

ВОЗДУШНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Каликанов В. М., Панфилов С. А., Фомин Ю. А.,
 ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск
 Мартыненко В. А., Толкачев С. И., Биктиев Р. Ш.
 ОАО «Электровыпрямитель» г. Саранск, Россия

Аннотация. В статье представлены конструкции основных отечественных охладителей воздушной системы охлаждения для силовых полупроводниковых приборов штыревого и таблеточного исполнения, приведены массогабаритные и тепловые параметры основных типоразмеров воздушных охладителей.

Ключевые слова: воздушное охлаждение, односторонний охладитель, двухсторонний охладитель, пресованный профиль. Силовой полупроводниковый прибор, тепловое сопротивление.

Силовые полупроводниковые приборы (СПП) при эксплуатации в статических преобразователях электрической энергии, в цепях постоянного и переменного тока, в различных силовых установках, в преобразователях вакуумно-дуговых и плазменных печей, комплектного электропривода постоянного тока, в высоковольтных преобразовательных устройствах линий электропередач, выделяют мощности тепловых потерь величиной от десятков ватт до нескольких киловатт.

Тепловые потери вызывают значительный перегрев отдельных элементов электрических схем и всего устройства в целом по отношению к температуре окружающей среды, что приводит к ухудшению различных параметров приборов, к снижению работоспособности, срока службы и, в конечном итоге, к выходу из строя. Обеспечение оптимальных тепловых режимов электротехнических устройств является одной из важнейших проблем их разработки и конструирования. Превышение предельно допустимых температур значительно снижает надежность их работы. Если снизить рабочую температуру структуры полупроводникового прибора на 15–20%, то интенсивность отказов снизится в 2–3 раза. Для надежной безотказной работы требуется эти мощности от СПП отводить, то есть охлаждать, обеспечивая тем самым номинальные тепловые режимы приборов. Номинальный тепловой режим силовых полупроводников обуславливают максимально допустимые температуры структур приборов:

- для тиристоров $T_{j\max} = 125 - 150 \text{ }^\circ\text{C}$,
- для диодов $T_{j\max} = 175 - 190 \text{ }^\circ\text{C}$.

Наиболее распространенным видом охлаждения является воздушное, естественное или принудительное охлаждение. Для этого используются цельнометаллические охладители воздушных систем из пресованных профилей, материал – алюминиевый сплав АД-31. Цельнометаллические охладители имеют развитые оребренные поверхности охлаждения, площади которых в десятки и даже сотни раз превышают площадь теплового контакта прибора с охладителем.

Охладители воздушных систем охлаждения подразделяют на односторонние и двухсторонние. Односторонние охладители предназначены для силовых полупроводниковых приборов штыревого типа, двухсторонние – для приборов таблеточного типа. Естественное воздушное охлаждение осуществляется путем естественной конвекции воздуха около оребренной поверхности охладителя, принудительное воздушное охлаждение – это обдув оребренной поверхности охладителя с определенными скоростью и напором охлаждающего воздуха.

Главным эксплуатационным параметром охладителей является установившееся тепловое сопротивление «контактная поверхность охладителя – охлаждающая среда» (тепловое сопротивление охладителя) – $R_{\text{th-cf}}$, поскольку именно оно является определяющим теплоотводящую способность охладителя.

Мощность тепловых потерь силовых полупроводниковых приборов, отводимая охладителями, определяется следующим образом:

$$P_{AV} = (T_h - T_{cf}) / R_{thh-cf} \quad (1)$$

С другой стороны эту мощность можно определить как:

$$P_{AV} = (T_j - T_c) / R_{thjc} = (T_c - T_h) / R_{thch} \quad (2)$$

Из этого выражения определяется температура контактной поверхности охладителя:

$$T_h = T_c - T_j(R_{thch} / R_{thjc}) + T_c(R_{thch} / R_{thjc}) \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1) получается окончательное выражение для определения мощности тепловых потерь, отводимых охладителями в зависимости от различных теплофизических параметров приборов и охладителей:

$$P_{AV} = [T_c - T_j(R_{thch} / R_{thjc}) + T_c(R_{thch} / R_{thjc}) - T_{cf}] / R_{thh-cf} \quad (4)$$

где : P_{AV} - мощность тепловых потерь, отводимая охладителем, Вт

T_h - температура контактной поверхности охладителя, °С

T_{cf} - температура охлаждающей среды, °С.

R_{thjc} - установившееся тепловое сопротивление «переход - корпус прибора» (внутреннее тепловое сопротивление прибора), °С / Вт.

