

УДК 621.314

Некоторые тенденции в развитии приборов и устройств силовой электроники

Г. В. ГРАБОВЕЦКИЙ¹, С. А. ХАРИТОНОВ¹, Е. Б. ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ¹, Ф. А. КУЗНЕЦОВ², М. Ф. РЕЗНИЧЕНКО², В. П. ПОПОВ³, Ю. И. КРАСНИКОВ³, В. М. БЕРЕСТОВ⁴

¹Новосибирский государственный технический университет, проспект К. Маркса, 20, Новосибирск 630092 (Россия)

²Институт неорганической химии Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск 630090 (Россия)

³Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН, проспект Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск 630090 (Россия)

⁴ЗАО «ЭРАСИБ», проспект К. Маркса, 3, Новосибирск 63087 (Россия)

E-mail: phys@che.nsk.su

Аннотация

На основании анализа мировых тенденций динамики развития и современного состояния приборов и устройств силовой электроники приводится сравнение параметров приборов, оцениваются перспективы и тенденции применения различных типов приборов в устройствах и системах силовой электроники. Определены области применения как систем, так и входящих в них приборов. Представлены перспективные структуры и схемотехнические решения устройств силовой электроники, которые учитывают свойства применяемых приборов и специфику возможных потребителей электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Силовая электроника служит основной для создания современной техники и технологии, обеспечивая многократное увеличение производительности и качества труда при минимальном расходе различных ресурсов. Современная силовая электроника позволяет делать машины и оборудование высоконадежными, многофункциональными и эргономичными. Широкомасштабное использование систем силовой электроники в различных сферах человеческой деятельности, в частности, позволяет экономить значительную часть энергетических ресурсов.

По мнению ведущих экспертов в области прогнозирования мировых тенденций развития техники, очередной виток научно-технической революции будет обусловлен успехами в интеллектуальной силовой электронике. Это объясняется тем, что сегодня в мире 60–70 % генерируемой электрической энергии

потребляется при параметрах, отличающихся от параметров вырабатываемой.

ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Прогресс в современной силовой электронике обусловлен появлением мощных, практически идеальных ключей на базе транзисторов (MOSFET, IGBT) и полностью управляемых тиристоров (GTO, IGCT, SGCT). Классификация типов современных мощных полупроводниковых приборов приведена на рис. 1. На рис. 2 показаны величины токов и напряжений, которые в настоящее время данные приборы могут коммутировать [1].

В области низких напряжений (200–1000 В) рынок уверенно завоевывают полевые транзисторы (MOSFET), модули и интеллектуальные силовые интегральные схемы на их основе, вытесняя биполярные транзисторы. Это в первую очередь связано с уменьшением стоимости приборов за счет улучшения техно-

