

# Судовой полупроводниковый преобразователь нового поколения

## на базе силовых модулей SKiiP

Андрей Григорьев, к. т. н.

A.Grigorev@reph.ru

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Юрий Кулагин

Y.Kulagin@reph.ru

Роман Митрофанов

R.Mitrofanov@reph.ru

Полупроводниковый преобразователь частоты (ППЧ) служит для регулирования или стабилизации параметров электроэнергии — напряжения и частоты. Областью применения преобразователя являются судовые системы электродвижения, подруливающие устройства, судовой электропривод, судовые валогенераторные установки.

Преобразователь нового поколения, описываемый в статье, проектировался и изготавливается ЗАО «РЭПХ» в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства. Работа выполняется в рамках реализации федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009–2016 гг., утвержденной постановлением Правительства РФ от 21 февраля 2008 г. № 103. Целью данной программы является развитие отечественного научно-технического и проектного потенциала и создание условий для выпуска конкурентоспособной гражданской морской техники.

Отличительной особенностью ППЧ от известных аналогов является универсальность, модульность исполнения, широкий диапазон мощностей, минимальные массогабаритные показатели, удобство обслуживания, высокие ремонтпригодность и надежность, минимальная себестоимость.

Преобразователь состоит из силовой схемы и микропроцессорной системы управления (МПСУ). Встроенная система самодиагностики позволяет выявлять отказы и предупреждает о недопустимых режимах работы оборудования. Принципиальная схема силовой части ППЧ приведена на рис. 1.

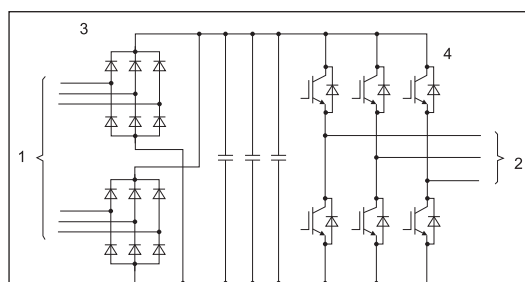


Рис. 1. Принципиальная схема ППЧ:

- 1 — входная сеть; 2 — выходная сеть;
- 3 — неуправляемый выпрямитель;
- 4 — автономный инвертор напряжения

В силовую часть ППЧ входят два неуправляемых выпрямителя, включенных последовательно или параллельно, звено постоянного тока, автономный инвертор напряжения. В качестве входного преобразователя в составе ППЧ может использоваться активный выпрямитель.

В основе конструкции силовой части преобразователя лежат интеллектуальные силовые модули SKiiP, разработанные компанией SEMIKRON. Одним из важнейших вопросов при разработке преобразователя для судового электропривода является обеспечение стойкости к термоциклированию. Основные требования к силовым ключам, работающим в составе судового электропривода, изложены в таблице 1.

Таблица 1. Основные требования к силовым модулям


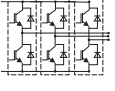

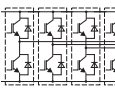
Условия эксплуатации	
Температура окружающей среды, °C	–40...+135
Температура охлаждающей жидкости, °C	–40...+105
Температура кристаллов, °C	–40...+175
Вибрация, м/с <sup>2</sup>	10×9,81
Удары, м/с <sup>2</sup>	50×9,81
Надежность	
Срок службы	15 лет
Стойкость к термоциклированию (импульсы мощности)	30 000 циклов при ΔT = 100 K
Стойкость к термоциклированию (изменение окружающей температуры)	1000 циклов при ΔT = 165 K

Работа стандартных модулей в составе судового гребного электропривода неизбежно ведет к сокращению их ресурса. Только специализированные компоненты, конструкция которых адаптирована для данного применения, могут обеспечить требуемые показатели надежности.

Высокая стойкость к термоциклированию компонентов семейства SKiiP получена благодаря отсутствию базовой платы и, соответственно, ее паяного соединения с DBC-подложкой. Дальнейшее улучшение показателей достигнуто за счет внедрения технологии спекания для установки кристаллов. В таблице 2 приведены схемы силового каскада и предельные характеристики двух типоразмеров модулей SKiiP, используемых в составе ППЧ.

