

Проблемы криогенного охлаждения полупроводниковых вентиляей статических преобразователей

ДУБЕНСКИЙ Г.А., МОДЕСТОВ К.А., КОВАН Ю.И., КОВАЛЕВ К.Л., ЛАРИОНОВ А.Е.

В России и за рубежом достигнут научно-технический прогресс в области разработки и создания электромеханических преобразователей на базе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. Удельная мощность таких электрических машин свыше 10 кВт/кг при охлаждении их жидким азотом. Статические преобразовательные устройства, работающие совместно с электромеханическими преобразователями, обладают удельной мощностью, не превышающей, как правило, 1 кВт/кг при принудительном охлаждении. Поэтому задача повышения удельной мощности как электромеханических, так и статических полупроводниковых электроэнергетических устройств подвижных объектов, особенно при их эксплуатации в аэрокосмической области, является весьма актуальной. В статье рассматриваются вопросы охлаждения полупроводниковых вентиляей статических преобразователей жидким азотом. Повышение эффективности охлаждения при этом приводит к значительному возрастанию коэффициента теплоотдачи и, как следствие, к снижению массы и габаритов радиаторов, а следовательно, и всего преобразователя. Расчёты по результатам эксперимента показали, что применение криогенного охлаждения позволяет примерно в 50–100 раз повысить значение относительной мощности преобразователя. Решен вопрос компоновки преобразовательного блока: помещение его в зону захлаживания жидким азотом является наиболее перспективным.

К л ю ч е в ы е с л о в а: статические преобразовательные устройства, электромеханические преобразователи, криогенное охлаждение, коэффициент теплоотдачи, удельная мощность преобразователя

Повышение мощности в единичном объёме остаётся актуальной задачей для разработчиков электротехнического и электроэнергетического оборудования, особенно для электромеханических и статических полупроводниковых электроэнергетических устройств подвижных объектов при их эксплуатации в аэрокосмической области.

В России и за рубежом достигнут прогресс в разработке и создании электромеханических преобразователей на базе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов [10–12]. Такие электрические машины обладают удельной мощностью свыше 10 кВт/кг при охлаждении их жидким азотом. Однако реализация таких предельных значений удельной мощности обеспечивается за счёт кратного увеличения плотности тока в обмотках машин. При этом надо отметить, что вопрос глубокого охлаждения применительно к преобразовательной технике рассмотрен в литературе недостаточно полно.

Разработаны полупроводниковые вентиляи, неуправляемые и управляемые, на весьма большие значения токов и напряжений. При этом габариты вентиляйного блока устройства определяются в основном размерами радиаторов. Таким образом, снижение потерь в вентиляях позволит не только повысить их токовую нагрузку, которая, как из-

вестно, определяется допустимой температурой полупроводникового кристалла, но и уменьшить габариты устройства за счёт снижения требуемой поверхности охлаждения, а следовательно, и габаритов радиатора. В статических преобразователях удельная мощность не превышает 1 кВт/кг при принудительном охлаждении [1]. Для решения задачи повышения КПД и удельной мощности статических преобразователей необходимо применение систем интенсивного охлаждения, а также пониженных (криогенных) значений температуры принудительного охлаждения.

Снижение потерь может быть достигнуто при неизменных условиях охлаждения, например путём параллельного включения большого числа транзисторов, что даёт пропорциональное уменьшение выходного сопротивления, а следовательно, и мощности потерь вентиляей. Как известно [2], площадь поверхности охлаждения S прямо пропорциональна рассеиваемой охладителем мощности:

$$S = P_{\text{п}} / \alpha \Delta T_{\text{р.д}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{п}}$ — мощность потерь; α — коэффициент теплоотдачи; $\Delta T_{\text{р.д}}$ — допустимое превышение температуры основания радиатора относительно окружающей среды.

Представляет также интерес вопрос улучшения условий охлаждения с целью повышения коэффициента теплоотдачи α , особенно при охлаждении низкотемпературными хладагентами – жидким азотом (77 К), неоном (27 К), водородом (20 К). В последние годы большое внимание уделяется разработкам, связанным с использованием в системах электроснабжения и электродвижения подвижных объектов (морских судов, наземных транспортных средств и полностью электрифицированных самолётов) электромеханических преобразователей на основе эффекта сверхпроводимости [3]. Предполагается, что летательный аппарат в обозримом будущем будет иметь на борту определённые запасы указанных хладагентов, что сделает целесообразным их использование и в области полупроводниковой техники.

За рубежом проводятся исследования полупроводниковых вентиляей, работающих в условиях криогенного охлаждения. В частности, в [4] приводятся характеристики силовых полупроводниковых диодов при охлаждении различными жидкими газами. Приведённые результаты показывают, что в условиях охлаждения жидким азотом пороговое напряжение U_0 возрастает в 1,5÷2 раза при одновременном снижении в 2,5÷3 раза дифференциального сопротивления R_d прямой ветви вольт-амперной характеристики. Так как основные потери в диоде от прямого тока определяются выражением [8]:

$$P_{\text{осн}} = U_0 I_{\text{ср}} + R_d k_{\text{ф}}^2 I_{\text{ср}}^2, \quad (2)$$

где $I_{\text{ср}}$ – среднее значение тока вентиля; $k_{\text{ф}}$ – коэффициент формы тока вентиля, то по результатам [4] можно полагать, что в условиях работы при криогенных температурах потери в вентилях могут изменяться незначительно либо несколько снижаться в зависимости от реальных значений R_d и $I_{\text{ср}}$.

Однако важно знать влияние криогенных хладагентов на коэффициент теплоотдачи, характеризующий условия охлаждения вентиля (см. соотношение (1)). Авторами проведён эксперимент, цель которого – определение электрических и тепловых параметров транзисторов, работающих в условиях криогенных температур. В качестве исследуемого был взят МОП транзистор типа IRFP90N20D [7].