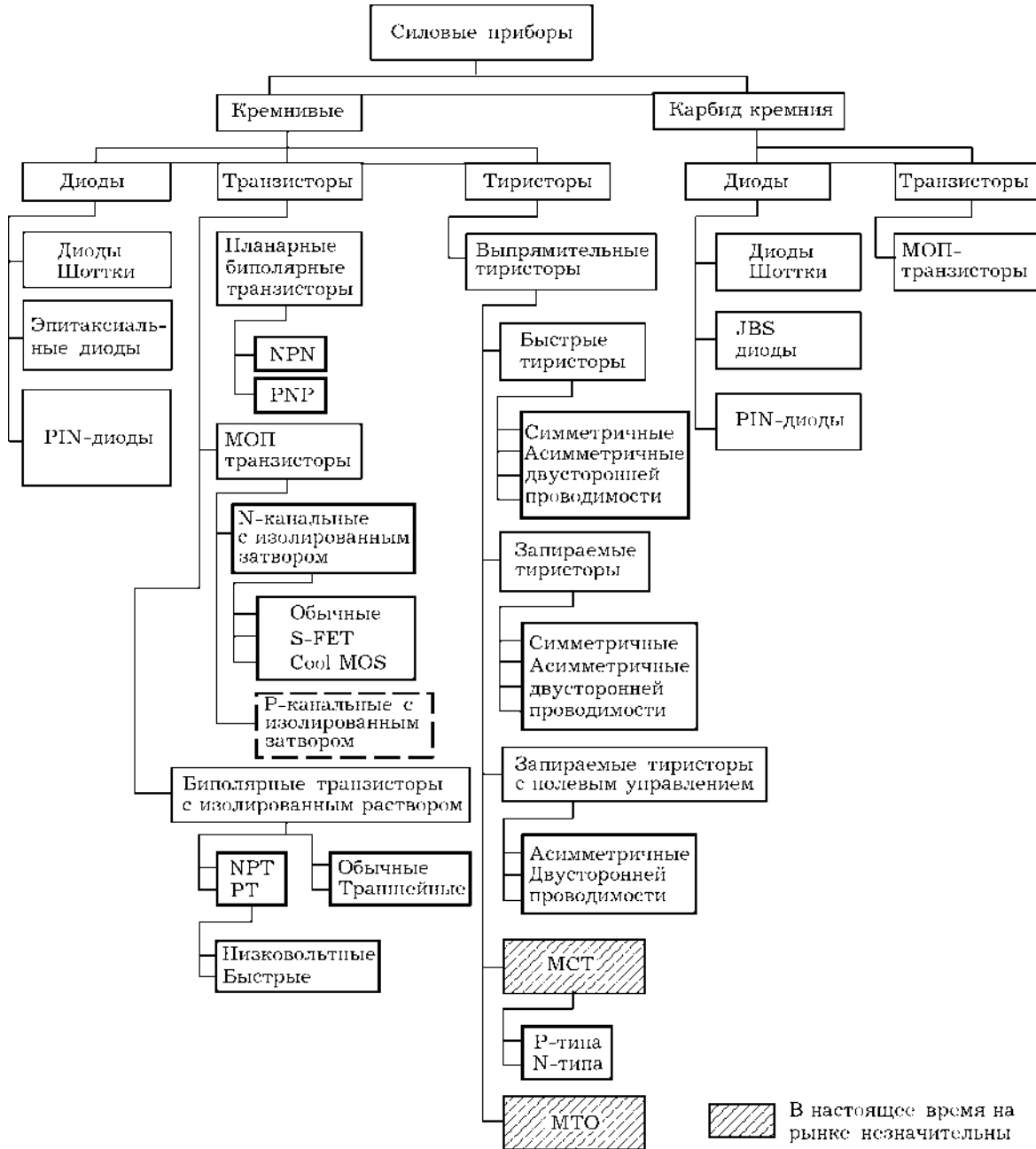


Рис. 1. Классификация приборов силовой электроники. логии изготовления (trench-gate, Cool MOS™), а также высоких эксплуатационных характеристик MOSFET: высокой скорости коммутации, низких статических и динамических потерь, малой мощности управления, высокой стойкости к перегрузкам. Предельные параметры силовых MOSFET удваиваются каждые два года, а ежегодный рост производства составляет 45–50 %. Прорыв, совершенный фирмой Siemens в области создания высоковольтных MOSFET с удельным сопротивлением около 3 Ом · мм² (MOSFET 600 В с R_{DC(ON)} = 70 мОм

в корпусе TO-218), существенно расширит область применения приборов этого класса в областях коммутируемых напряжений 600–1000 В и мощностей до 10 кВт. Область применения MOSFET – преобразователи частоты и напряжения мощностью до 10 кВт с частотами преобразования до единиц мегагерц. Как правило, это ВИП различного назначения, бесперебойные источники электропитания, электронные балласты современных источников света, автомобильная электроника (электрические усилители

