

Рекомендации по выбору теплового режима модулей питания

Александр ГОНЧАРОВ,
к. т. н.
Олег НЕГРЕБА

Важнейшим фактором, влияющим на надежность работы модулей питания и, как следствие, на надежность аппаратуры, в которую они установлены, является правильно выбранный тепловой режим их эксплуатации [1]. Известно, что повышение рабочей температуры электронных компонентов на 10 °С приводит к сокращению их наработки на отказ вдвое. Поэтому выбор оптимального теплового режима работы модулей питания в аппаратуре — одно из первоочередных мероприятий при построении системы питания. Задача данной статьи — дать потребителям модулей питания представление о способах отведения тепла, научить ориентироваться в кривых снижения мощности модулей и снизить вероятность ошибок при выборе продукции различных производителей. Эти ошибки могут быть связаны с использованием разных критериев при декларировании информации по тепловым характеристикам.

Импульсные модули питания обычно имеют значение коэффициента полезного действия (КПД) порядка 75–85%, что приводит к тепловым потерям внутри модулей питания, составляющим по величине 1/3–1/5 от мощности, поступающей в нагрузку. Если не отводить это выделяемое модулем тепло, он перегреется и выйдет из строя.

Существуют три механизма теплопередачи, позволяющих не допустить перегрев конструкции модулей сверх значений, указанных в их технической документации:

- излучение;
- теплопроводность;
- конвекция.

Излучение

Теплопередача излучением осуществляется посредством электромагнитных волн, которые излучают тела, нагретые до температуры выше окружающей среды. Для такого способа теплообмена не требуется про-

межучточное вещество, излучение осуществляется даже в вакууме. Интенсивность излучения зависит от степени черноты тела: предметы с темной поверхностью сильнее излучают (и поглощают) энергию, чем со светлой, поэтому черные, матовые поверхности теплоотводов поверхностей почти всегда предпочтительнее светлых и блестящих. Исключения составляют случаи, когда в непосредственной близости от теплоотвода располагаются еще более интенсивно греющиеся элементы, тогда черная поверхность радиатора будет, напротив, поглощать внешнее излучение. Теплопередача излучением обычно составляет не более 1/10 части от других способов теплопередачи, поэтому, как правило, расчетом излучения можно пренебречь и считать, что оно обеспечивает некоторый запас по температуре теплоотвода. При отсутствии вблизи модуля питания интенсивно греющихся элементов целесообразно применить химическое или гальваническое чернение его радиатора.

Теплопроводность

Теплопроводностью называют свойство материала передавать теплоту через свою толщину от более нагретой поверхности к поверхности с меньшей температурой. Показателем эффективности такого способа теплопередачи является коэффициент теплопроводности материала. Коэффициент теплопроводности измеряется в Вт/(м·К) или Вт/(м·°С) и показывает, какое количество тепла проходит вследствие теплопроводности в единицу вре-

мени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на 1 градус на единицу толщины материала. Наибольшей теплопроводностью обладают металлы, наименьшей — газы, теплопроводность вакуума равна нулю. В металлах теплопроводность осуществляется главным образом вследствие движения свободных электронов, поэтому лучшие проводники электрического тока одновременно являются и лучшими проводниками тепла.

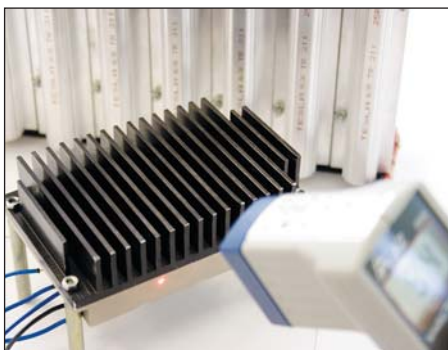
В таблице 1 приведены значения коэффициента теплопроводности для некоторых материалов.

Конвекция

Конвекция — перенос теплоты в жидкостях или газах потоками самого вещества. Существует естественная конвекция, когда нижние слои вещества при нагревании становя-

Таблица 1. Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)
Серебро	407
Медь	384
Оксид бериллия (бериллиевая керамика)	200–240
Дюралюминий	186
Латунь	111
Сталь	47
Номакон-GS	1–2
Паста КПТ-8	0,7–0,8
Слюда	0,43–0,6
Воздух	0,03
Вакуум	0



ся легче и поднимаются вверх, а верхние слои, наоборот, остывают, становятся тяжелее и опускаются вниз, и вынужденная (принудительная) конвекция, когда перемещение вещества обусловлено действием каких-то внешних сил (вентилятора, насоса и т. п.).

