включение произойдет после охлаждения модуля до порога включения. Однако наличие тепловой защиты не может гарантировать, что мощный кристалл не выйдет из строя ни при каких условиях. Кристалл может перегреться до того, как разогреется основание модуля и термодатчик. Это может произойти, например, из-за сбоя контроллера и повышения частоты коммутации или из-за появления дребезга в цепи управления.

В IPM, как правило, используются IGBT со встроенным датчиком тока. Если ток коллектора модуля превышает предельное значение в течение определенного времени, модуль отключается. Наиболее «интеллектуальные» схемы управления различают два пороговых значения тока — ток перегрузки, начиная с которого начинается анализ неисправности и формируется контрольный сигнал, и ток КЗ, по которому происходит отключение.

После возникновения состояния перегрузки напряжение на затворе снижается, что приводит к уменьшению тока коллектора. Затем, если состояние перегрузки не прекращается, через 5–10 мкс напряжение на затворе снижается до нуля. При этом снижение напряжения на затворе производится по определенному закону. Такое «мягкое» отключение необходимо для уменьшения значения di/dt и снижения переходного перенапряжения при выключении. На рис. 3 показаны процессы, происходящие при мгновенном «жестком» и «мягком» отключении. Видно, что во втором случае уровень перенапряжения гораздо ниже.

В современных IPM используется непрерывный мониторинг тока каждого силового ключа и общего тока потребления. Это необходимо для определения всех видов токовых перегрузок, включая пробой на корпус.

Состояние КЗ наступает при замыкании нагрузки или сбое контроллера, когда открывающие сигналы поступают на оба плеча полумостового каскада, вызывая

сквозной ток. При этом измеряется непосредственно ток силового каскада, а не напряжение насыщения. Если ток коллектора достигает порогового значения ISC, процесс отключения начинается мгновенно. Однако снижение напряжения на затворе происходит в описанной выше последовательности для уменьшения уровня переходных перенапряжений. Для снижения времени задержки между моментом обнаружения состояния КЗ и моментом отключения в наиболее «продвинутой» IPM используется так называемая схема RTC — схема контроля тока в реальном времени (RTC — real time current control). Это устройство работает параллельно драйверу, «обходя» все стадии его работы в режиме КЗ и снижая время обработки сигнала до 100 нс. Эффект от использования схемы RTC показан на рис. 4. Снижение времени обработки сигнала токовой перегрузки уменьшает ток КЗ и, соответственно, уровень перенапряжения почти в 2 раза.

### Применение IPM

Применение IPM по сравнению с обычными модулями намного упрощает задачу разработчику. Как правило, для работы с IPM необходимы один или несколько гальванически изолированных источников питания (или один многоканальный источник) и гальванически изолированный интерфейс для связи с контроллером. Количество вторичных источников питания зависит от конфигурации модуля. Для мощных модулей наиболее рационально использовать отдельный источник для каждого силового ключа. Это позволяет устранить проблемы, связанные с шумами и помехами, создаваемыми мощными токами. Напряжение изоляции вторичного источника должно быть в 2 раза больше, чем предельное рабочее напряжение модуля, а ток должен быть достаточным для питания схемы управления с учетом токов заряда затворов и рабочей частоты. При использовании интеллектуальных силовых модулей бутстрепное питание не рекомендуется, так как пульсации напряжения на бутстрепной емкости могут приводить к сбою в работе схемы защиты.

При разработке изолированного источника питания или использовании готового необходимо обратить внимание на величину паразитной емкости между изолированными частями источника. Емкость более 100 пФ может привести к шумам и сбою в работе драйвера.

Параллельно выводам питания схемы управления должен быть установлен электролитический или танталовый конденсатор. Конденсатор необходим для фильтрации синфазных помех и обеспечения высоких пиковых токов заряда затвора.

Гальваническая развязка сигналов управления IPM может осуществляться с помощью оптопар, импульсных трансформаторов или волоконно-оптических линий связи. В любом случае, большое значение