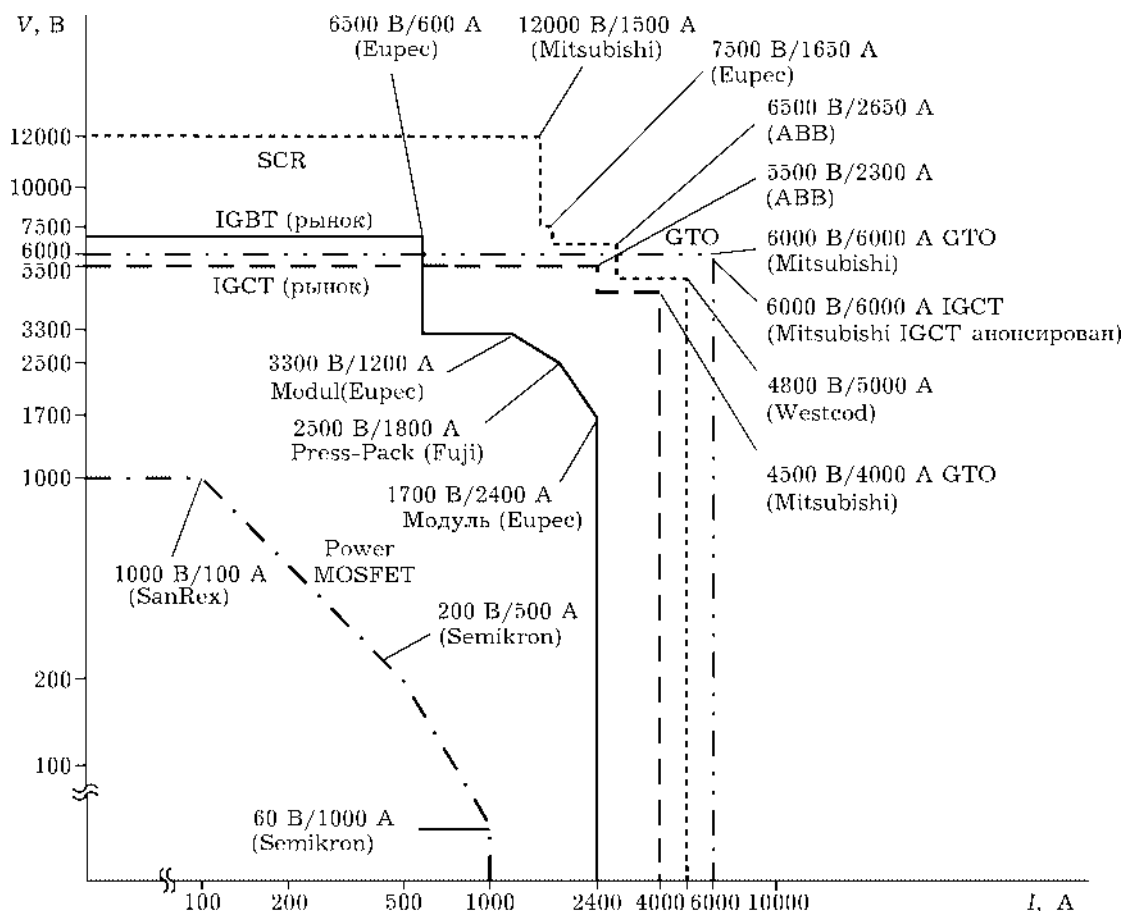


Рис. 2. Коммутируемые токи и напряжения.

тели руля, стартер-генераторные устройства и др.).