Для того чтобы правильно рассчитать тепловой режим модуля питания, необходимо в первую очередь оценить его тепловые потери в ваттах. Мощность тепловых потерь P_{diss} можно подсчитать по формуле:

$$P_{diss} = \frac{P_{out}}{\eta} - P_{out}, \quad (1)$$

где P_{out} — выходная мощность модуля питания, Вт; η — КПД модуля.

Величина КПД имеет выраженный нелинейный характер и зависит от входного и выходного напряжения модуля, от его номинальной выходной мощности и реального коэффициента загрузки по мощности и даже от температуры корпуса модуля.

В расчетах можно пользоваться ориентировочными значениями КПД 0,75–0,85, учитывая, что максимальным значениям КПД соответствует коэффициент загрузки модуля около 0,7, выходное напряжение более 15 В и номинальная выходная мощность более 100 Вт. К снижению КПД приводит низкое (до 5 В) выходное напряжение, работа на минимальную или максимальную нагрузку и небольшая (до 10 Вт) номинальная выходная мощность модулей.

Помимо расчетного определения мощности потерь можно получить и более точное ее экспериментальное значение. Для этого необходимо измерить входные и выходные значения напряжения и тока в тех электрических и температурных режимах, при которых модуль будет эксплуатироваться в аппаратуре, и по разности входной и выходной мощности вычислить мощность потерь. При этом следует учитывать, что для AC/DC-модулей из-за ярко выраженного импульсного характера потребляемого тока от сети переменного напряжения измерение потребляемой модулем мощности может привести к существенной ошибке, поэтому измерение необходимо проводить при питании AC/DC-модуля постоянным током от напряжения в 1,41 раза больше используемого переменного. Все измерительные приборы должны быть устойчивы к высокочастотным импульсным помехам, вольтметры следует подключать непосредственно к соответствующим выводам модуля.

Теперь можно сделать первый важный вывод. Выбор подходящего модуля питания необходимо начинать с тщательного изучения зависимости его КПД от различных электрических и температурных режимов эксплуатации. Такие справочные материалы обязательно предоставляют наиболее профессиональные и длительно работающие

на рынке производители. Наличие этой информации уже может являться преимуществом при выборе необходимого источника питания.

После того как стало известно, какую мощность P_{diss} необходимо отвести от модуля питания, чтобы не допустить его перегрев выше предельных значений, можно вычислить максимальное тепловое сопротивление теплоотводящей системы. От него зависит, насколько сильнее модуль питания будет нагреваться, чем окружающая его среда:

$$R_{max} = \frac{T_{max} - T_{amb}}{P_{diss}}, \quad (2)$$

где T_{max} — максимально допустимая температура корпуса модуля питания; T_{amb} — температура окружающего воздуха при эксплуатации модуля питания (необходимо учитывать также и тепловыделение соседних с модулем элементов).

Полученное значение теплового сопротивления необходимо сначала сравнить с тепловым сопротивлением «корпус модуля — окружающая среда» $R_{case-ambient}$, значение которого некоторые производители модулей питания приводят в технической документации (но, к сожалению, пока не все). Если значение $R_{case-ambient}$ меньше расчетного, то дополнительный радиатор для модуля не требуется — для отвода тепла достаточно площади поверхности самого модуля при отсутствии препятствий к свободной циркуляции окружающего воздуха.

В таблице 2 приведены типовые значения теплового сопротивления «корпус модуля — окружающая среда» $R_{case-ambient}$ для модулей питания серий МДМ и МАА, которые выпускает группа компаний «Александр Электрик» [2, 3].

Следует отметить, что величина теплового сопротивления различных конструкций, в том числе и металлических корпусов модулей питания, зависит, причем не линейно, от множества факторов. Имеет значение расположение конструкции в пространстве (насколько не затруднена свободная либо принудительная передача тепла в окружающую среду), величина рассеиваемой мощности, температура окружающей среды и разность температур окружающей среды и корпуса модуля питания. Однако в пределах допущений оценочного расчета теплового режима модулей питания величину теплового сопротивления $R_{case-ambient}$ можно считать постоянной.