В соответствии со схемой на рис. 1,а снималась выходная характеристика транзистора в режиме насыщения при комнатной температуре и при температуре жидкого азота, а также при отсутствии и наличии магнитного поля. Можно отметить, что влияние магнитного поля на выходную характеристику транзистора как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота практически отсутствует. С другой стороны, можно отметить

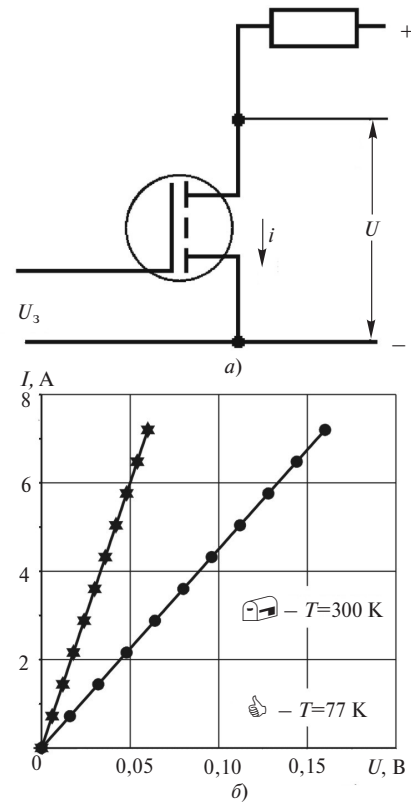


Рис. 1. Электрическая схема экспериментальной установки (а); выходные характеристики транзистора в режиме насыщения при комнатной температуре $T=300\text{ К}$ и при температуре жидкого азота $T=77\text{ К}$ (б)

значительное (почти в три раза) снижение падения напряжения на транзисторе при температуре жидкого азота, что ведёт к адекватному снижению мощности потерь от прямого тока (рис. 1,б).

Для исследования тепловых характеристик транзистор был размещён на охладителе, представляющем собой алюминиевую пластину. На поверхности корпуса транзистора и на охладителе были установлены датчики температур. Конструктивная схема размещения транзистора и фотографии экспериментальной установки представлены на рис. 2,а–г.

Тепловой поток от кристалла полупроводникового вентиля через тепловое сопротивление «кристалл–корпус» поступает на медное основание корпуса транзистора и далее через тепловое сопротивление «корпус–охладитель» на алюминиевую пластину. Два датчика температуры, установленные на корпусе транзистора и на внешней стороне алюминиевой пластины, позволяют определить распределение тепла по всему пути теплового потока – от полупроводникового кристалла до поверхности хладагента (жидкого азота). Использовались специальные датчики температуры типа DT-621-NR на основе кремниевых диодов.

Транзистор с охладителем помещен в пенопластовый бокс, наполняемый жидким азотом. Изменялись значения падения напряжения на транзи-