R_{thch} - установившееся тепловое сопротивление «корпус прибора - контактная поверхность охладителя» (контактное тепловое сопротивление), °С / Вт.

T_j - температура структуры прибора, °С

T_c - температура корпуса прибора, °С.

Величины R_{thjc} , R_{thch} , T_j , T_c являются нормативно-эксплуатационными параметрами силовых полупроводниковых приборов и приводятся в технико-информационных документах, температура окружающей среды T_{cf} является эксплуатационным параметром и обычно задается 40 °С, поэтому, исходя из (4), величина теплового сопротивления охладителя является определяющим параметром процесса отвода мощности тепловых потерь от СПП к охладителю и далее в окружающее пространство.

Естественное воздушное охлаждение является наиболее простым в эксплуатации, но наименее эффективным способом охлаждения силовых полупроводниковых приборов так как при естественной конвекции воздуха значение коэффициента теплоотдачи от ребренных поверхностей охладителей весьма низкое и составляет $\alpha = 5 - 10 \text{ Вт/м}^2 \text{ °С}$ [1]. Оно пригодно для охлаждения приборов с номинальной токовой нагрузкой до 250-320 А. Принудительное воздушное охлаждение значительно эффективнее естественного. Коэффициент теплоотдачи при принудительной конвекции воздуха при скорости 10-15 м/с составляет $\alpha = 40 - 60 \text{ Вт/м}^2 \text{ °С}$ [1]. Оно вполне достаточно для приборов на токи 500 – 630 А.

При воздушном охлаждении теплоотвод от ребренных поверхностей охладителей осуществляется за счет совместной теплопередачи естественной или принудительной конвекции и излучения. Общий коэффициент теплоотдачи α включает в себя конвективный – α_k и лучистый – α_l коэффициенты и равен:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$$

При принудительном воздушном охлаждении теплоотдача от ребренных поверхно-

стей охладителей осуществляется, в основном, за счет конвекции, лучистый теплообмен составляет 2 – 5 %.

При естественном охлаждении лучистый теплообмен достигает 25 – 30 % от общего количества отводимого тепла, поэтому при естественном охлаждении следует осуществлять мероприятия по дальнейшему увеличению лучистого теплообмена. Следовательно, для естественного охлаждения силовых полупроводниковых приборов следовало бы изготавливать охладители, отличные от охладителей принудительного охлаждения. При естественном охлаждении охладители должны иметь более длинные и тонкие ребра, межреберных расстояния должны быть увеличены в 1.5 – 2 раза, оребренная поверхность должна иметь высокую степень черноты.

Однако, в настоящее время с целью унификации выпускаемых изделий для естественного и принудительного охлаждения силовых полупроводниковых приборов используются одни и те же охладители (за исключением охладителей О 111, О 121, О 131, О 141, предназначенных для охлаждения маломощных полупроводниковых приборов, которые выделяют 20 – 50 Вт мощности тепловых потерь). Это целесообразно с организационно-производственной точки зрения, но несколько не логично с технической стороны.

Охладители О 111 и О 121 выполнены на основе прессованного профиля БК 264; охладители О 221, О 131, О 141 выполнены на основе прессованного профиля БК 220. Охладители О 231, О 331, О 241, О 541, О 151, О 371 выполнены на основе прессованного профиля БК 155. Охладители О 161, О 171, О 181 выполнены на основе прессованного профиля БК 211. Охладители О 271, О 281, О 242 выполнены на основе прессованного профиля БК 157. Охладители О 471 и О 232 выполнены на основе прессованного профиля БК 154. Охладитель О 342 выполнен на основе прессованного профиля БК 181. Охладитель О 123 выполнен на основе прессованного профиля БК 221; О 143 – на основе профиля БК 222; О 343, О 253, О 353 выполнены на основе прессованного профиля БК 265. Охладители О 273, О 373 выполнены на основе прессованного профиля БК 224. Охладитель О 193 – на основе прессованного профиля БК 1512. Охладители О 151, О 243, О 173 выполнены на основе прессованного профиля БК 223.

Односторонние охладители воздушных систем охлаждения для штыревых силовых полупроводниковых приборов конструктивно представляют собой отрезки прессованных профилей определенного типа и определенной длины. В основании отрезка профиля выполнено резьбовое отверстие необходимого размера для соединения с полупроводниковым прибором. Между охладителем и прибором зажимается токоотводящая шина, выполненная из электротехнической меди М1 толщиной от 0,8 до 3 мм для различных типов охладителей. Конструкции односторонних охладителей воздушных систем охлаждения для силовых полупроводниковых приборов штыревого исполнения представлены на рис. 1-5.