Структурная схема наиболее распространенных вторичных источников электропитания представлена на рис. 3. Современные ВИП, как правило, содержат корректор входного коэффициента мощности, преобразование осуществляется на высокой частоте, выпрямители на стороне низкого напряжения выполняются с использованием диодов Шоттки, а управление осуществляется с помощью специализированных ШИМ-контроллеров.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) впервые появились на рынке в 1985 г. и начали быстро его завоевывать. Удачное сочетание свойств MOSFET (малая мощность управления, высокая скорость коммутации, прямоугольная область безопасной работы, способность работать параллельно без выравнивающих элементов, малое падение напряжения в открытом состоянии, высокое предельное напряжение) сделало IGBT

практически идеальным силовым ключом. Параметры IGBT постоянно улучшаются производителями (прямое падение напряжения с 4 В у I поколения IGBT уменьшилось в настоящее время до 1.2 В у IV поколения, аналогично предельная частота переключений увеличилась с 5 до 150 кГц и более), а предельные характеристики IGBT-модулей утраиваются каждые два года. В настоящее время на фирме Fuji Electric Co. достигнуты параметры 2000 А, 4.5 кВ в IGBT-модуле прижимной (press-pack) конструкции, а Infineon Technologies совместно с EUPEC в августе 2000 г. сообщили об успешных испытаниях модулей IGBT на напряжение 6.5 кВ.

Объем продаж IGBT-модулей постоянно увеличивается (до 25 % в год) и уже превзошел 1 млрд \$ США, что в несколько раз превышает объем продаж тиристоров.

Область применения IGBT-модулей – самая обширная. Использование их в наиболее распространенных схемах инверторов напря-

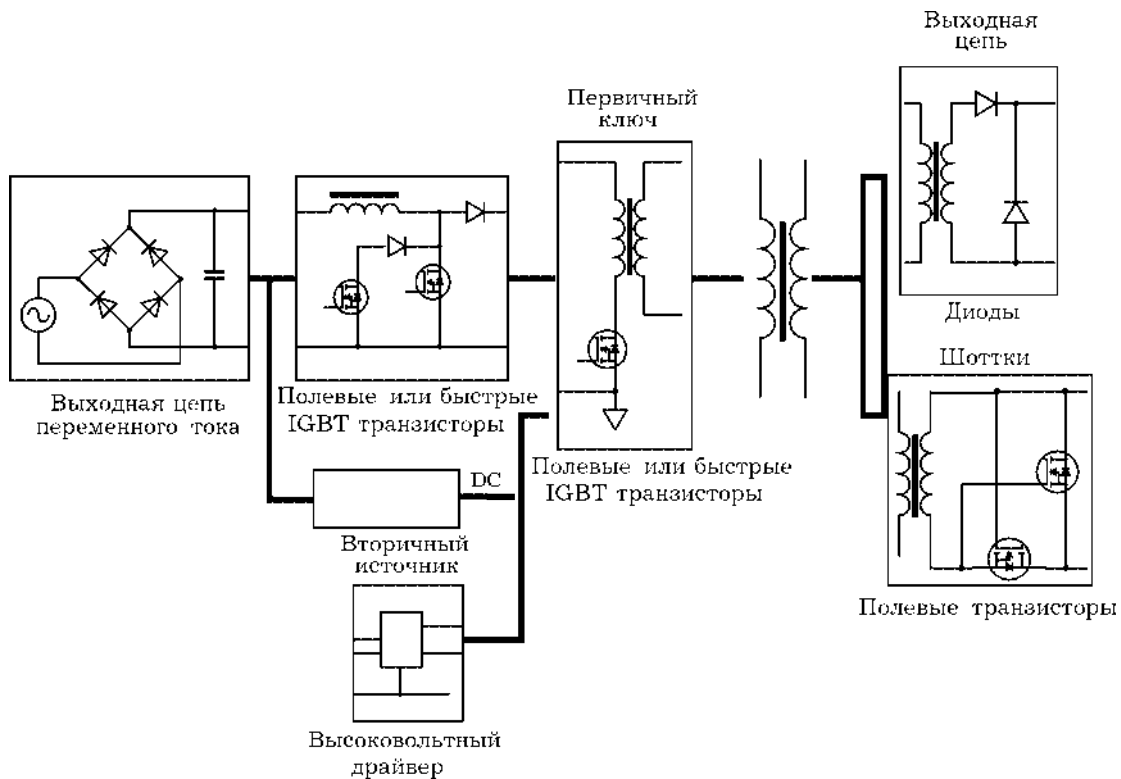


Рис. 3. Структурная схема ВИП.