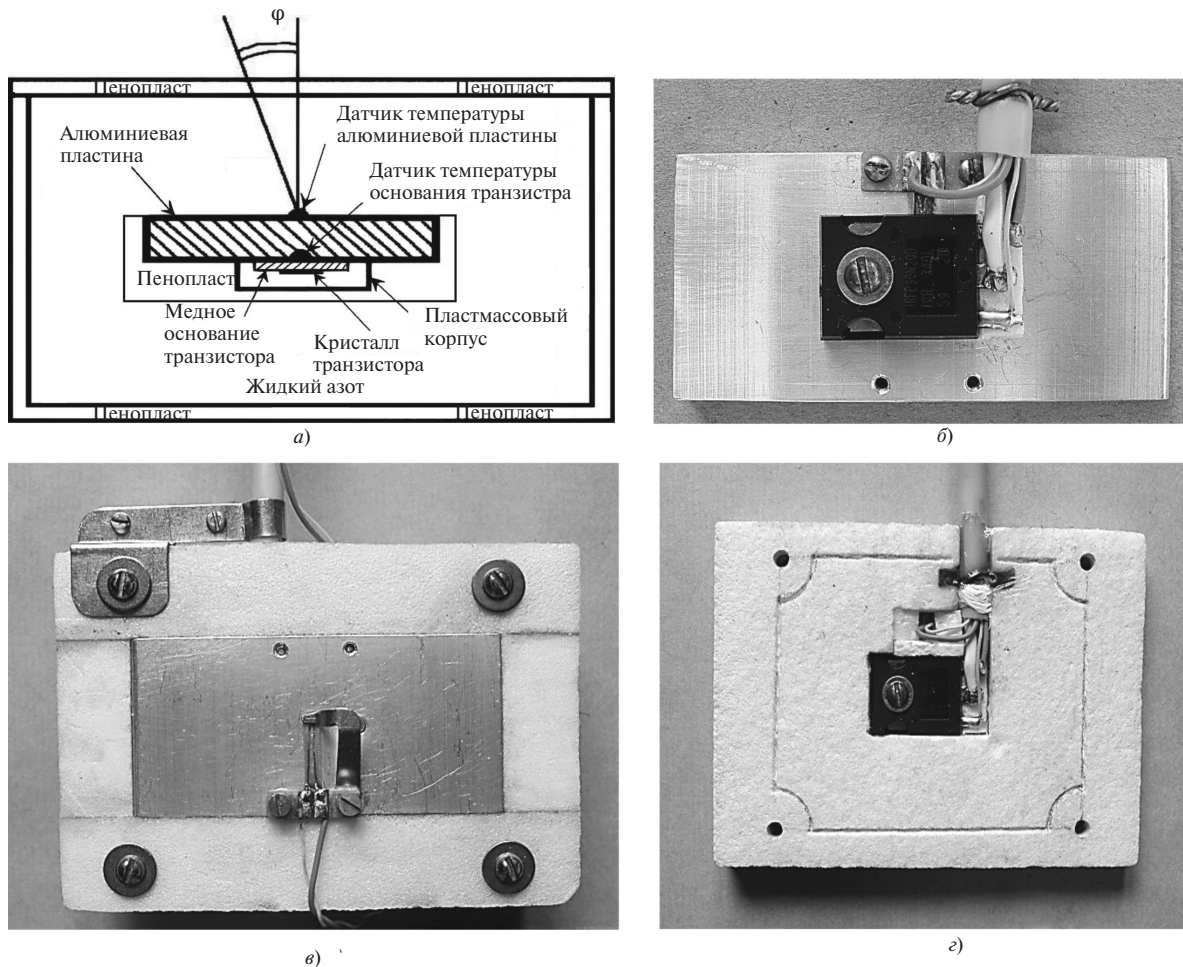


Рис. 2. Экспериментальная установка: а – конструктивная схема экспериментальной установки; б – полевой транзистор, установленный на теплопроводящей алюминиевой пластине (под транзистором на его основании расположен датчик температуры); в – внешняя поверхность алюминиевой пластины, контактирующая с жидким азотом (в центре пластины расположен датчик температуры); г – внутренняя поверхность алюминиевой пластины с транзистором, закрытая пенопластом

сторе, находящемся в линейном режиме и выполняющем фактически функцию нагревателя, а также ток через него. Повышение напряжения на транзисторе приводило к увеличению тока транзистора и выделяющейся в нём мощности потерь. Измерения велись до момента достижения максимального значения плотности теплового потока q в соответствии с кривой кипения $q=f(\Delta T)$.

При выделении мощности в вентиле происходит передача теплового потока через алюминиевую пластину хладагенту, в результате возникает процесс кипения жидкого азота. Режимы кипения принято характеризовать [5] зависимостью плотности теплового потока q , снимаемого жидкостью с поверхности нагрева, от разности температур ΔT поверхности нагрева и насыщения жидкости. Вид кривой кипения жид-

кого азота на рис. 3 в логарифмических координатах характерен для всех известных жидкостей, включая криогенные [5]. Выделяют три основные

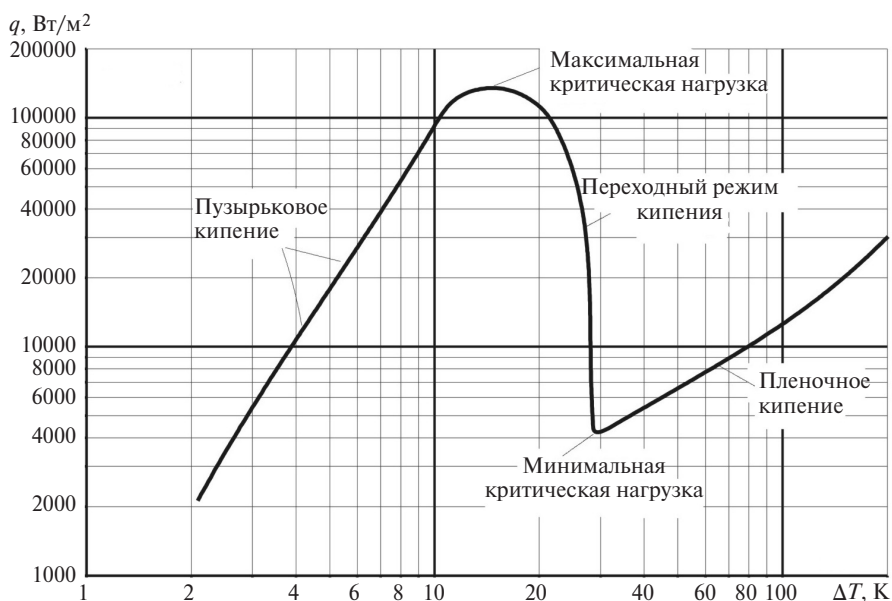


Рис. 3. Характеристика кипения жидкого азота

области. В данном случае исследование велось в области пузырькового кипения. В точке максимальной критической нагрузки процесс повышения мощности был прекращён, так как в этой точке паровые столбики (пузырьки), сливаясь друг с другом, образуют большой пузырь, препятствующий эффективному охлаждению (первая точка кризиса кипения). До этой точки и велось повышение тока вентиля.

По результатам измерений вычислялись мощность потерь $P_{\text{п}}$ (Вт), плотность теплового потока q (Вт/см²), коэффициент теплоотдачи $\alpha = q/\Delta T$ (Вт/см²·К), тепловое сопротивление $R = \Delta T/P_{\text{п}}$ (°С/Вт).

Опыт проводился для трёх положений исследуемой системы: горизонтального (■ на рис. 4), вертикального (Δ на рис. 4), реверсного (перевернуто на 180° относительно первого варианта, ○ на рис. 4). Сравнение изменений плотности теплового потока при нагреве для трёх указанных случаев представлено на рис. 4 в логарифмическом масштабе.

Видно, что максимальная интенсивность теплового потока соответствует вертикальному положению системы (средняя прямая), а минимальная — реверсному (нижняя прямая), что согласуется с общепринятым физическим представлением о процессе теплоотдачи [2].

Были рассчитаны значения тепловых сопротивлений перехода «поверхность охладителя — хладагент». Минимальные средние значения этого сопротивления имеют место при вертикальном положении системы, а максимальные — при реверсном. Очевидно, при вертикальном положении системы интенсивность охлаждения вентиля возрастает, что ведёт к снижению теплового сопротивления R .

