

Рекомендации по выбору теплового режима модулей электропитания. Часть 2

«Командир — солдатам: У меня для вас две новости: хорошая и плохая. С какой начнем? С плохой, — вздохнули солдаты...»

Александр ГОНЧАРОВ,
к. т. н.
Олег НЕГРЕБА

На примере модулей DC/DC авторы продолжают рассматривать различные способы отведения тепла, разъясняют особенности использования кривых снижения мощности и дают рекомендации по выбору модулей различных производителей с позиций тепловых характеристик.

«Плохие новости»

Трудное это дело — рассказывать о тепловых тонкостях применения модулей. Вспомним главное из первой части нашей статьи [1] и поговорим о новых моментах.

Было определено, что все «плохое» начинается с КПД. Действительно, тепловые потери зависят в первую очередь от КПД:

$$P_{diss} = \frac{P_{out}}{\eta} - P_{out}$$

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

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

Разброс КПД может быть значителен, а мощность потерь при ухудшении КПД растет очень быстро — так, например, изменение КПД на 10% с 0,8 до 0,7 приводит к ее увеличению в 1,7 раза.

Для модулей малой мощности характерно использование простой структуры обратного преобразователя, которая является не самой энергетически эффективной. Поэтому КПД для выхода 5 В (всегда будем использовать это значение как наиболее типовое), скорее всего, окажется в пределах 0,75–0,86 (в данной статье не рассматриваются модули с синхронными выпрямителями, имеющие свою специфику). Значения КПД 0,75–0,78 свойственны модулям малой мощности 3–10 Вт, работающим в широком диапазоне температур корпуса (от –60 до +85...+100 °С). Особенно

заметно снижение КПД у модулей электропитания, работающих в диапазоне изменения напряжения сети 4:1 и более [2], а также с высокими значениями максимальной температуры +100...+135 °С, когда происходит работа при малом коэффициенте заполнения, резко возрастает сопротивление канала полевых транзисторов, а также в сотни и тысячи раз увеличиваются токи утечки диодов Шоттки. Даже такая уважаемая фирма, как Interpoint, для 125-градусного модуля на 5 Вт указывает скромный КПД = 0,68–0,7.

Для модулей большей мощности КПД растет, особенно при уже оправданном в этом случае переходе на более сложную и эффективную структуру прямоходового преобразователя, однако растут локальные перегревы в теле модуля, увеличивается неравномерность распределения тепла в объеме. В результате можно рассчитывать на КПД, равный лишь 0,8–0,86 для модулей мощностью более 20 Вт, а для широкого диапазона температур и входных напряжений более реальны значения КПД 0,78–0,82.

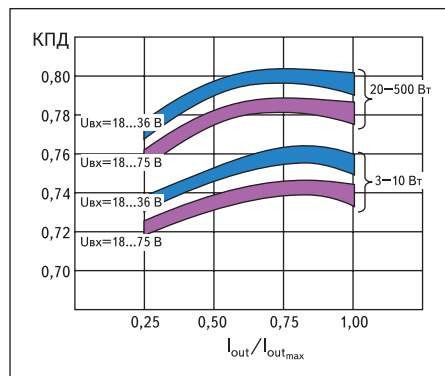


Рис. 1. Типовые зависимости КПД от выходного тока

Первый вывод: начните выбор подходящего модуля питания с изучения зависимости его реального КПД от различных электрических и температурных режимов эксплуатации. На рис. 1 показаны типовые зависимости КПД от выходного тока для модулей мощностью 3–10 Вт и 20–500 Вт. Эти универсальные данные подходят практически для всех видов модулей классов DC/DC и AC/DC (у которых также есть понятие широкого диапазона напряжения сети).

Следующим важным параметром модуля электропитания является максимальное тепловое сопротивление R_{max} теплоотводящей системы, которое определяет перегрев модуля над окружающей его средой:

$$R_{max} = \frac{T_{max} - T_{amb}}{P_{diss}}$$

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

В этом определении для разработчика больше «плохого», чем хорошего. Дело в том, что практически вся выходная мощность модулей, поступающая в питаемую аппаратуру, как правило, рассеивается в ограниченном объеме. Поэтому в таких случаях для модуля страшен не собственный перегрев из-за не очень высокого КПД, а тепловой фон, создаваемый его потребителями в замкнутом объеме. Распространенной ошибкой разработчиков является игнорирование собственного тепла аппаратуры, когда за основу берется температура внешней окружающей среды.

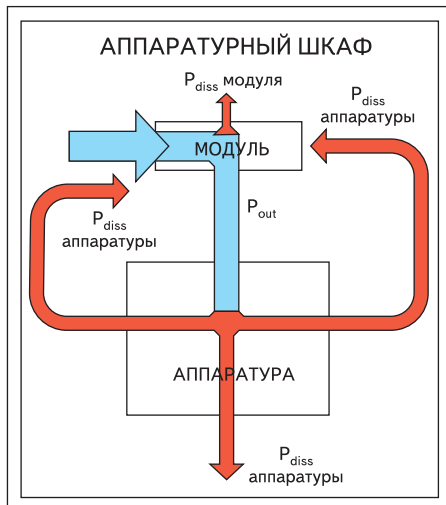


Рис. 2. Тепловые потоки вокруг модуля электропитания

Другая неприятность заключается в том, что и сам модуль вносит лепту в повышение окружающей температуры. И здесь лучшей рекомендацией может быть только натуральный эксперимент на основе практически установившегося теплового равновесия. На рис. 2 показаны тепловые потоки вокруг модуля электропитания в замкнутом объеме температурного шкафа.