жения (рис. 4), включая многоуровневые, (рис. 5), а также в матричных преобразователях позволяет перекрыть диапазон мощностей от единиц до тысяч киловатт. Данные преобразователи используются в электроприводах различного назначения (рис. 6), включая высоковольтные (как с трансформаторами, так и без них), в мощных системах генерирования электрической энергии переменного и постоянного тока, в бесперебойных источниках электропитания, в мощных преобразователях комбинированных автомобилей, а также в электротехнологиях (различные виды сварочного оборудования) и ионно-плазменных технологиях.

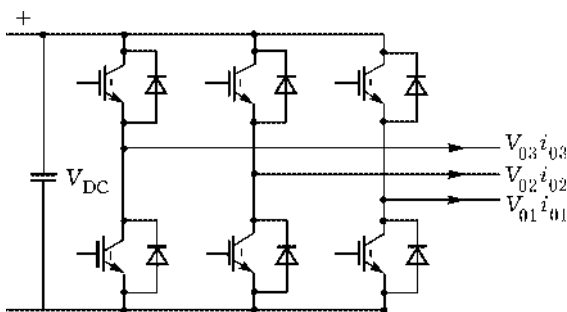


Рис. 4. Инвертор напряжения.

Из-за присущих GTO недостатков – высокого (до 4 В) прямого падения напряжения, сложности схем управления, необходимости применения громоздких снабберов, высоких динамических потерь – они не нашли широкого применения. Однако модернизация GTO за счет применения новых технологий и объединения в одном устройстве со схемой управления позволила новому типу запираемых тиристоров – IGCT – значительно повысить быстродействие, сократить статические и динамические потери, обеспечив работу без снаббера при напряжениях до 4.5 кВ и токов в диапазоне 1–10 кА. По многим важным параметрам – статическим и динамическим потерям, надежности, устойчивости к термостратированию, предельным характеристикам, соотношению коммутируемая мощность/цена, возможности последовательного включения без выравнивающих цепей – IGCT превосходят IGBT-модули. Еще одним важным преимуществом IGCT в сравнении с IGBT является возможность блокировать обратное напряжение, что особенно важно при использовании в мощных высоковольтных инверторах тока. Поэтому в высоковольтных (более