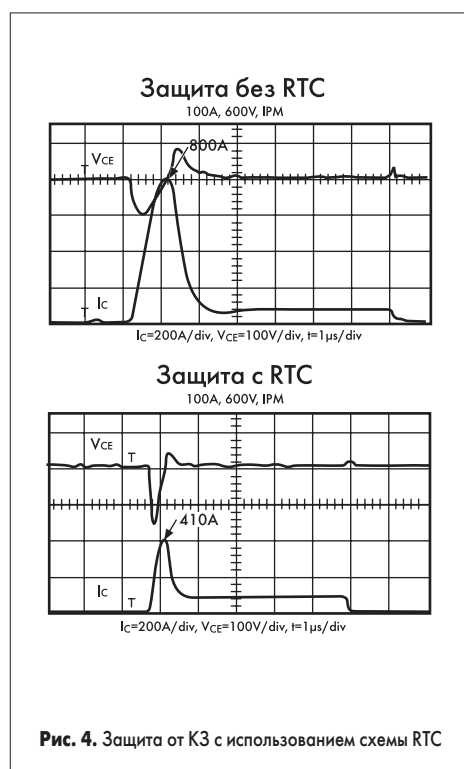


Рис. 4. Защита от КЗ с использованием схемы RTC

имеет топология платы. Плата должна быть разведена так, чтобы были минимизированы паразитные емкости между изолированными цепями управляющего сигнала, цепями источников питания, управляющими сигналами каналов. Ниже приведены указания, которыми следует руководствоваться при разработке печатной платы для IPM.

1. Изолируйте гальванически управляющие и контрольные сигналы. Используйте быстродействующие оптопары с высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала (CMR). Рекомендуемые параметры: время переключения — не более 0,8 мкс, CMR — более 10 кВ/мкс. Рекомендуемые микросхемы: HCPL4503, HCPL4504, PS2041.
2. Минимизируйте паразитные емкости, используя разнесение проводников или разные слои печатной платы.
3. Используйте изолированные источники питания драйверов каждого силового плеча.
4. Используйте линии связи схемы управления с IPM минимальной длины.
5. Применяйте экранирование. В качестве экрана может быть использован один из слоев платы (см. рис. 5).
6. Заземляйте неиспользуемые входы.

На рис. 6 показана примерная структура схемы с использованием полумостовых IPM, а на рис. 7 — рекомендуемая топология размещения компонентов инвертора. Использование интеллектуальных силовых модулей, несомненно, упрощает процесс разработки и повышает надежность готового изделия. Главное препятствие на пути применения IPM — их цена, которая может в несколько раз превысить суммарную стоимость дискретных комплектующих элементов, решающих ту же задачу.

**Литература**

1. Main applications for power modules. Mitsubishi Application Notes.
2. Using IGBT modules. Mitsubishi Application Notes.
3. Using hybrid gate drivers and gate drive power supplies. Mitsubishi Application Notes.
4. General considerations for IGBT and intelligent power modules. Mitsubishi Application Notes.
5. Using intelligent power modules. Mitsubishi Application Notes.