Односторонние охладители О 232, О 242, О 342, предназначенные для одностороннего охлаждения силовых полупроводниковых приборов таблеточного типа не имеют резьбового отверстия; прибор через токосъемную шину прижимается к основанию охладителя с помощью траверсы, двух болтов и системы изоляции. Конструкции односторонних охладителей воздушных систем охлаждения для силовых полупроводниковых приборов таблеточного типа представлены на рис. 6–8.

Двухсторонние охладители воздушных систем охлаждения представляют собой два одинаковых отрезка прессованного профиля определенной длины и определенного типа. Между этими отрезками размещается силовой полупроводниковый прибор таблеточного типа с двумя токосъемными шинами из электротехнической меди М1 толщиной 3–5 мм (для различных типов охладителей) и прижимного устройства, состоящего из одной или двух траверс, выполненных из пружинистой стали 60 С2А, двух армированных болтов с гайками и системы изоляции, выполненной из прессматериала АГ-4В. Конструкции двухсторонних охладителей воздушных систем охлаждения для силовых полупроводниковых приборов таблеточного типа представлены на рис. 9–11.

Основные технические показатели данных охладителей: габаритные размеры, массы,

скорость охлаждающего воздуха в межреберных каналах охладителей, диаметр контактной поверхности, перепад давления на входе и выходе охладителя, установившееся значение теплового сопротивления «контактная поверхность охладителя – охлаждающая среда» при естественном и принудительном охлаждении, удельные массогабаритные коэффициенты приведены для охладителей воздушных систем охлаждения для штыревых, силовых полупроводниковых приборов приведены в таблице 1 [2,5]; односторонних воздушных охладителей для силовых полупроводниковых приборов таблеточного исполнения приведены в таблице 2 [5]; двухсторонних воздушных охладителей для силовых полупроводниковых приборов таблеточного исполнения приведены в таблице 3 [3,4,5].

В этих таблицах приняты следующие обозначения:

$A \times B \times C$ – габаритные размеры охладителей: ширина \times длина \times высота, мм. (без токоотводов);

M – масса, кг (без токоотводов);

W – диаметр резьбового отверстия, мм;

D – диаметр контактной поверхности, мм;

S – крутящий момент, Нм;

R_{thh-cf} – установившееся значение теплового сопротивления «контактная поверхность охладителя – охлаждающая среда», °С/Вт;

V_{cf} – скорость охлаждающего воздуха в межреберных каналах охладителей, м/с;

R_{thch} – установившееся значение теплового сопротивления «корпус прибора – контактная поверхность охладителя» (контактное тепловое сопротивление), °С/Вт;

ΔP – перепад давления потока охлаждающей среды на охладителе, Па;

P_{AV} – условное значение отводимой мощности тепловых потерь охладителем, Вт;

P_{AV}/M – величина удельной мощности тепловых потерь, отводимой охладителем, на единицу массы охладителя, Вт/кг;

V_{ABC} – габаритный объем охладителя (без токоотводов), дм³;

P_{AV}/V_{ABC} – величина удельной мощности, отводимой охладителем на единицу габаритного объема, Вт/ дм³;

N – величина усилия сжатия таблеточных приборов с охладителями, кН.

Условные значения отводимой мощности тепловых потерь определены из условий, что температура контактных поверхностей охладителей принималась равной 110°С для приборов штыревой конструкции и 90°С для приборов таблеточной конструкции; температура охлаждающего воздуха принималась равной 40 °С. Параметры P_{AV}/M , P_{AV}/V_{ABC} не носят эксплуатационный характер, а служат для сравнения эффективности различных воздушных систем охлаждения.

Предельно допустимые климатические воздействия на воздушные охладители:

температура окружающей среды от минус 60 до плюс 55°С;

атмосферное давление $(86 - 106) \cdot 10^3$ Па;

относительная влажность воздуха до 100% при температуре плюс 35°С;

окружающая среда взрывобезопасная и химически неактивная, не содержащая токопроводящую пыль, агрессивные газы или пары в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию;

охладители изготавливаются в климатических исполнениях О и Т,

категории размещения 2 по ГОСТ 15150-69

Предельно допустимые механические воздействия на воздушные охладители: охладители по стойкости к воздействию механических нагрузок соответствуют группе М27 условий эксплуатации (ГОСТ 17516-72) и выдерживают одиночные удары длительностью импульса 50мс и ускорением 4g;

90%-ый срок службы охладителей не менее 15 лет.

Охладители соответствуют требованиям ГОСТ 25293-82 и ТУ 16-729.377-83.

Гарантийный срок устанавливается 2 года с момента ввода охладителей в эксплуатацию.

МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Монтаж полупроводниковых приборов осуществляется по инструкции, изложенной в паспорте на охладитель.

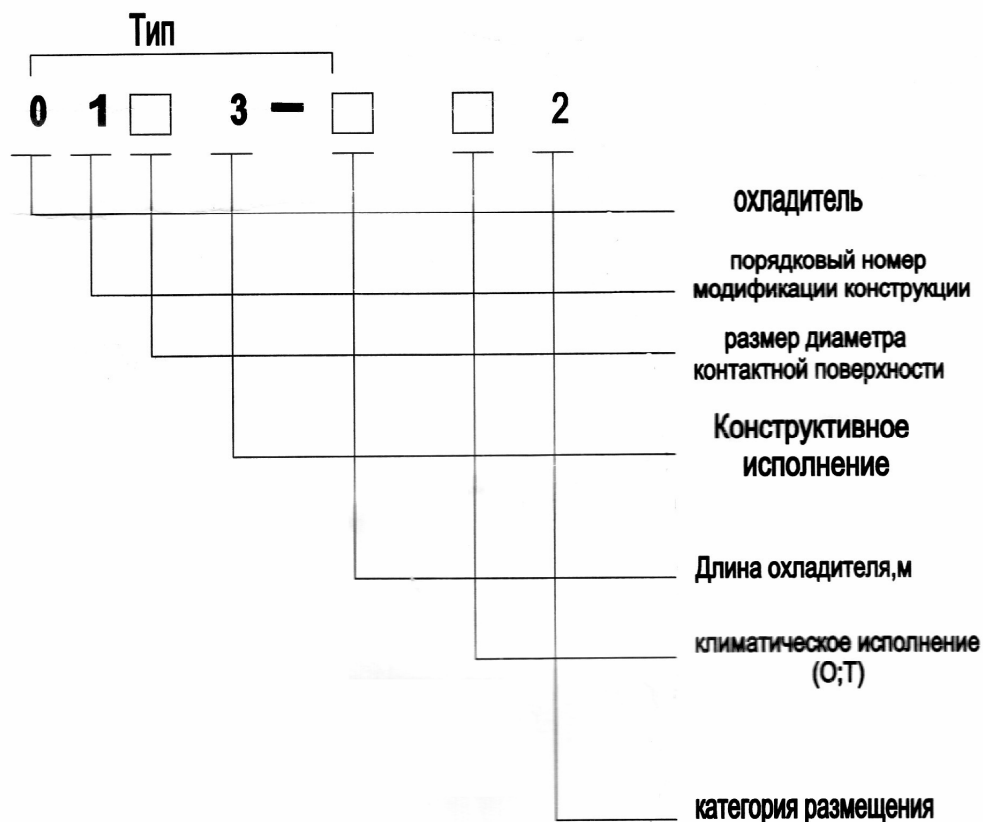
Охладители в изделиях должны располагаться таким образом, чтобы ребра их были параллельны направлению потока охлаждающего воздуха. Крепление односторонних охладителей в изделиях осуществляется при помощи Т-образных пазов (двусторонних охладителей за анодную или катодную часть охладителя). Неплоскостность контактной поверхности не более 0,025 мм, шероховатость – не более 1,6 мкм.

Надежный электрический и тепловой контакты обеспечиваются приложенным к охладителю осевым усилием сжатия, указанным в паспорте, отраслевом каталоге или технических условиях на конкретные типы приборов. Значение прогиба траверсы прижимного устройства, соответствующее определенному усилию сжатия, приводится в паспорте на охладитель.

Для уменьшения теплового контактного сопротивления между теплоотводом и токоотводом рекомендуется применение кремнийорганической пасты КПП-8 (ГОСТ 19783-74).

При определении теплового сопротивления (контактная поверхность охладителя – охлаждающая среда) контрольная точка измерения температуры устанавливается вблизи контактной поверхности (КП) охладителя с прибором на глубине от 1,5 до 2,0 мм и на расстоянии от оси охладителя на 2 мм меньше диаметра контактной поверхности прибора.

Структура условного обозначения охладителей.



Литература

1. Чернышев А.А., Иванов В.И., Аксенов А.И., Глушкова Д.И. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. – М: «Энергия», 1980, 217с.
2. Охладители серии ОА для полупроводниковых приборов штыревого исполнения. Информационный материал 05.20.04-81 – М: Информэлектро, 1981, 11с.
3. Охладители воздушных систем охлаждения для полупроводниковых приборов, таблеточного исполнения. Информационный материал 05.20.05-83 – М: Информэлектро, 1983, 8с.
4. Полупроводниковые приборы силовой электроники. Краткий каталог ОАО «Электровыпрямитель». – Саранск, 2004, 63с.
5. Охлаждающие системы прижимные устройства и изоляторы. Краткий каталог ОАО «Электровыпрямитель». – Саранск, 2007, 27с.