В основе концепции SKiiP лежит принцип прижимного соединения изолирующей DBC-подложки, на которой установлены силовые чипы, с теплоотводом. При этом из состава модуля исключается мед-

**Таблица 2.** Номенклатура и предельные характеристики модулей SKiiP

Тип	Внешний вид	Схема силового каскада	1200 В	1700 В
3GB			1813GB123-3D	1813GB172-3D
			$I_{Cnom} = 1800 \text{ A}$	
4GB			2413GB123-4D	2413GB172-4D
			$I_{Cnom} = 2400 \text{ A}$	

**Таблица 3.** Сравнительные характеристики паяных и спеченных соединений

Характеристика	Спекание	Пайка
Температура образования соединения, °C	<250	200–380
Толщина слоя, мкм	15–20	70–150
Образование лакун	Нет	Возможно
Структура слоя	Однородная	Неоднородная
Температура плавления, °C	960	<380
Теплопроводность, Вт/(м·K)	240	70
Электропроводность, м/(Ω·мм <sup>2</sup> )	41	8
Коэффициент теплового расширения (КТР), м/К	$19 \times 10^{-6}$	$28 \times 10^{-6}$
Предел прочности на растяжение, МПа	55	30

ная базовая плата и, соответственно, паяный слой большой площади. Именно термомеханические напряжения, возникающие в этом слое при воздействии перепадов температуры, чаще всего приводят к отказам стандартных силовых ключей.

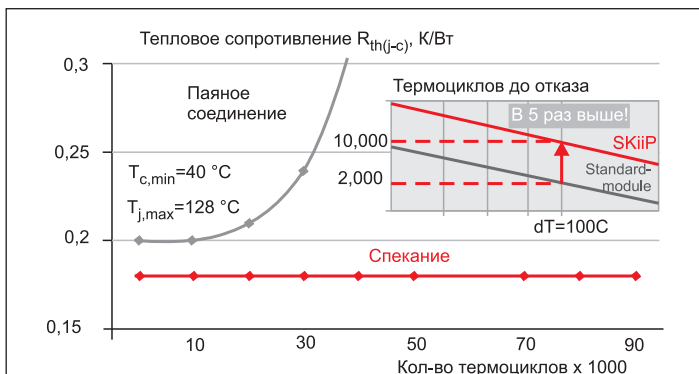
Использование «безбазовой» прижимной технологии сборки SKiiP позволяет более чем в 5 раз повысить стойкость к термоциклированию и существенно улучшить тепловые характеристики. В результате исключается возможность возникновения термомеханических стрессов при изменениях температуры и предотвращается развитие усталостных процессов в припое. Конструкция копланарной шины с многоточечным доступом к кристаллам была разработана и внедрена в модулях новой серии, ее внешний вид и топология DBC-подложки показаны на рис. 2.

Каждый из чипов IGBT и диодов подключается к DC-терминалам с помощью индивидуальных контактов, что позволяет обеспечить максимально равномерное распределение токов. Силовая шина SKiiP одновременно выполняет несколько важных функций, первой из которых является прижим керамической DBC-платы к те-

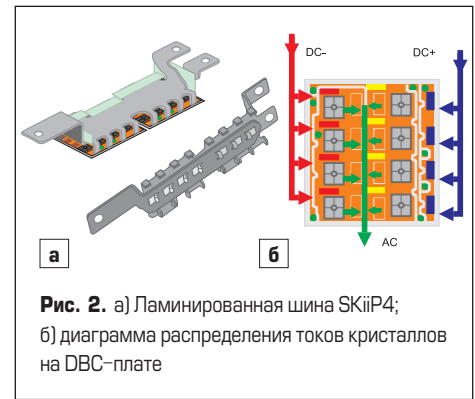
пловоду. Благодаря наличию большого количества контактов — точек давления, расположенных в зонах локального тепловыделения кристаллов, — обеспечивается гомогенная передача тепла на радиатор (рис. 3). Кроме того, многоточечная контактная система позволяет производить токовый обмен между терминалами и чипами по кратчайшему пути.