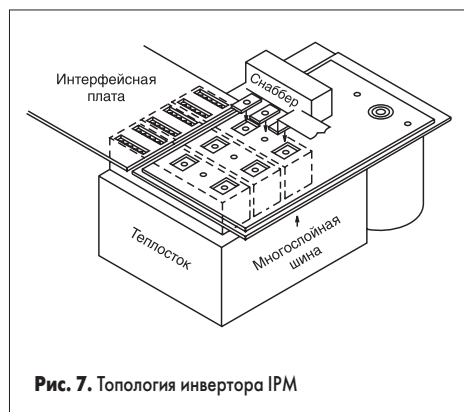


Рис. 7. Топология инвертора IPM

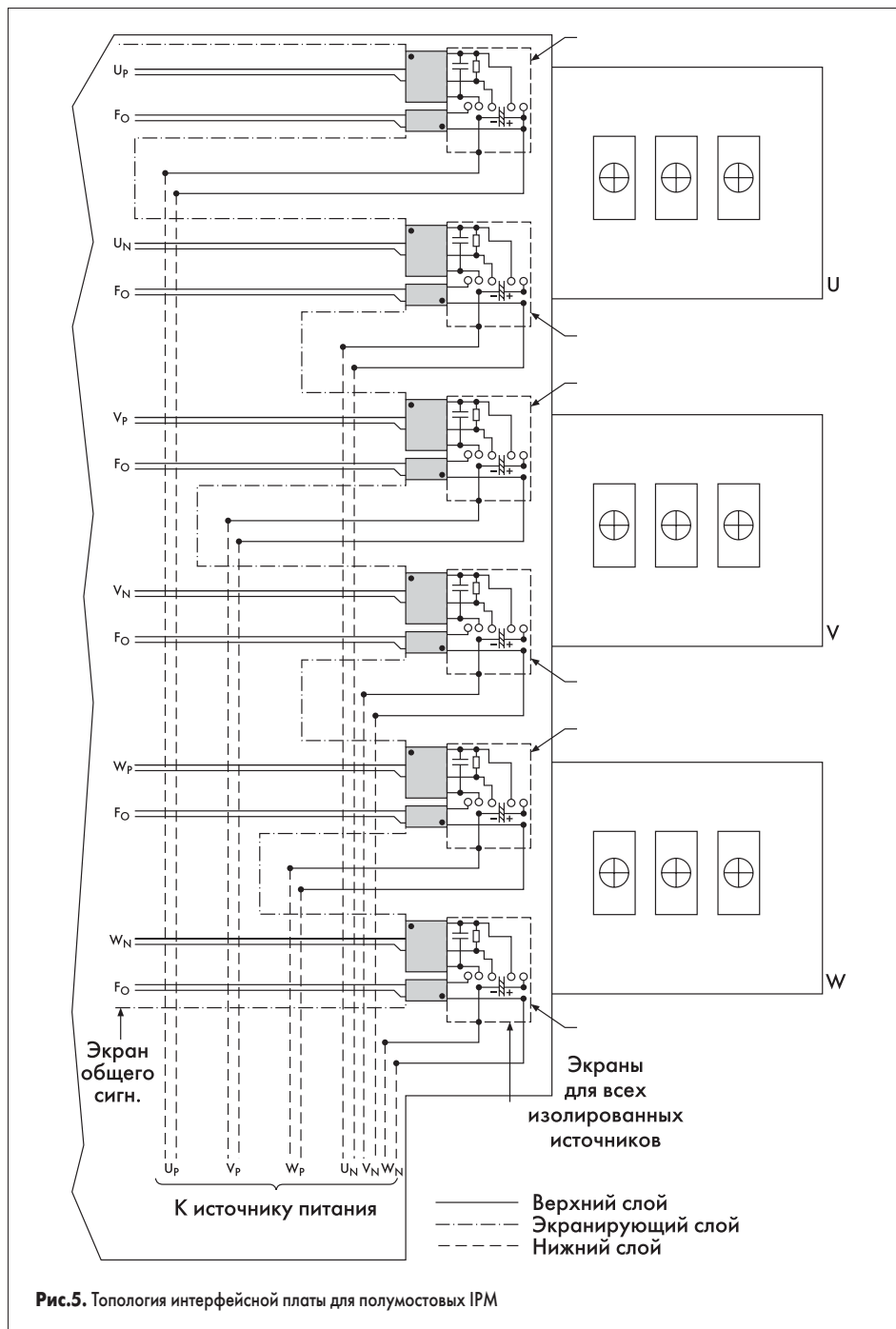


Рис.5. Топология интерфейсной платы для полумостовых IPM

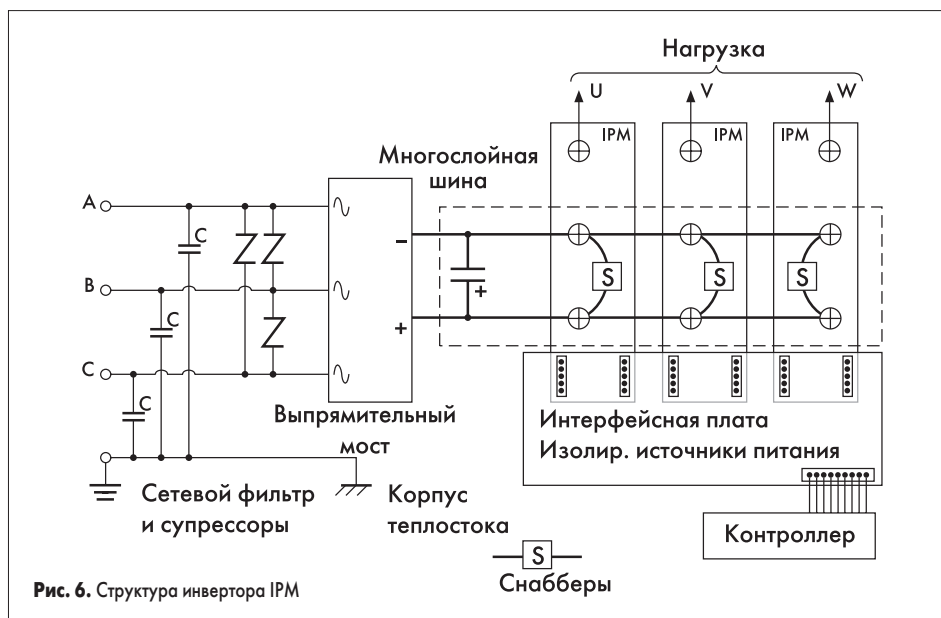


Рис. 6. Структура инвертора IPM