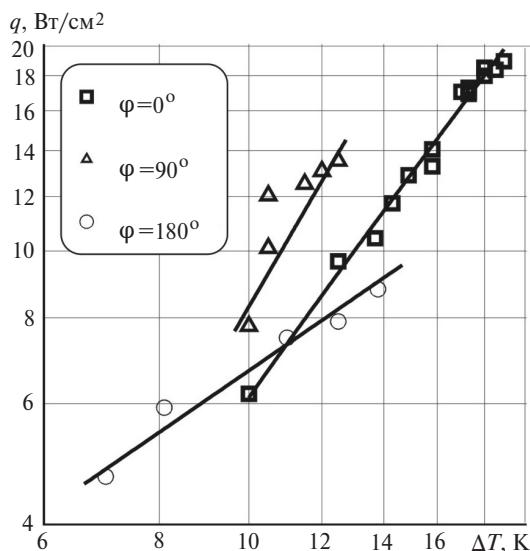


Рис. 4. Зависимость плотности теплового потока от температурного напора при различных положениях охлаждающей пластины

По результатам экспериментальных исследований и расчётов можно принять усреднённое значение коэффициента теплоотдачи с поверхности алюминия в среде жидкого азота равным $\alpha \approx 0,5$ Вт/см²·К. Таким образом, при охлаждении жидким азотом коэффициент теплоотдачи на 3–4 порядка выше, чем при воздушном конвективном охлаждении, так как значения коэффициента α при комнатной температуре не превышают 0,003 Вт/см²·К [2].

Проведен оценочный расчет теплового процесса для транзистора типа IRFP90N20D в корпусе ТО-247, установленном на алюминиевой пластине с суммарной площадью обеих сторон $S = 50$ см² (пластина размером примерно 50×50×5 мм) в среде жидкого азота.

По техническим данным на транзистор, значение его теплового сопротивления «кристалл–корпус» $R_{\text{кр-кп}} = 0,26$ °С/Вт, а типовое значение теплового сопротивления «корпус–теплоотвод» $R_{\text{кп-тп}} = 0,24$ °С/Вт [7].

При $\alpha = 0,5$ Вт/см² и $S = 50$ см² тепловое сопротивление «охладитель–окружающая среда» считалось равным $R_{\text{кп-ср}} = 0,04$ °С/Вт. Задача определения картины теплового поля не решалась, а температура поверхности теплоотвода полагалась одинаковой, что при указанных размерах алюминиевой пластины вполне справедливо. Эквивалентная тепловая схема замещения установки представлена на рис. 5.

Расчетные значения температуры T и перепадов температуры Q при различных значениях мощности потерь $P_{\text{п}}$, выделяемой в кристалле, представлены в табл. 1.

Экспериментальное значение теплового сопротивления «корпус–теплоотвод» $R_{\text{кп-тп}}$ получилось несколько больше типового значения и оказалось равным 0,5 °С/Вт, что вызвано, видимо, неровностями поверхности теплоотводящей пластины, отсутствием теплопроводящей пасты и другими факторами.

Расчетные значения температур T и перепадов температуры Q при различных значениях мощности потерь $P_{\text{п}}$, выделяемой в кристалле, и при $R_{\text{кп-тп}} = 0,5$ °С/Вт представлены в табл. 2.

Результаты расчётов по строкам 3, 4 из таблицы 1 и строке 3 из табл. 2 представлены на диаграмме рис. 6.

Из диаграммы видно, что при охлаждении жидким азотом температура кристалла не превышает допустимую (175 °С) [7] при больших значениях мощности потерь. При конвективном охлаждении в условиях комнатной температуры (20 °С) нагрев кристалла был бы превышен на 216 °С по сравнению со значениями температур, приведёнными на диаграмме (рис. 6 правый столбец),

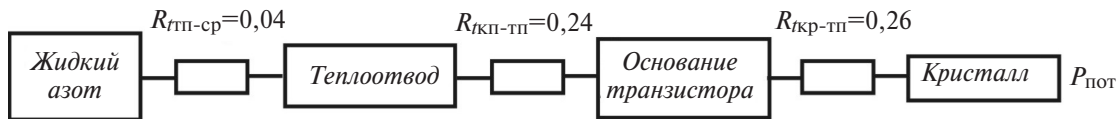


Рис. 5. Эквивалентная тепловая схема замещения установки

Таблица 1

Мощность потерь $P_{П}$, Вт	$T_{ср}$	$Q_{тп-ср}$	$T_{тп}$	$Q_{кп-тп}$	$T_{кп}$	$Q_{кр-кп}$	$T_{кр}$
200	-196	8	-188	48	-140	52	-88
300	-196	12	-184	72	-112	78	-34
400	-196	16	-180	96	-84	104	20
500	-196	20	-176	120	-56	130	74

Таблица 2

Мощность потерь $P_{П}$, Вт	$T_{ср}$	$Q_{тп-ср}$	$T_{тп}$	$Q_{кп-тп}$	$T_{кп}$	$Q_{кр-кп}$	$T_{кр}$
200	-196	8	-188	100	-88	52	-36
300	-196	12	-184	150	-34	78	44
400	-196	16	-180	200	20	104	124
500	-196	20	-176	250	74	130	204