Копланарная конструкция шины гарантирует предельное низкое значение распределенного сопротивления и индуктивности, благодаря чему удается снизить уровень потерь внутри модуля и дисбаланс токов в параллельных цепях.

Второй причиной по интенсивности отказов является паяное соединение чипов и керамики, альтернативы которому до настоящего времени не было. Наиболее сильно эта связь подвержена воздействию «коротких» термоциклов — длительностью несколько секунд. Кроме того, температура плавления большинства используемых в силовой электронике припоев составляет +220 °C, что естественным образом ограничивает и температурный диапазон работы модулей. По этой причине перегрев чипов неизбежно ведет к сокращению срока службы (рис. 4).



**Рис. 4.** Дegradация паяного соединения чипа при термоциклировании



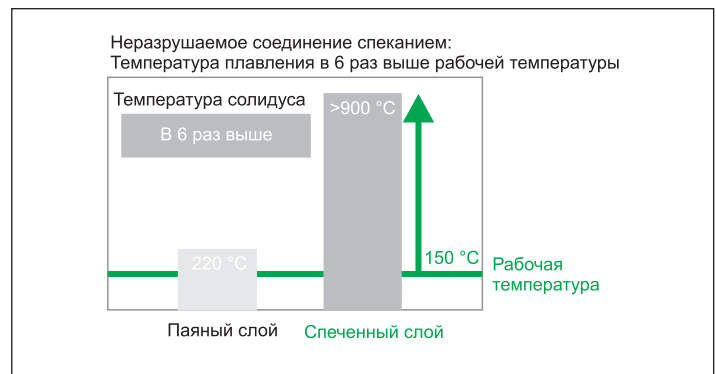
**Рис. 2.** а) Ламинированная шина SKiiP4; б) диаграмма распределения токов кристаллов на DBC-плате



**Рис. 3.** Расположение DBC-платы и силовых шин на радиаторе SKiiP4

Для установки кристаллов IGBT и диодов на DBC-плату применяется технология низкотемпературного спекания (технология SKiNTER), впервые в мире использованная SEMIKRON при производстве модулей SKiM 63/93. На первом этапе кристаллы позиционируются на слое серебряной нанопасты, напыляемой на керамическую подложку. Далее паста спекается при воздействии высокой температуры и давления, образуя сверхпрочное и эластичное серебряное соединение. Тонкий слой серебра имеет более низкое тепловое сопротивление, чем у припоя, а температура его плавления (+960 °C) во много раз превышает рабочую температуру чипов (табл. 3).

Спекание позволяет многократно повысить надежность соединения и его стойкость к термоциклированию, а также полностью исключить вероятность развития усталостных процессов. Температура плавления спеченного серебряного слоя в 6 раз выше рабочей температуры кремниевых чипов (рис. 5).



**Рис. 5.** Температура плавления спеченного серебряного слоя

Таблица 4. Основные технические характеристики ППЧ

Наименование параметра	Значение
Номинальная выходная мощность, кВт	1000
Максимальная длительно допустимая выходная мощность, кВт	1250
Диапазон регулирования выходного напряжения, В	0–690
Диапазон регулирования выходной частоты, Гц	0–100
Число фаз входного питания	две трехфазные системы со сдвигом на 30 эл. градусов
Номинальное действующее значение входного напряжения, В	690
Допустимые длительные отклонения входного напряжения	от –10 до +6%
Допустимые колебания входного напряжения	±20% в течение 1,5 с
Номинальная частота входного напряжения, Гц	50
Максимальный входной ток фазы, А	900
Максимальный ток в звене постоянного тока, А	1470
Максимальный выходной ток фазы, А	1310
Ударный ток короткого замыкания, кА	9
Допустимые колебания частоты	±10% в течение 5 с
Режим работы	продолжительный
КПД, не менее, %	98
Тип охлаждения	водяное
Габаритные размеры В×Ш×Г, мм	2200×1200×600
Масса, кг, не более	500