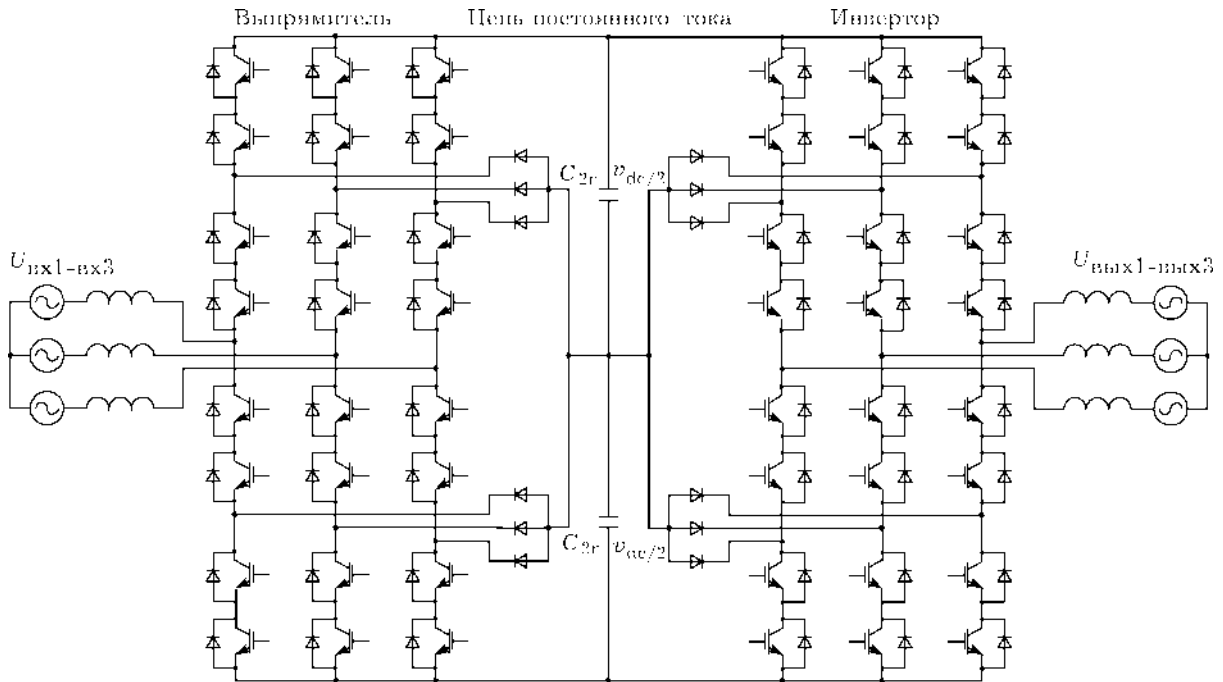


Рис. 5. Многоуровневый инвертор напряжения.

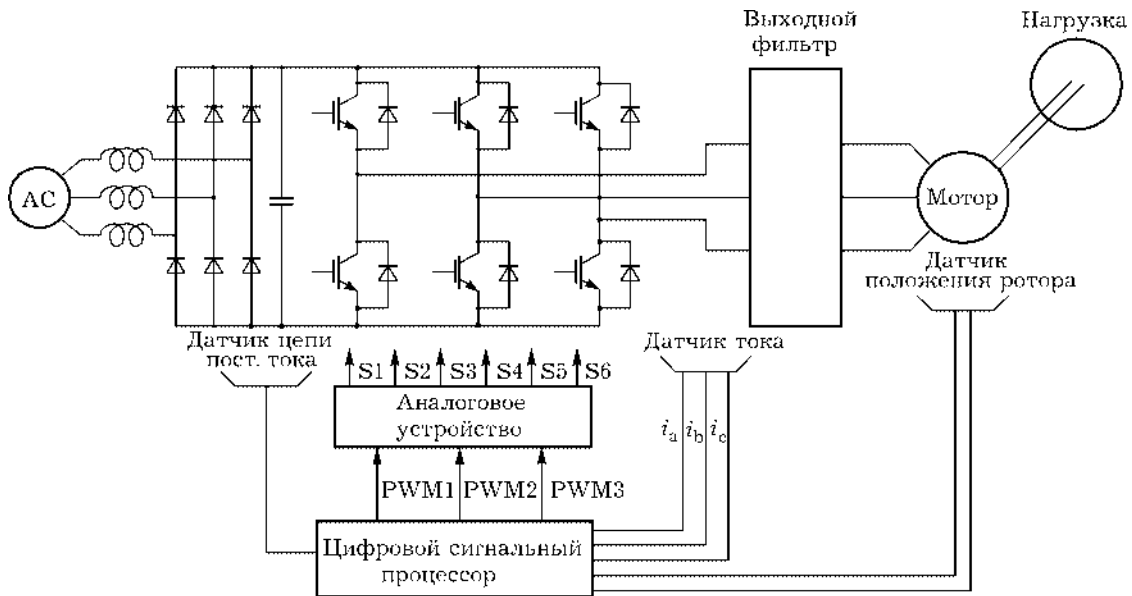


Рис. 6. Электропривод переменного тока.