Производители электронной аппаратуры часто приводят в технической информации лишь ограничение по максимальной температуре корпуса устройства, кратко и наиболее точно описывая требования по тепловым режимам изделия. При этом трудности по обеспечению необходимых условий эксплуатации возлагаются на потребителя. Поэто-

Таблица 2. Некоторые тепловые характеристики модулей питания серий МДМ и МАА

Габаритные размеры, мм	Номинальная выходная мощность, Вт	Тепловое сопротивление $R_{case-ambient}$ C/Вт (см. примечание)	Толщина основания радиатора, мм (не менее)
DC/DC-модули питания серии МДМ в корпусе с фланцами			
30×20×10	5	19,8	1,5
40×30×10	7,5	12,5	2,5
48×33×10	7,5, 10, 15	8,7	2,5
58×40×10	15, 20, 30	7,8	2,5
73×53×13	30, 50, 60	5,3	2,5
95×68×13	60, 100, 120	3,3	4
110×84×13	120, 160, 200, 240	3,0	4
AC/DC-модули питания серии МАА в унифицированном корпусе			
107,5×56,5×18,5	20	6,4	4
129,5×61,5×21,5	50	4,8	4
136,5×97,5×33	100, 150	2,7	6
195,5×106,5×40	200, 300	1,8	8
242,5×132,5×40	600	1,2	8
284,5×174,5×50,5	900	0,8	8

Примечание:

- 1) Модули питания серии МДМ без дополнительного теплоотвода впаиваются всеми выводами в печатную плату из фольгированного стеклотекстолита FR-4 с коэффициентом металлизации 20–30%, толщиной 1,5 мм и площадью, которая примерно вчетверо больше площади основания модуля.
- 2) Модули питания серии МАА прикручены теплоотводящей поверхностью к горизонтально расположенной пластиковой плите толщиной 15 мм.

му в первую очередь представляют интерес те фирмы, которые приводят так называемые типовые кривые снижения максимальной выходной мощности модулей без дополнительного теплоотвода в зависимости от температуры окружающей среды («тепловые кривые», или Derating curves). На них по горизонтальной оси отложены значения температуры окружающей среды, а по вертикальной — значения максимальной выходной мощности модуля питания, при которой температура корпуса не превысит своего предельного значения. Горизонтальный участок тепловой кривой соответствует максимальной долговременной мощности модуля питания, и температура корпуса модуля на этой части имеет примерно одинаковый перегрев ΔT относительно температуры окружающей среды T_{amb} , равный

$$\Delta T = R_{case-ambient} \times P_{diss}.$$

Спадающая часть тепловой кривой в области повышенных температур окружающей среды характеризуется одинаковой температурой корпуса, равной T_{max} . Это второй важный момент, на который необходимо обратить внимание при анализе тепловых характеристик модулей питания. Строго говоря, спадающая часть тепловой кривой из-за нелинейности характеристик КПД и теплового сопротивления корпуса модуля должна иметь нелинейный вид, близкий по форме к участ-

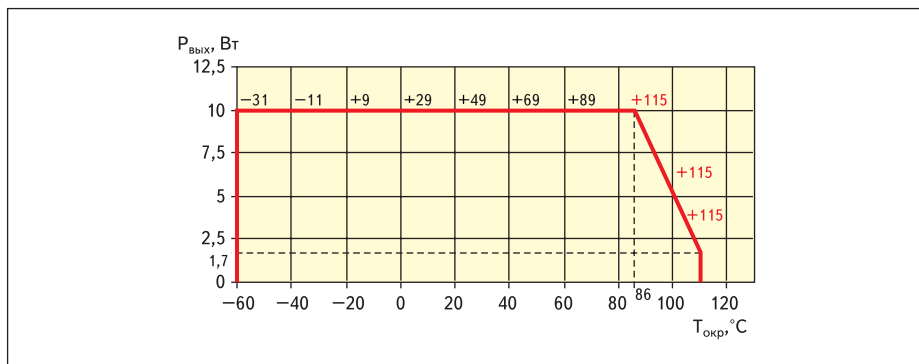


Рисунок. Тепловая кривая модуля питания МДМ10-1В27СУ (рядом с тепловой кривой указаны значения температуры корпуса модуля)

ку параболы. Однако в пределах выбранных погрешностей большинство производителей модулей питания заменяют нелинейность снижения выходной мощности одним или несколькими линейными отрезками.