Кроме стандартной проверки электрических параметров, которую проходят 100% компонентов, надежность IPM SKiP может быть дополнительно подтверждена испытаниями в составе реальной инверторной схемы в условиях предельных нагрузок. В ходе 2 циклов испытаний продолжительностью 60–90 мин проводится проверка силовых ключей в составе преобразователя при полной нагрузке, предельной температуре и напряжении питания. Температура силовых кристаллов при этом достигает +140 °С, что обеспечивает максимальный термомеханический стресс для всей конструкции силового ключа. Основной целью теста является опре-

деление ключевых причин ранних отказов и их устранение.

ППЧ получает питание от трехобмоточного трансформатора с двумя вторичными обмотками, включенными по схеме «звезда-треугольник», что позволяет уменьшить вносимые искажения и повысить качество электроэнергии в судовой сети. Основные технические характеристики разработанного ППЧ приведены в таблице 4.

Выбор технических характеристик ППЧ обусловлен областью применения, параметрами силовой полупроводниковой техники последнего поколения, результатами проведенного технико-экономического и конструктивного анализа.

Для формирования мощностного ряда оптимальным решением является выделение силовой и слаботочной частей преобразователя в отдельные зоны: выпрямитель, звено постоянного тока, автономный инвертор напряжения, входной и выходной фильтры располагаются в силовой секции, а МПСУ и ее слаботочная периферия — в секции управления.

Такое конструктивное решение позволяет наилучшим образом обеспечить электромагнитную совместимость слаботочной и силовой части преобразователя. Кроме того, одна система управления в единой конструкции ППЧ может формировать управляющие сигналы для нескольких силовых секций, работающих на общий привод. Чертеж внешнего вида ППЧ представлен на рис. 6.

Охлаждение силовых блоков инвертора и выпрямителя осуществляется двухконтурной водяной системой охлаждения, поставляемой на судно комплектно с ППЧ. Места подключения магистралей подвода и отвода воды к ППЧ расположены в нижней части силовой секции. Сборочный чертеж ППЧ представлен на рис. 7.

Демонтаж и замена блоков инвертора и выпрямителя осуществляется за минимальное время, что обеспечено применением электрических и гидравлических разъемных соединений, а также конструктивным (выдвижным) исполнением крепления блоков силовой секции. Заложённые оптимальные конструктивные решения уменьшили массогабаритные показатели, позволили обеспечить свободный доступ к оборудованию при одностороннем обслуживании ППЧ.

Климатическое исполнение и категория размещения ППЧ — ОМЗ по ГОСТ 15150. ППЧ предназначен для работы при температуре окружающего воздуха от 0 до +45 °С, в условиях относительной влажности воздуха 75–95 %.