3.5 кВ) областях применения доминирующее положение займут, по-видимому, IGCT. В развитии последних в ближайшие пять лет намечаются следующие этапы: беснаберное использование, повышение параметров du/dt и di/dt , расширение диапазона коммутируемых напряжений до 6 кВ и далее до 9 кВ, изготовление приборов с жидкостным охлаждением, применение пластмассовых корпу-

сов, изготовление модулей с изолированным основанием.

Основной областью применения запираемых IGCT- и SGCT-тиристоров являются мощные (единицы МВт) высоковольтные инверторы напряжения и тока для электроприводов, применяемых в энергетике, металлургии и железнодорожном электротранспорте (рис. 7).

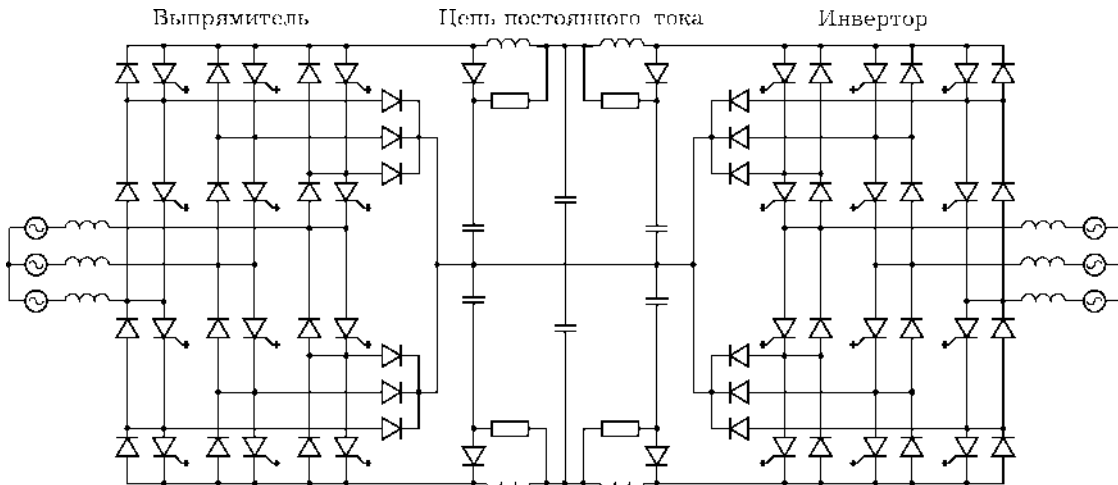


Рис. 7. Высоковольтный преобразователь частоты для мощного электропривода.

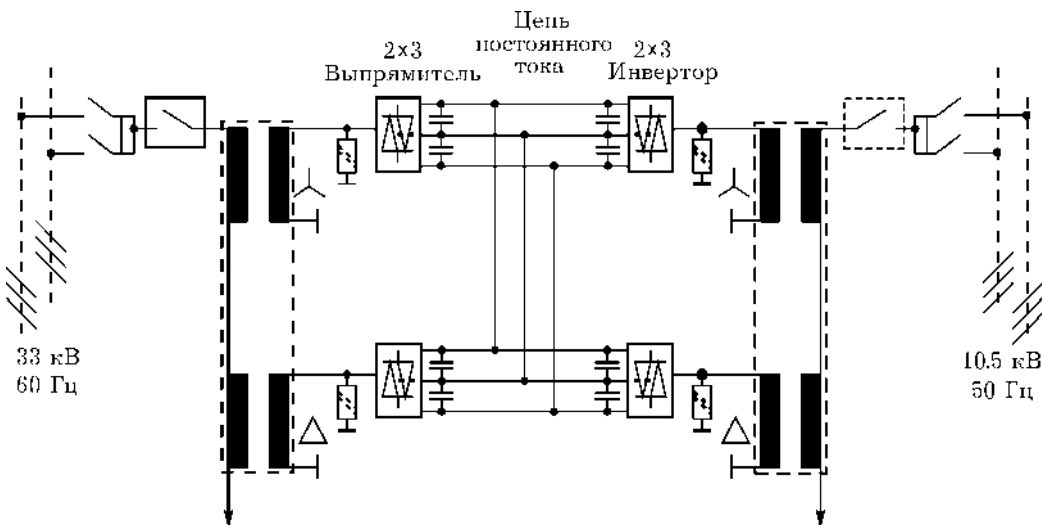


Рис. 8. Вставка постоянного тока.