Таблица 1

Тип охлажда- теля	A?B?C, мм?мм?мм	м, кг	W	D, мм	S, H-м	Rthh-cf, °C/Вт			Rthh -cf, °C/Вт			P _{AV} , Вт	P _{AV} / M, Вт/кг	P _{AV} V _{ABC} , Вт/9м ³
						Vcf=0 м/с	Vcf=6 м/с	Vcf= 12м/с		Vcf=6 м/с	Vcf= 12м/с			
О 111	35?60?40	0,09	M5	18	1,0	5,6	-	-	0,2	-	-	-	-	-
О 121			M6	18	2,0	5,6			0,2					
О 221	45?60?60	0,153	M6	18	2,0	2,8			0,2					
О 131			M8	32	8,0	2,8			0,2					
О 141			M10	32	10	2,8			0,15					
О 231	45?80?80	0,36	M8	32	8,0	2,1	0,67	0,48	0,2	15	48	105	292	362
О 331			M8	32	8,0	2,1	0,67	0,48	0,2	15	48			
О 241			M10	32	10	2,1	0,67	0,48	0,15	15	42			
О 541			M12	32	25	1,9	0,67	0,48	0,1	15	48			
О 151			M12	32	25	1,9	0,67	0,48	0,1	15	48			
О 371			M20	38	50	1,9	0,67	0,48	0,04	15	48			
О 161	70?80?100	0,64	M16	38	40	1,12	0,35	0,28	0,04	18	53	197	308	352
О 171			M20	38	50	1,12	0,35	0,28	0,04	18	53			
О 471		0,75	M20	48	50	1,12	0,35	0,28	0,03	18	53			
О 181		0,62	M24	48	60	1,12	0,35	0,28	0,03	18	53			
О 271	110?110?100	1,57	M20	32	50	0,71	0,23	0,17	0,04	25	83	297	189	245
О 281			M24	48	60	0,71		0,17	0,03	25	83			

Таблица 2

Тип охлаждаителя	A?B?C, мм?мм?мм	M, кг	D, мм	N, кN	Rthh-cf, °C/Вт			Rthh- cf, оc/Вт	Δ P		P _{AV} , Вт	P _{AV} /M Вт/кг	P _{AV} /V _{ABC} , Вт/9M ³
					Vcf=0м/с	Vcf=6м/с	Vcf=12м/с		Vcf=6м/с	Vcf=12м/с			
О 232	30?80?100	1,3	42	15	1,12	0,355	0,28	0,03	18	53	140	108	193
О 242	110?110?100	2,1	55	26	0,67	0,236	0,17	0,02	25	83	212	101	175
О 342	126?150?130	3,36	58	26	0,53	0,17	0,10	0,01	20	75	291	87	118

Таблица 3

Тип охлаждаителя	A?B?C, мм?мм?мм	M, кг	D, мм	N, кN	Rthh-cf, °C/Вт			Rthh- cf, оc/Вт	Δ H, Па		P _{AV} , Вт	P _{AV} /M Вт/кг	P _{AV} /V _{ABC} , Вт/9M ³
					Vcf=0м/с	Vcf=6м/с	Vcf=12м/с		Vcf=6м/с	Vcf=12м/с			
О 123	100?100?122	1,84	22	6	0,71	0,212	0,15	0,2	20	50	240	130	197
О 143	135?150?125	2,67	42	10	0,5	0,125	0,1	0,015	30	105	400	150	160
О 243	170?150?125	5,0	42	15	0,28	0,08	0,065	0,01	30	105	625	125	140
О 343	170?150?150	4,5	42	15	0,355	0,1	0,08	0,01	30	105	500	11	132
О 153	170?150?176	5,2	55	26	0,26	0,07	0,08	0,005	30	105	720	138	180
О 253	170?150?146	4,7	55	26	0,355	0,1	0,075	0,005	30	105	500	111	132
О 353	170?150?156	4,9	55	26	0,335	0,1	0,075	0,005	30	105	500	111	120
О 173	170?250?225	12	6	45	0,195	0,06	0,03	0,003	35	115	840	71	93
О 273	200?250?195	13	76	45	0,185	0,055	0,045	0,003	40	130	910	70	91
О 373	200?250?225	13	76	45	0,185	0,055	0,045	0,003	40	130	910	70	91
О 193	300?300?275	22	100	80	0,101	0,03	0,0025	0,002	29	130	1670	76	67