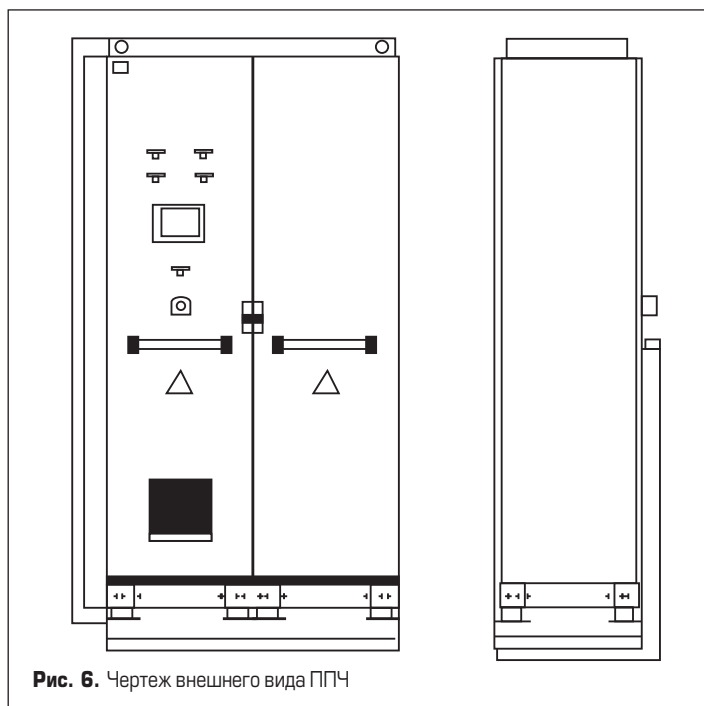


Рис. 6. Чертеж внешнего вида ППЧ

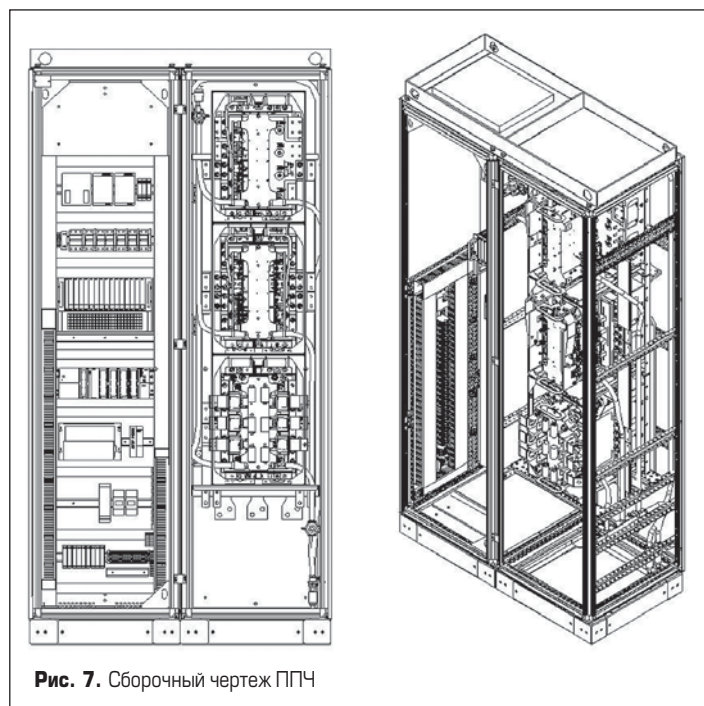
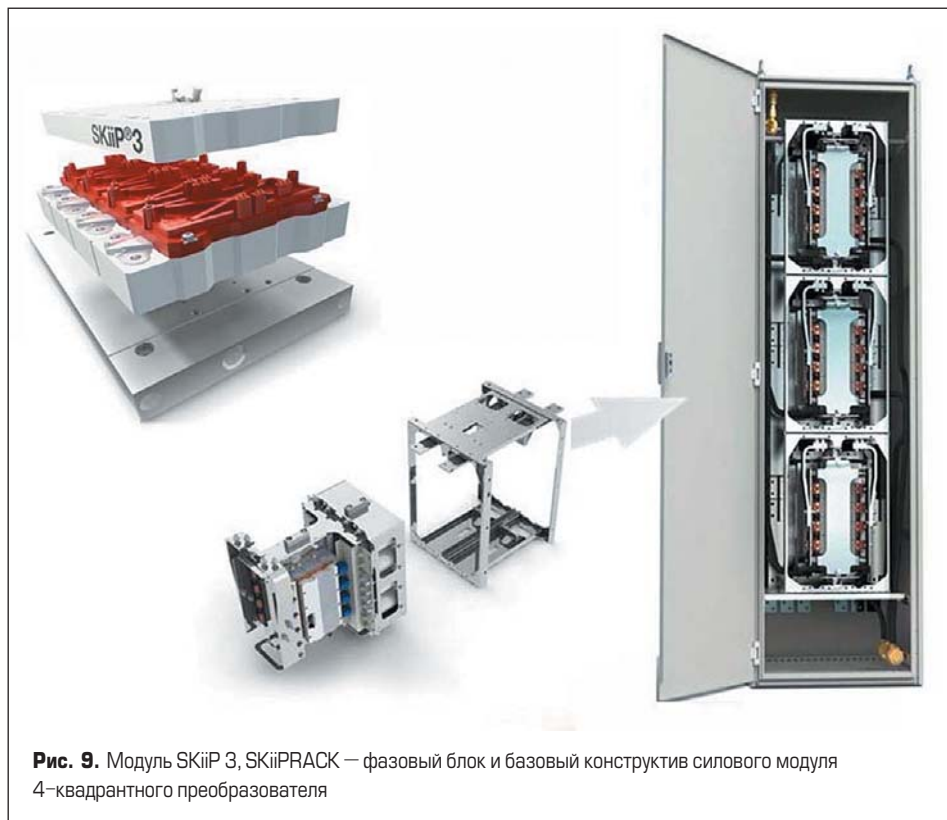
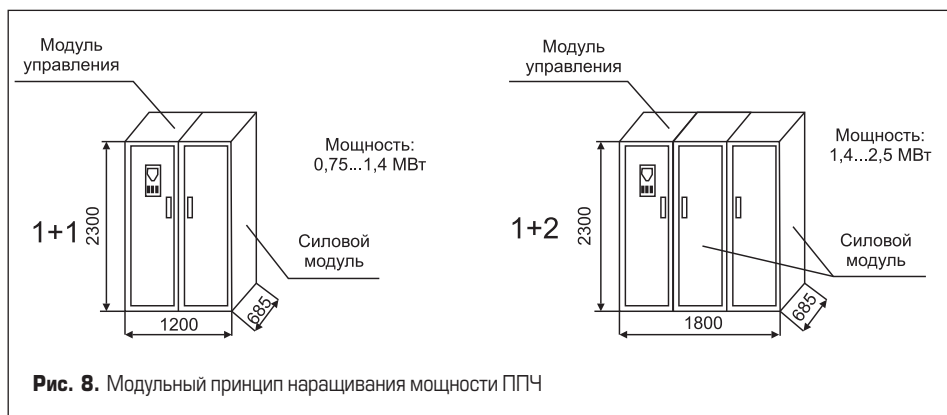