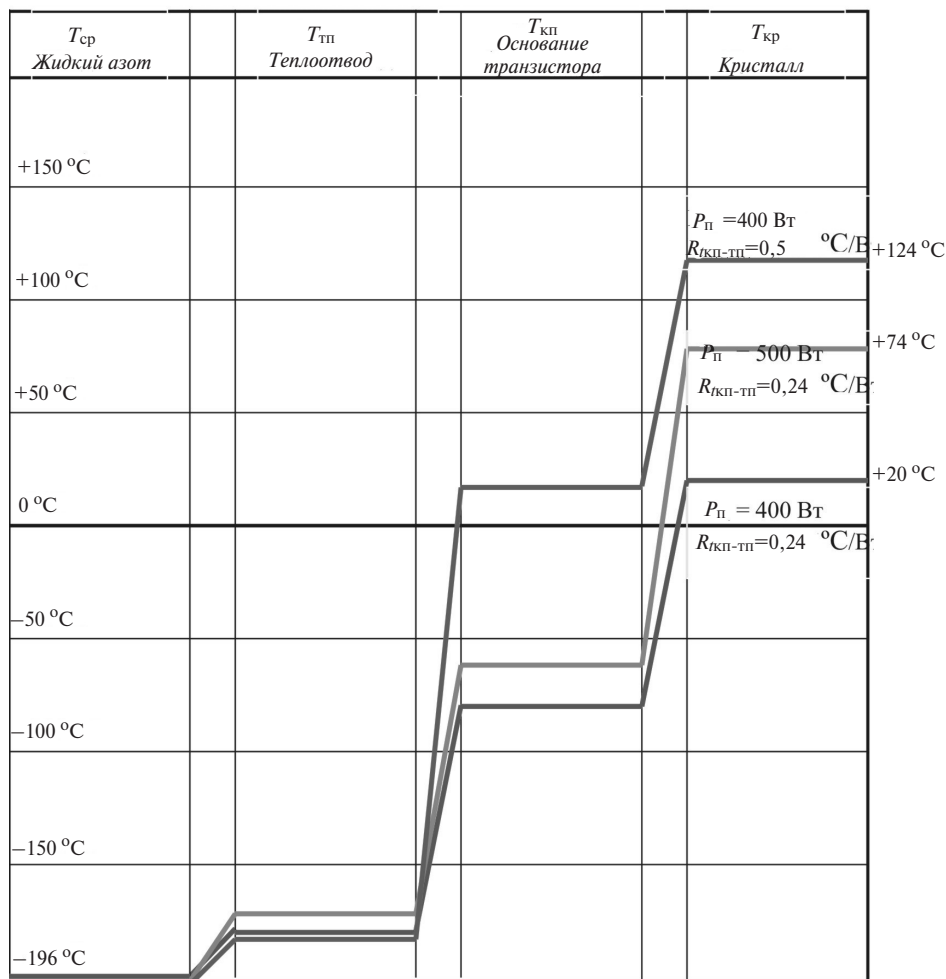


Рис. 6. Диаграмма распределения температуры в структуре «кристалл–жидкий азот»

так как температура кристалла определяется выражением [9]:

$$T_{кр} = T_{окр.ср} + R_T P_{п},$$

где R_T – полное переходное тепловое сопротивление «кристалл–окружающая среда»; $P_{п}$ – мощность потерь.

Сказанное выше свидетельствует в пользу реализации криогенного охлаждения вторичных источников питания. Статические преобразователи электроэнергии целесообразно выполнять с применением современных мощных полупроводниковых приборов, в первую очередь диодов, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов, так как мощные приборы обладают лучшими массогабаритными показателями.

При разработке систем, содержащих наряду с электромеханическими преобразователями также и статические, возникает ряд специфических проблем, решение которых определяет эффективность систем в целом. Первое – приток тепла в холодную зону за счет мощных токовых вводов. На рис. 7 в качестве примера представлена система передачи электроэнергии от сверхпроводникового синхронного генератора по сверхпроводящему кабелю.

Видно, что расположение преобразовательного устройства (выпрямителя) вне холодной зоны требует дополнительных мощных токовых вводов, через которые поступает тепло в холодную зону.

На рис. 8 показана аналогичная система передачи электроэнергии с преобразованием ее параметров при расположении преобразовательного устройства в холодной зоне.

Как следует из [6], размещение всего преобразовательного блока в зоне захлаживания существенно перспективнее, так как снижается приток тепла в холодную зону за счёт уменьшения числа токовых вводов.

Для подтверждения перспективы криогенного охлаждения полупроводниковых устройств был изготовлен и испытан преобразователь постоянного напряжения, включающий инвертор и выпрямитель, без изменения выходного напряжения. Были оценены массогабаритные показатели преобразовательного блока при помещении его в криогенную среду. Общий вид электрических соединений установки показан на рис. 9. При мощности нагрузки 10 кВт КПД установки составил 97%.

Ожидаемое повышение удельной мощности статического преобразовательного устройства в условиях криогенного охлаждения определяется в основном следующими факторами: снижением массы радиаторов и повышением токовой нагрузки вентиляей.

Площадь поверхности охладителя обратно пропорциональна коэффициенту теплоотдачи α (1). Если при конвективном охлаждении воздухом значение α составляет 5÷30 Вт/м²·К [2], то при охлаждении жидким азотом, как было показано выше в результате эксперимента, коэффициент теплоотда-

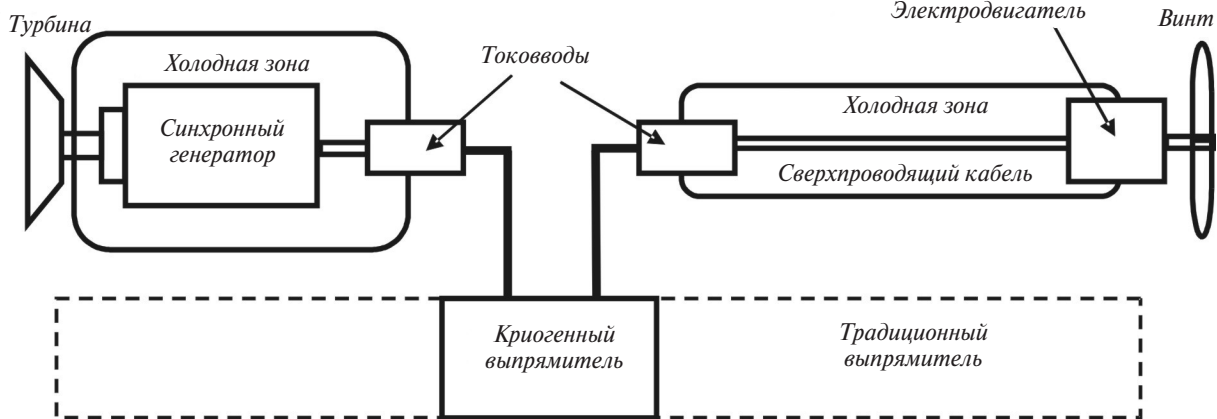


Рис. 7. Изолированное положение выпрямителя в электрической трансмиссии летательных аппаратов