“Классические” тиристоры (SCR), несмотря на постоянно сужающуюся область их применения, по-прежнему имеют самое высокое значение показателя коммутируемая мощность/цена. По этой причине их применение предпочтительнее в тех областях, где цена является определяющим фактором, а также в качестве сверхмощных и сверхсильноточных преобразователей с естественной коммутацией (энергетика, электротехнологии) (рис. 8). Так, рынок триаков в 1996 г. составил 575 млн \$ США, причем в комбинации микроконтроллер – триак (пусковые устройства, системы автоматики) в настоящее время имеет тенденции значительного роста.

В немалой степени широкому применению систем и устройств силовой электроники способствовал выпуск стандартных твердотельных драйверов, что существенно унифицировало схемотехнические решения и привело к снижению стоимости как разработок, так и серийно выпускаемых устройств.

В табл. 1 приводятся основные области применения наиболее широко распространенных приборов силовой электроники.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Определяющим направлением развития приборов и, как следствие, систем силовой

ТАБЛИЦА 1

Области применения приборов силовой электроники

Область применения	Модули IGBT	Интеллектуальные силовые модули	Транзисторные модули	Модули MOSFET	Мощные MOSFET	IGBT	Триаки	GCT/GTO тиристоры	Тиристоры	Высоковольтные IGBT
Промышленная электроника										
Линии электропередачи	-	-	-	-	-	-	-	×	×	×
Производство стали	-	-	-	-	-	-	-	×	×	×
Электропоезда	×	×	×	-	-	-	-	×	×	×
Автомобили	×	×	×	×	×	-	-	-	-	-
Системы бесперебойного питания	×	×	×	×	×	×	-	-	×	-
Электропривод	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Сварочные аппараты	×	×	×	-	-	-	-	-	×	-
Мощные переключатели	-	-	-	-	×	×	×	-	-	-
Бытовая электроника										
Кондиционеры воздуха	×	×	×	-	-	-	×	-	-	-
Микроволновые печи	-	-	-	-	-	×	×	-	-	-
Холодильники	-	×	-	-	×	-	×	-	-	-
Теле- и фотокамеры	-	-	-	-	-	×	-	-	×	-
Стиральные машины	×	×	-	-	-	-	×	-	-	-
Индукционные электропечи	×	-	×	-	-	×	-	-	-	-
Музыкальные центры	-	-	-	-	×	-	-	-	-	-

электроники является системная интеграция [2, 3]. Низкий уровень потерь и малая мощность управления MOSFET и IGBT позволили реализовать идею создания силовых интегральных схем, в которых на одном кристалле технологическими приемами изготавливаются силовые ключевые элементы, схемы их запуска и защиты, устройства управления, регулирования и диагностики. Рынок интеллектуальных силовых интегральных схем (Smart Power IC), оцениваемый в 1996 г. в ~3 млрд \$ США, динамично развивается, объемы продаж растут ежегодно на 30–35 %. Интеллектуальные модули находят применение в электроприводах малой мощности и

других устройствах, где определяющими характеристиками являются массогабаритные показатели и надежность. По мере снижения цены и повышения единичной мощности модулей они найдут применение в преобразовательных устройствах от десятков ватт до единиц киловатт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 S. Bernet, Recent Developments of High Power Converters for Industry and Traction Applications. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, No. 6, November 2000, p. 1102.
- 2 С. Н. Флоренцев, *Электротехника*, 4 (2000) 2.
- 3 С. Н. Флоренцев, Там же, 4 (1999) 2