Рис. 7. Сборочный чертеж ППЧ



В ППЧ реализован принцип модульного наращивания мощности, что подразумевает возможность параллельной работы нескольких силовых секций. При этом все силовые модули управляются от одной секции управления. Варианты компоновки ППЧ приведены на рис. 8.

В составе преобразователя может быть использована 4-квадрантная инверторная платформа высокой мощности SKiiPRACK, предназначенная для построения преобразователей высокой мощности в энергетике и приводной технике (рис. 9).

Конвертор рассчитан на диапазон выходных мощностей 150 кВ·А–3 МВ·А при плотности мощности более 12 (кВ·А)/л. В настоящее время SKiiPRACK является самым компактным из выпускаемых изделий аналогичного назначения. Изделие может выпускаться в виде 3 МВ·А одиночного инвертора или 3-фазного 4Q-конвертора мощностью 2×1,5 МВ·А. Сборка устанавливается в стандартный силовой шкаф. Наращивание мощности до 2–3 МВ·А осуществляется путем параллельного соединения двух SKiiPRACK.

Модульный принцип конструкции фазных блоков позволяет соединять их в различных конфигурациях ППЧ в соответствии с областью применения. Каждый блок содержит один или два интеллектуальных силовых модуля IGBT SKiiP на радиаторе с жидкостным охлаждением, звено постоянного тока с низкоиндуктивной DC-шиной, снабберные конденсаторы. Все элементы установлены в раму, имеющую специальные направляющие, обеспечивающие быструю установку в шкаф, легкую замену и простоту обслуживания.

Разработанный ЗАО «РЭПХ» совместно с фирмой SEMIKRON опытный образец ППЧ морского исполнения превосходит мировые образцы по ряду технико-экономических показателей и планируется к использованию на судах отечественной постройки вместо аналогов импортного производства.