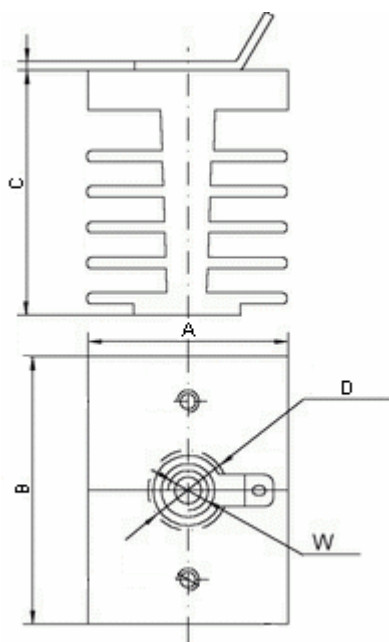


Рис.1

Односторонние охладители
O111, O121 для штыревых СПП

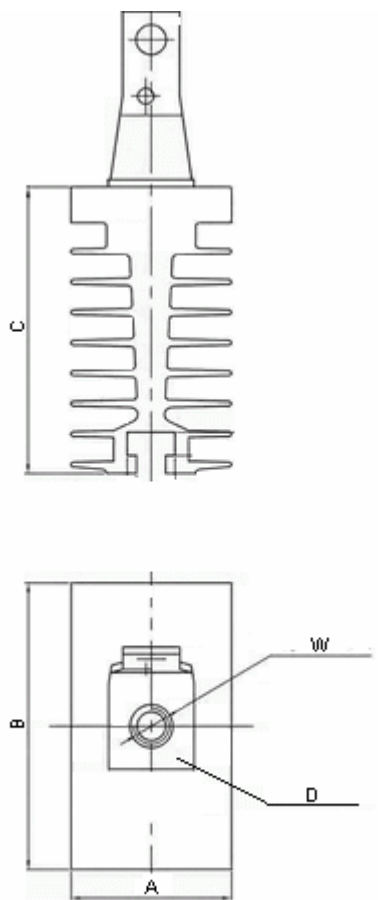


Рис.2.

Односторонние охладители
O121 O131, O231, O331, O141, O241,
O541, O151, O371 для штыревых СПП