Следующим, третьим, весьма важным аспектом является понимание смысла точки на оси температуры, к которой стремится спадающая часть тепловой кривой (точки нулевой мощности). По значению этой температуры можно оценить уровень используемой элементной базы и сложность примененных технологий, а также выявить явные ошибки, допущенные при некачественном подходе к исследованию тепловых режимов выпускаемой продукции.

Элементную базу, используемую для производства импульсных модулей питания можно условно разделить на четыре группы, различающиеся по достигнутому электрическим параметрам, стоимости реализации и надежности.

1. Группа компонентов электронной техники общего назначения, предназначенная для изделий коммерческого направления (General purpose, Commercial). Такие элементы характеризуются низкой стоимостью за счет отработанных временем технологий и очень больших объемов производства.
2. Компоненты категории Professional имеют более высокие электрические и температурные показатели по сравнению с первой группой. Это новейшие разработки ведущих мировых производителей. Стоимость таких изделий обычно значительно превышает стоимость компонентов категории общего назначения.
3. Группа компонентов Military имеет намеренно заниженные технические показатели по сравнению с первыми двумя группами — для достижения более высоких показателей надежности. Стоимость компонентов категории Military превосходит стоимость аналогичных компонентов из первых групп.
4. Компоненты электронной техники категории Special (High-Reliability, Space) являются изделиями, специально разработанными для применения в уникальных образ-

цах аппаратуры, например, в космических аппаратах.

Соответственно, модули питания ценовой категории Commercial, построенные на основе электронных компонентов аналогичного назначения, должны иметь точку нулевой мощности, напрямую связанную с ограниченной температурой эксплуатации составных элементов схемы, то есть не более +70...85 °C, категории Professional — до +85...105 °C, Military — до +105...130 °C и Special — до +150 °C.

Здесь мы подходим к четвертому важному выводу. Точка нулевой мощности модуля питания, не соответствующая адекватной стоимости его элементной базы, может указывать на недостаточно качественный подход производителя к расчету тепловых режимов схемы.

Очень профессионально к вопросу теплового режима выпускаемых модулей питания подходят, например, известные производители — International Rectifier, Artesyn Technologies и Vicor Corporation. Отечественные производители модулей питания, к сожалению, не приводят правильно тепловые характеристики. Лишь некоторые представители, в частности ЗАО «ММП-Ирбис», достаточно компетентно описывают тепловые параметры выпускаемой продукции.

Рассмотрим более подробно физический смысл тепловой кривой на примере DC/DC-модуля электропитания МДМ10-1В27СУ производства Группы компаний «Александр Электрик» с номинальной выходной мощностью 10 Вт [2, 3].

Из рисунка видно, что в диапазоне температур окружающей среды от -60 до +86 °C температура корпуса модуля будет находиться в допустимых пределах даже при работе на полную нагрузку 10 Вт. Перегрев ΔT корпуса модуля относительно температуры окружающей среды для мощности потерь $P_{diss} = 10 \text{ Вт}/0,75 - 10 \text{ Вт} = 3,3 \text{ Вт}$ на этом участке будет равен $\Delta T = 8,7 \text{ °C}/\text{Вт} \times 3,3 \text{ Вт} = 29 \text{ °C}$, то есть при температуре окружающей среды -60 °C корпус модуля будет иметь температуру около -31 °C, а при температуре окружающей среды +86 °C — около 115 °C. При

дальнейшем повышении температуры окружающей среды температура корпуса модуля превысит предельное значение +115 °C. Чтобы этого не произошло, требуется либо применение дополнительного теплоотвода при сохранении мощности нагрузки 10 Вт, либо снижение выходной мощности. Спадающей части тепловой кривой соответствует температура корпуса модуля +115 °C, при максимальной температуре среды +110 °C максимальная выходная мощность модуля будет равна 1,7 Вт. Площадь, ограниченная на графике тепловой кривой, является областью допустимых режимов работы модуля питания без использования радиатора, при условии свободной циркуляции окружающего воздуха. Здесь следует напомнить, что для повышения надежности системы питания рекомендуется эксплуатировать модуль с коэффициентом загрузки по мощности не более 0,7 и не допускать длительной работы при температурах корпуса, близких к максимальной допустимой.