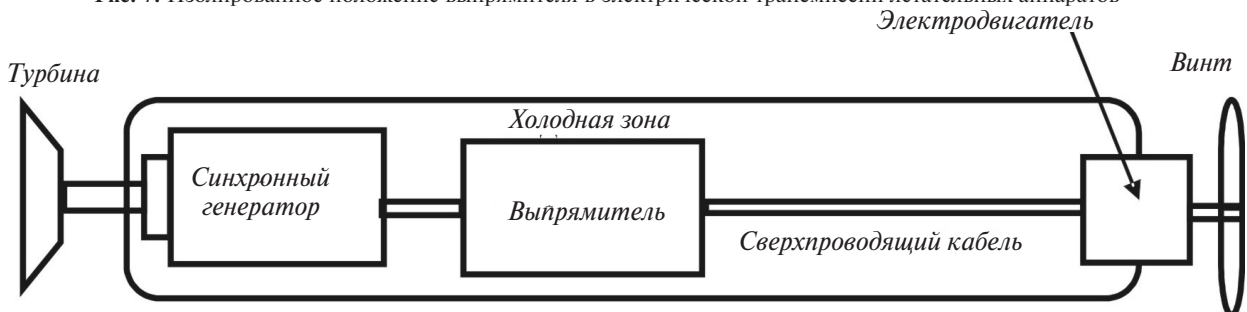
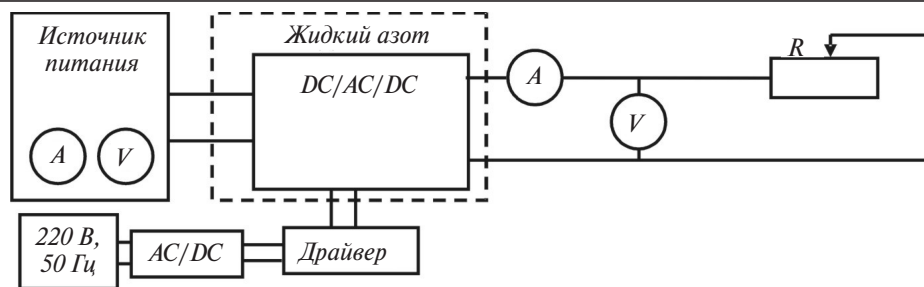


Рис. 8. Встроенное положение выпрямителя в электрической трансмиссии летательных аппаратов



$$P_{\Pi} = I \Delta U, \quad (5)$$

где I – ток транзистора; ΔU – падение напряжения на транзисторе в открытом состоянии.

С учётом (4) и (5) токовая нагрузка транзистора

$$I = (T_{\Pi} - T_{o.c.}) / R_T \Delta U. \quad (6)$$

Учитывая приведённые выше результаты экспериментов,

с помощью (3) и (6) можно предварительно оценить значение относительной массы полупроводникового преобразователя с криогенным охлаждением. С учётом значительного снижения массы охладителей и повышения установленной мощности единичного вентиля ожидаемое относительное значение массы преобразователя может составить примерно $0,01 \div 0,02$ кг/кВт, что в пересчёте на относительную мощность составит $50 \div 100$ кВт/кг.

При построении графиков на рис. 10 в расчёт брались минимальные значения удельной мощности из указанного выше диапазона.

Безусловно, следует учитывать, что при ограниченном объёме хладагента продолжительность работы преобразователя сильно ограничивается при закипании хладагента. Эта проблема может быть решена либо значительным повышением КПД устройства, либо прокачкой хладагента с применением

Рис. 9. Схема измерений КПД и потерь криогенного полупроводникового блока с двойным преобразованием энергии

чи возрастает до 10^4 Вт/м²·К. Масса пластинчатого охладителя

$$M_{\text{охл}} = 0,5 P_{\Pi} \rho \delta / \alpha \Delta T_{\text{рд}}, \quad (3)$$

где δ , ρ – толщина пластины охладителя и удельная масса материала, из которого он изготовлен.

Токовая нагрузка вентиля, как известно, лимитируется предельно допустимой температурой его кристаллического полупроводникового перехода T_{Π} , значение которой рассчитывается по известному выражению [9]:

$$T_{\Pi} = T_{o.c.} + R_T P_{\Pi}, \quad (4)$$

где $T_{o.c.}$ – температура окружающей среды; R_T – полное тепловое сопротивление участка «кристалл–окружающая» среда. Предполагая, что транзистор работает в режиме переключений при невысокой частоте преобразования, его потери будут в основном определяться формулой [2]:

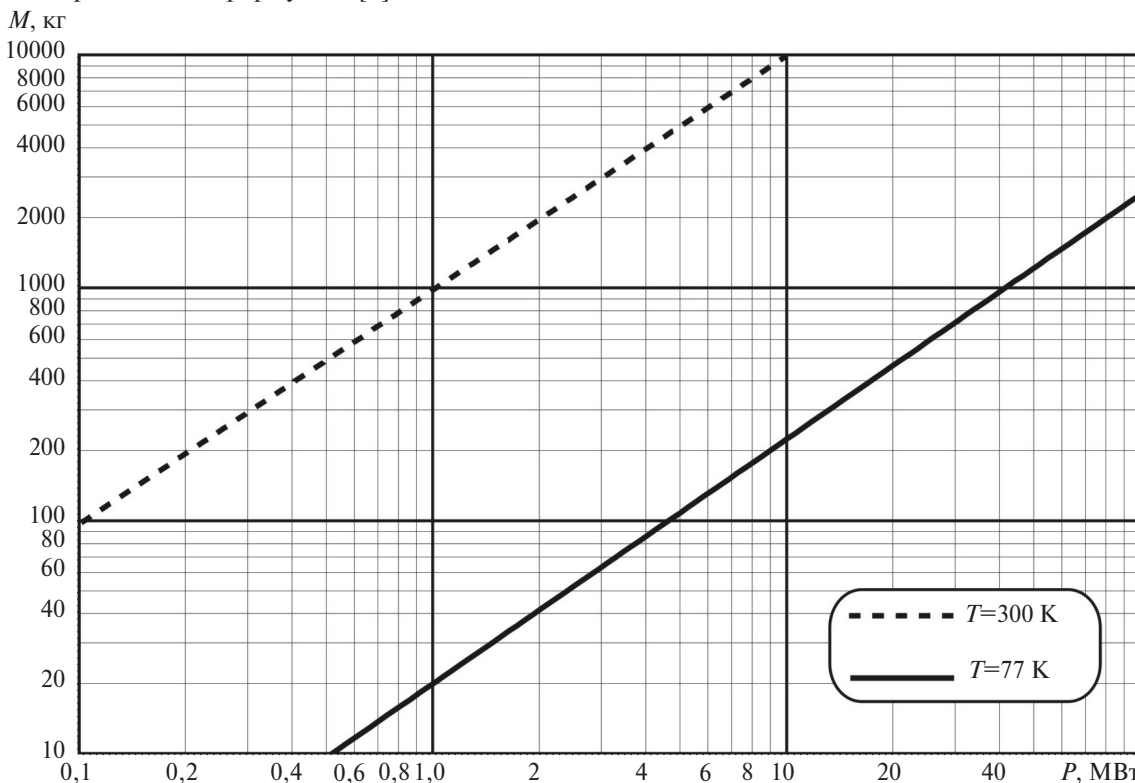


Рис. 10. Ожидаемые значения массы статического преобразователя в функции мощности нагрузки при различной температуре охлаждения

ем современных систем замкнутого криообеспечения [6].

Выводы. 1. Результаты экспериментов показали эффективность криогенного охлаждения полупроводниковых вентиляей, что вызвано значительным возрастанием (на несколько порядков) коэффициента теплоотдачи, а следовательно, снижением массы и габаритов радиаторов, а также и всего преобразователя.

2. Расчёты по результатам эксперимента показали, что применение криогенного охлаждения позволяет примерно в 50÷100 раз повысить относительное значение мощности преобразователя.

3. При компоновке устройства размещение всего преобразовательного блока в зоне захлаживания наиболее перспективно.

4. В дальнейшем планируется проведение исследований по сопоставлению экспериментальных данных и теоретических моделей на макетных образцах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электрический самолёт: концепция и технологии**/Под ред. С.М. Мусина. Уфа: УГАТУ, 2014, 388 с.
2. **Найвельт Г. С., Мазель К. Б., Хусаинов Ч. И. и др.** Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник/Под ред. Г.С. Найвельта. М.: Радио и связь, 1985, 576 с.
3. **Лёвин А.В., Алексеев И.И., Харитонов С.А., Ковалев Л.К.** Электрический самолёт: от идеи до реализации. М.: Машиностроение, 2010, 288 с.
4. **Ward R.R., Dawson W.J., Zhu L., Kirschman R.K., Mueller O., Hennessy M.J., Mueller E., Patterson R.L., Dickman J.E. and Hammoud A.** Power diodes for cryogenic operation, in PESC Record – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conf., 2003, 1891 p.
5. **Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.** Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977, 288 с.
6. **Костюк В.В., Каторгин Б.И., Фирсов В.П., Ковалёв К.Л., Равикович Ю.А., Антохов И.В., Тимушев С.Ф., Верещагин М.М., Холубцев Д.П., Ермилов Ю.И., Балабошко Н.Г., Гапеев Ю.А., Лесовников А.С., Сычков А.Е., Модестов К.А.** Система криообеспечения высокотемпературной сверхпроводимости устройств (СКР 001). – Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 8 [Электрон. ресурс] <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1647> (Дата обращения 10.09.2018).
7. **JSC «Infinition Technologies AG»** [Офици. сайт] <http://www.irf.com/package/> (Дата обращения 27.10.2018).
8. **Дубенский Г.А., Кован Ю.И.** Электроэнергетические преобразовательные устройства. М.: Изд-во МАИ, 2017, 52 с.

9. **Чебовский О.Г. и др.** Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985, 400 с.

10. **Modestov K., Kovalev K., Dubensky A., Zhuravlev S.** Brushless Nonsteel HTS Generator with Combined Excitation with Trapped Field Plates on the Rotor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, iss. 4, pp. 1–5. doi:10.1109/tasc.2018.2799327.

11. **Dubensky A.A., Kovalev K.L., Larionov A.E., Modestov K.A., Penkin V.T., Poltavets V.N.** An Outlook of the Use of Cryogenic Electric Machines Onboard Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, iss. 3, pp. 1–4. doi:10.1109/tasc.2016.2524656.

12. **Kovalev K.L., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinova E.E., Dubensky A.A., Verzhbitsky L.G., Kozub S.S.** Brushless Superconducting Synchronous Generator with Claw-Shaped Poles and Permanent Magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, iss. 3, pp. 1–4. doi:10.1109/tasc.2016.252899.

[19.11.2018]

А в т о р ы: **Дубенский Георгий Александрович** окончил Московский авиационный институт (МАИ) в 1971 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1975 г. Доцент, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ. Скончался в июле 2018 г.