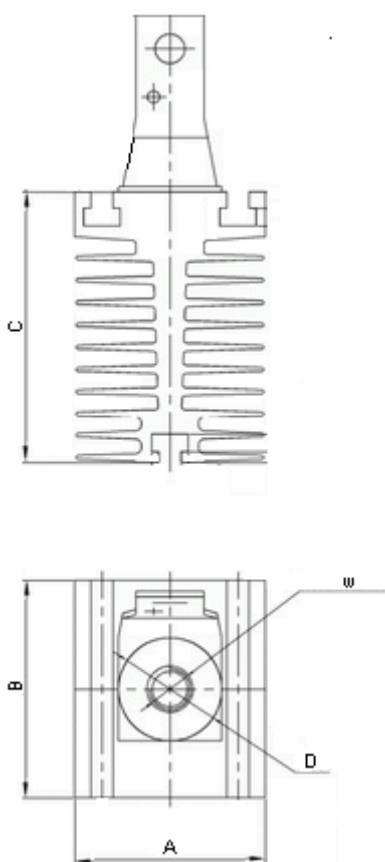


Рис.3

Односторонние охладители О161,
О171, О181 для штыревых СПП

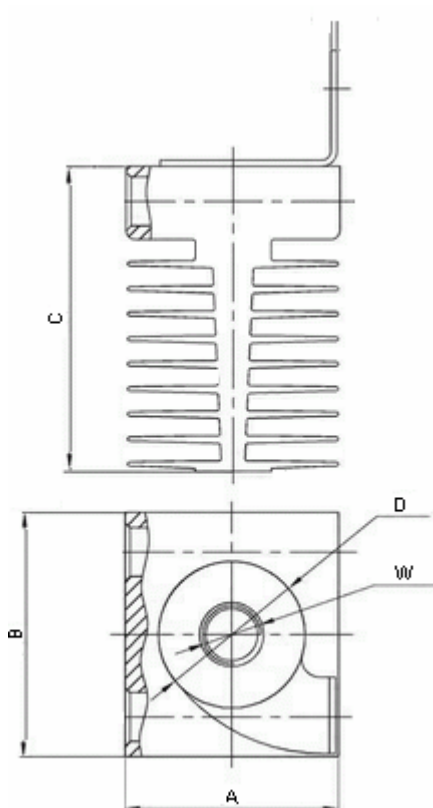


Рис.4

Односторонний охладитель
О471 для штыревых СПП

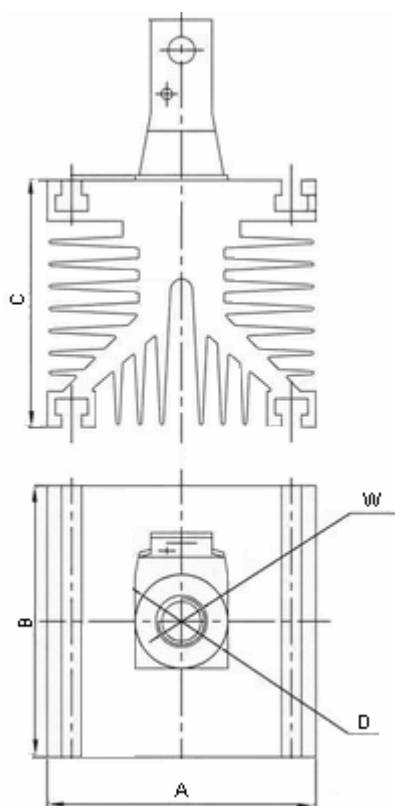


Рис.5

Односторонние охладители O271,
O281, для штыревых СПП

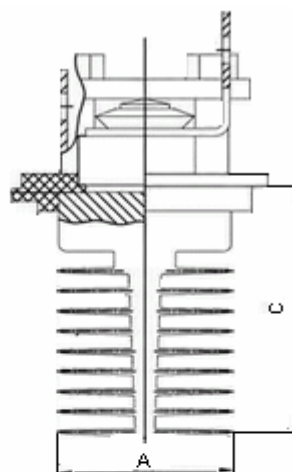


Рис.6

Односторонний охладитель O232
для таблеточных СПП

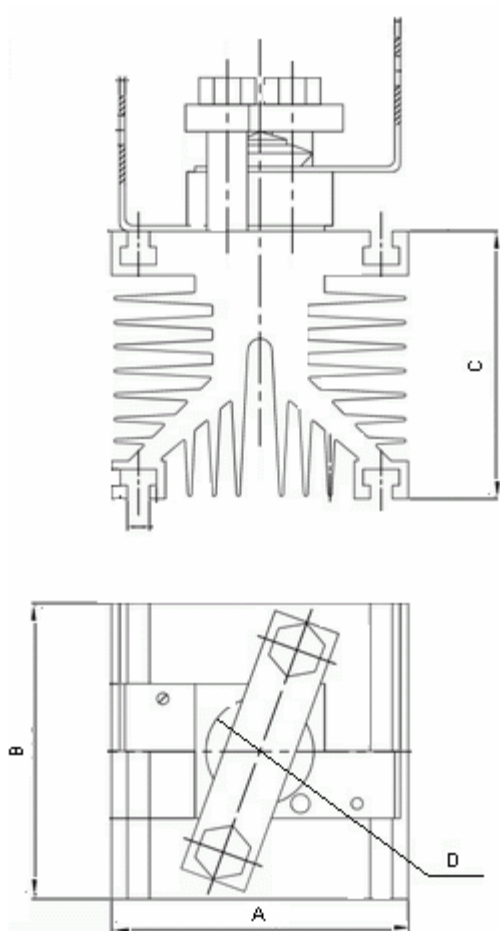


Рис.7
Односторонний охладитель