Если площади поверхности модуля питания не достаточно для обеспечения приемлемой температуры корпуса, необходимо применить специальные меры для отвода тепла: использовать дополнительный радиатор или принудительный обдув.

По тепловой кривой можно вычислить величину теплового сопротивления $R_{case-ambient}$, учитывая, что в точке начала снижения выходной мощности температура корпуса равна максимально допустимой:

$$R_{case-ambient} = \frac{T_{max} - T_{derating}}{P_{diss}}, \quad (3)$$

где $T_{derating}$ — температура окружающей среды, при которой начинается снижение выходной мощности.

При анализе тепловых кривых модулей питания, выпускаемых отечественными фирмами, иногда встречаются явные ошибки. Так, например, тепловой расчет, приведенный в статье [4], показывает, что тепловые потери модуля питания серии МДМ160-ЕП мощностью 160 Вт с имеющейся эффективной площадью поверхности теплоотдачи около 105 см² и заявляемым КПД 80% при мощности нагрузки 160 Вт приведет к тому, что температура корпуса при +105 °C окружающей среды достигнет отметки около 390 °C (!). При этом в каталоге и на сайте того же производителя утверждается, что этот модуль питания способен работать без снижения мощности вплоть до температуры +105 °C без дополнительного теплоотвода, и температура корпуса не превысит предельного значения +125 °C. В данном случае температура начала снижения выходной мощности без использования дополнительного радиатора должна находиться далеко в области отрицательных температур. На неправильные данные указывает и то, что спадающая часть теп-

ловых кривых рассмотренных в этой статье модулей питания МДМ10-ЕП и МДМ160-ЕП стремится к нереально высоким температурам +149 °С и +133 °С для применяемой в этих модулях импортной элементной базы категории Commercial.

Выбор конструкции радиатора обычно производится с учетом компоновки модуля питания в аппаратуре; весьма часто приемлемым теплоотводом может являться шасси или металлическая стенка прибора. Ориентировочно, в первом приближении, оценить необходимую площадь поверхности алюминиевого радиатора можно из следующего соотношения: для обеспечения перегрева модуля питания на 35 °С выше температуры окружающей среды потребуется радиатор площадью 20 см² на каждый ватт рассеиваемой мощности, то есть минимальная площадь алюминиевого радиатора $S_{heatsink}$ в квадратных сантиметрах равна:

$$S_{heatsink} \approx \frac{20 \times 35 \times P_{diss}}{T_{max} - T_{amb}}, \quad (4)$$

где P_{diss} — мощность тепловых потерь, Вт; T_{max} — максимально допустимая температура корпуса модуля питания, °С; T_{amb} — температура окружающего воздуха, °С.

Рассчитаем, например, площадь дополнительного радиатора для эксплуатации рассматриваемого модуля питания МДМ10-1В27СУ при температуре +100 °С на нагрузку мощностью 7,5 Вт.

- По техническим условиям минимальное значение КПД модуля $\eta = 0,75$.
- Максимальная температура корпуса $T_{max} = 115$ °С.
- Мощность тепловых потерь по (1) будет равна:

$$P_{diss} = 7,5 \text{ Вт} / 0,75 = 7,5 \text{ Вт} = 2,5 \text{ Вт}.$$

- Тепловое сопротивление необходимой теплоотводящей системы по (2) должно быть не более:

$$R_{max} = (115 - 100 \text{ °С}) / 2,5 \text{ Вт} = 6 \text{ °С/Вт}.$$

Имеющееся значение теплового сопротивления $R_{case-ambient} = 8,7$ °С/Вт для корпуса МДМ10-1В27СУ превышает расчетное значение, что также подтверждает необходимость использования радиатора.

Можно воспользоваться готовым радиатором, тепловое сопротивление которого в паре с корпусом выбранного модуля не превышает 6 °С/Вт (данные теплового сопротивления часто приводятся в документации на радиатор), или рассчитать примерную площадь алюминиевой теплоотводящей системы по формуле (4):

$$S_{heatsink} \approx (20 \times 35 \times 2,5) / (115 - 100) = 116 \text{ см}^2.$$

При изготовлении теплоотвода в виде пластины или при использовании алюминиевой стенки аппаратуры можно учитывать и площадь поверхности модуля питания, участвующую в теплообмене с окружающей средой. В данном случае достаточен квадратный алюминиевый теплоотвод размером примерно семь на семь сантиметров, либо участок стенки аппаратуры аналогичной площади. Толщина теплоотводящей пластины или основания радиатора должна обеспечивать равномерность распределения тепла по теплоотводу. Примерные значения толщины основания радиатора приведены в таблице 2.