Модестов Кирилл Андреевич окончил МАИ в 1998 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 2005 г. Доцент кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Кован Юрий Игоревич окончил МАИ в 1966 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1973 г. Доцент, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Ковалев Константин Львович окончил в 1993 г. Московский инженерно-физический институт. В 2005 г. защитил докторскую диссертацию по сверхпроводниковым электрическим машинам. Заведующий кафедрой «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Ларионов Анатолий Евгеньевич окончил МАИ в 1974 г. Кандидатскую диссертацию защитил в 1995 г. Доцент, старший научный сотрудник кафедры «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Elektrichestvo, 2019, No. 6, pp. 4–12

DOI:10.24160/0013-5380-2019-6-4-12

Matters Concerned with Using Cryogenic Cooling of Static Converter Semiconductor Switches

DUBENSKIY Georgy A. (Moscow Aviation Institute – MAI, Moscow, Russia) – Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

MODESTOV Kirill A. (MAI, Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

KOVAN Yuri Ig. (MAI, Moscow, Russia) – Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

KOVALEV Konstantin L. (MAI, Moscow, Russia) – Professor, Head of the Department, Dr. Sci. (Eng.)

LARIONOV Anatoly Ye. (MAI, Moscow, Russia) – Associate Professor, Senior Scientist, Cand. Sci. (Eng.)

In Russia and abroad, certain scientific and technical progress in the field of development and manufacture of electromechanical converters constructed on the basis of high-temperature superconducting materials has been achieved. The specific capacity of such electrical machines exceeds 10 kW/kg when cooled with liquid nitrogen. The specific capacity of static converting devices operating jointly with electromechanical converters and fitted with forced cooling is as a rule not higher than 1 kW/kg. Therefore, the problem of increasing the specific capacity of both electromechanical and static semiconductor electric power devices of movable facilities, especially when used in the aerospace industry, is very topical. The article considers matters concerned with cooling the semiconductor switches of static converters with liquid nitrogen. More efficient cooling ensured by such arrangement results in that a significantly higher heat transfer coefficient is obtained; as a consequence, it becomes possible to make the heat sinks and, hence, the entire converter with smaller mass and dimensions. Calculations carried out using experimental results have shown that the use of cryogenic cooling makes it possible to increase the relative converter capacity by approximately a factor of 50–100. The converter unit layout problem has been solved: the most promising solution is to place it into the zone cooled with liquid nitrogen.

Key words: static converter devices, electromechanical converters, cryogenic cooling, heat transfer coefficient, converter specific capacity

REFERENCES

1. **Elektricheskiy samolet: kontseptsiya i tekhnologii** (Electric aircraft: concept and technology)/Edit. by S.M. Musin. Ufa, Publ. UGATU, 2014, 388 p.
2. **Nayvelt G.S., Mazel K.B. et al. Istochniki elektropitaniya radioelektronnoy apparatury: Spravochnik** (Power supply for radioelectronic equipment: Directory)/Edit. by G.S. Nayvelt. Moscow, Radio i svyaz, 1985, 576 p.
3. **Levin A.V., Alekseyev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. Elektricheskiy samolet: ot ideyi do realizatsii** (Electric aircraft: from idea to implementation). Moscow, Mashinostroeniye, 2010, 288 p.
4. **Ward R.R., Dawson W.J., Zhu L., Kirschman R.K., Mueller O., Hennessy M.J., Mueller E., Patterson R.L., Dickman J.E., Hammoud A.** Power diodes for cryogenic operation, in PESC Record. – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conf., 2003, 1891 pp.
5. **Grigor'yev V.A., Pavlov Yu.M., Ametistov Ye.V. Kipeniye kriogennykh zhidkostey** (The boiling of cryogenic liquids). Moscow, Energiya, 1977, 288 p.
6. **Kostyuk V.V., Katorgin B.I., Firsov V.P., Kovalev K.L., Ravikovich Yu.A., Antukhov I.V., Timushev S.F., Vereshchagin M.M., Kholobtsev D.P., Ermilov Yu.I., Balaboshko N.G., Gapeyev Yu.A., Lesovnikov A.S., Sychkov A.Ye., Modestov K.A. Sistema kriobespecheniya vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti ustroystv** (Cryogenic supply system for high-temperature superconductivity devices (SCR 001)). Engineering Journal: Scientist and Innovation, 2017, iss. 8 [Electron. resurs] <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1647> (Data obrasheniya 10.09.2018).
7. **JSC «Infion Technologies AG»** [Ofits. Sayt] [http://www.irf.com/package/\(Data obrasheniya 27.10.2018\)](http://www.irf.com/package/(Data obrasheniya 27.10.2018)).
8. **Dubenskiy G.A., Kovan Yu.I. Elektroenergeticheskiye preobrazovatelnye ustroystva** (Electric power converters). Moscow, Publ. MAI, 2017, 52 p.
9. **Chebovskiy O.G. et. al. Silovye poluprovodnikovye pribory: Spravochnik** (Power semiconductor devices. Directory). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 400 p.
10. **Modestov K., Kovalev K., Dubenskiy A., Zhuravlev S.** Brushless Nonsteel HTS Generator with Combined Excitation with Trapped Field Plates on the Rotor. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, vol. 28, iss. 4, pp. 1–5. doi:10.1109/tasc.2018.2799327.
11. **Dubenskiy A.A., Kovalev K.L., Larionov A.E., Modestov K.A., Penkin V.T., Poltavets V.N.** An Outlook of the Use of Cryogenic Electric Machines Onboard Aircraft. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, iss.3, pp. 1–4. doi:10.1109/tasc.2016.2524656.
12. **Kovalev K.L., Penkin V.T., Larionov A.E., Modestov K.A., Ivanov N.S., Tulinova E.E., Dubenskiy A.A., Verzhbitskiy L.G., Kozub S.S.** Brushless Superconducting Synchronous Generator with Claw-Shaped Poles and Permanent Magnets. – IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, vol. 26, iss. 3, pp. 1–4. doi:10.1109/tasc.2016.252899.

[19.11.2018]