О242 для таблеточных СПП

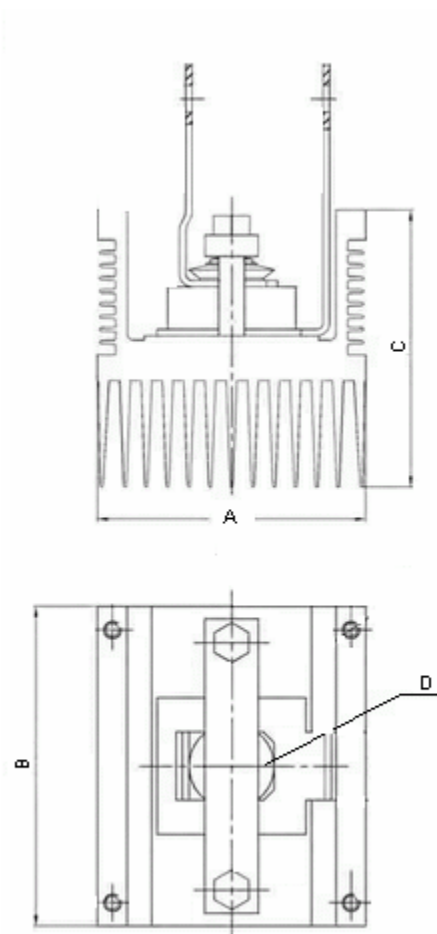


рис.8
Односторонний охладитель
О342 для таблеточных СПП

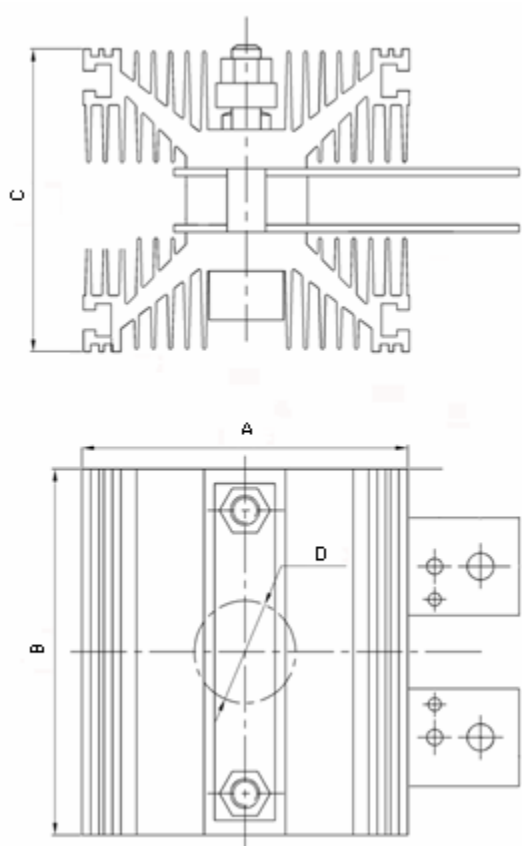


Рис.9

Двусторонние охладители О123, О143,
для таблеточных СПП

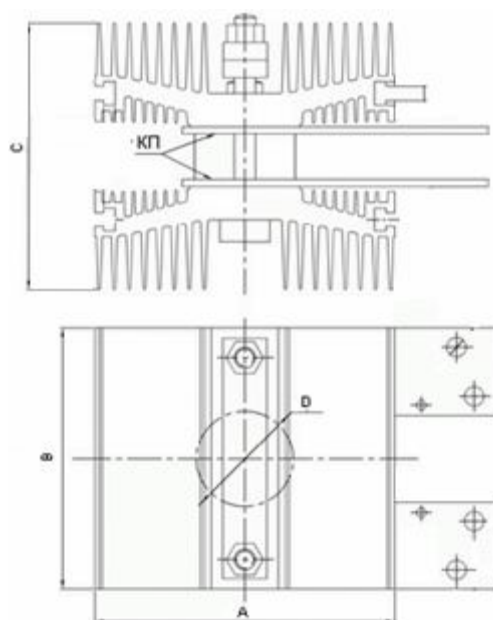


рис.10

Двусторонние охладители О343,
О253, О353 для таблеточных СПП

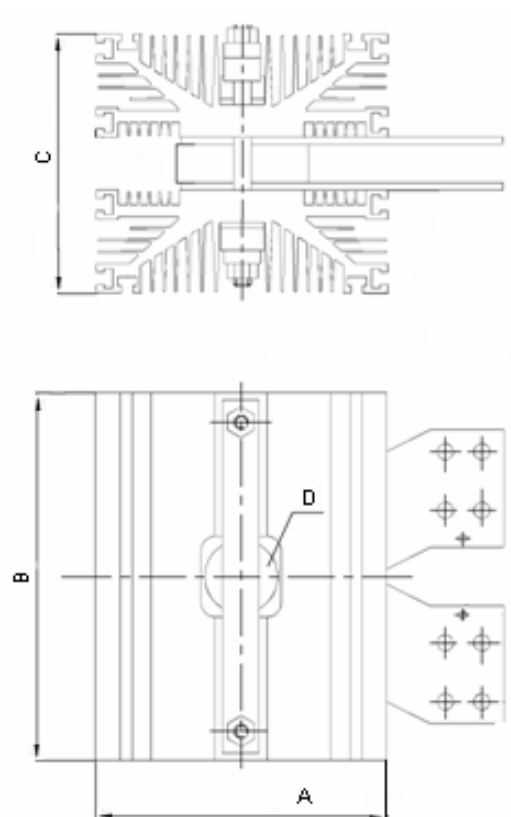


Рис.11

Двусторонние охладители О243, О153,
О173, О273, О373, О193 для таблеточных СПП