При компоновке модуля питания в аппаратуре необходимо обращать внимание на правильное расположение его теплоотводящей системы в пространстве. Естественный или принудительный конвекционный поток воздуха должен беспрепятственно «омывать» теплоотводящую поверхность корпуса или ребра радиатора. При этом более эффективным будет такое расположение теплоотводящих поверхностей, когда нагретый поток воздуха как можно быстрее отводится от места теплообмена.

Возможна следующая экспресс-методика определения тепловых характеристик приобретаемых модулей питания. Необходимо в нормальных климатических условиях подключить выбранный модуль к нагрузке мощностью около 10% от максимальной. После установления теплового равновесия убедиться, что температура корпуса модуля не превышает предельного значения, указанного в технической документации. Далее, плавно или ступенчато увеличивая нагрузку модуля, следует достичь такого теплового баланса, при котором температура корпуса модуля станет равной максимально допустимой. В этой точке можно будет измерить КПД, вычислить мощность потерь, значение теплового сопротивления и сравнить полученные величины с тем, что вы ожидали, и с декларируемыми производителем характеристиками. Такой простейший метод позволит сделать вывод о пригодности модуля питания для применения в аппаратуре без дополнительного теплоотвода или послужит хорошей основой для экспериментов с радиатором.

Дополнительный вклад в тепловое сопротивление теплоотводящей системы вносит переход «модуль питания — радиатор». Для снижения этого переходного теплового сопротивления необходимо применять специальную теплопроводящую пасту, обращая внимание на площадь и плоскостность контакта соприкосновения модуля и радиатора, равномерность распределения пасты и ее минимальную толщину. При применении пасты или теплопроводящей изоляционной прокладки дополнительное тепловое сопротивление можно оценить по следующей формуле:

$$R_p = \frac{\delta_p}{\lambda \times S_p}, \quad (5)$$

где δ_p — толщина прокладки или слоя пасты; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); S_p — площадь прилегания прокладки или слоя пасты.

Значительно снизить размеры теплоотводящей системы, а в некоторых случаях и вообще от нее отказаться позволяет применение принудительной конвекции при помощи вентилятора. Поток воздуха через теплоотводящую поверхность модуля питания или через его радиатор со скоростью 1 м/с (60 м/мин) снижает тепловое сопротивление примерно в два раза, то есть вдвое увеличивает эффективную площадь теплоотвода по сравнению со свободной конвекцией.

При использовании вентиляторов в качестве источников обдува необходимо обращать внимание на их время наработки на отказ и своевременно проводить их техническое обслуживание, особенно при условиях эксплуатации в запыленных помещениях, так как заклинивание вентилятора может привести к перегреву и выходу из строя модуля питания.

Еще одной особенностью воздушных систем охлаждения является снижение их эффективности при увеличении высоты над уровнем моря или при снижении атмосферного давления. Так, например, уже на высоте 3500 м эффективность как естественного конвективного, так и принудительного воздушного охлаждения снижается на 25%.

Трудность в определении многочисленных параметров, влияющих на теплообменные эффекты, делает тепловые расчеты сложной и неточной задачей, однако понимание физики происходящих процессов помогает реализовать наиболее качественную систему охлаждения. Изготовители импульсных источников питания предлагают готовые системы охлаждения, наиболее подходящие к выпускаемой ими продукции, специалисты профессионально подготовленных фирм-производителей безусловно ответят на все ваши вопросы, помогут избежать множества ошибок, быстро проанализировать различные варианты теплоотвода в аппаратуре и выбрать из них лучший, сократить время разработки системы охлаждения и на порядок повысить ее эффективность. ■

Литература

1. Гончаров А. Практика применения конверторных модулей класса DC/DC // Электронные компоненты. 1999. № 1–3.
2. www.aeps-group.ru
3. Каталог продукции группы компаний «Александр Электрик» 2007 г.
4. Нагайцев А., Твердов И. Новые модули питания с широким (4:1) диапазоном входных напряжений // Электрическое питание. Выпуск 7. Научно-технический сборник докладов 1-й всероссийской конференции по средствам электропитания.