Полученное значение R_{max} необходимо сначала сравнить с тепловым сопротивлением «Корпус модуля — окружающая среда» $R_{case-ambient}$ величину которого производители модулей питания приводят в технической документации, например, в технических условиях [3]. В случае, если $R_{case-ambient}$ меньше расчетного, дополнительный радиатор для модуля не требуется — для отвода тепла достаточно площади поверхности самого модуля при отсутствии препятствий для свободной циркуляции окружающего воздуха.

Наконец, весьма полезными являются типовые кривые снижения максимальной выходной мощности модулей без дополнительного теплоотвода в зависимости от температуры окружающей среды («тепловые

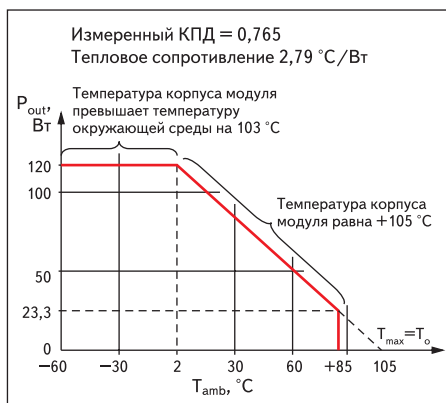


Рис. 3. Тепловая кривая реального модуля с невысоким КПД

кривые», или Derating curves) (рис. 3). 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 $\Delta T = R_{case-ambient} \times P_{diss}$.

Хотим обратить внимание читателей на то, что спадающая часть тепловой кривой в области повышенных температур окружающей среды характеризуется одинаковой температурой корпуса, равной T_{max} , в данном случае $+105\text{ °C}$ [1].

Понимание смысла точки на оси температуры, к которой стремится спадающая часть тепловой кривой (точки нулевой мощности T_0), позволяет оценить уровень используемой в модуле элементной базы и сложность примененных технологий, а также выявить явные ошибки, допущенные при некачественном подходе к исследованию тепловых режимов выпускаемой продукции. Необходимо отметить, что точка пересечения тепловой кривой с осью температуры (на рассматриваемом графике $+85\text{ °C}$) не может быть точкой T_{max} , если в этой точке имеется ненулевая выходная мощность. Такое совпадение всегда свидетельствует о недостоверности информации.

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

$$R_{case-ambient} = \frac{T_{max} - T_{derating}}{P_{diss}}$$

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

Далее рассмотрим реальные возможности работы модуля при декларируемой производителем максимальной температуре корпуса.

Как правило, каждый модуль имеет внутреннюю тепловую защиту в виде термоэлемента (обычно это специальная микросхема), расположенного в непосредственной близости от наиболее чувствительного к перегреву элемента модуля, рядом с силовым транзистором или микросхемой контроллера ШИМ. Естественно, термоэлемент реагирует на температуру в той точке внутреннего объема модуля, где он сам находится. Однако максимальная температура корпуса модуля в зависимости от конструкции аппаратуры может резко отличаться от температуры термоэлемента.

На рис. 4 показан модуль в разрезе с неудачными конструктивными особенностями применения в аппаратуре. Сам модуль закреплен на пластиковом основании с низкой теплопроводностью, выводы модуля соединены с аппаратурой гибкими проводниками, радиатор для модуля не используется, поскольку потребитель уверен, что он будет нагружать модуль на пониженную мощность, а в случае нечаянного перегрева модуля от собственного выделяемого модулем тепла сработает тепловая защита в модуле. На рисунке показано, что вследствие незначительной толщины корпуса модуля образуется тепловой концентратор, тепловое пятно на корпусе, так как тепло «не хочет» распространяться вдоль тонкостенной конструкции. Именно в тепловом пятне и будет максимальная температура корпуса модуля. В результате изделие сможет надежно работать только при недопустимо низкой температуре окружающей среды. (Авторы не рекомендуют такое использование модулей электропитания!)

На рис. 4–6 обозначены: 1 — силовой транзистор; 2 — корпус модуля; 3 — температурный датчик; 4 — пластиковое основание; 5 — гибкие проводники; 6 — тепловыравнивающая пластина; 7 — место пайки корпуса модуля к печатной плате; 8 — печатная плата; 9 — радиатор.

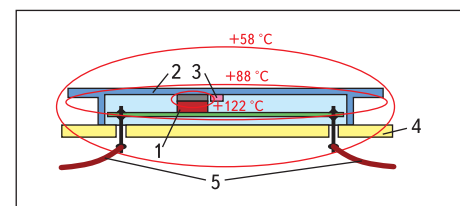


Рис. 4. В разрезе модуль с характерными («плохими») конструктивными особенностями применения в аппаратуре

На рис. 5 показан модуль с более правильными — «хорошими» конструктивными особенностями применения в аппаратуре. Сам модуль припаян к достаточно толстой (2,5 мм) двухсторонней печатной плате из материала FR4 с металлизацией — фольгой 0,15 мм, на которой практически вся площадь под модулем и вблизи него занята металлизацией [4]. Корпус модуля посажен вплотную на печатную плату до касания с металлизацией и дополнительно припаян к металлизации. На верхней стороне корпуса с помощью теплопередающей пасты размещена тепловыравнивающая медная (алюминиевая) пластина (тонкостенная перегородка аппаратурного шкафа). В результате тепловой концентратор исчез, перегрев модуля уменьшился, что при той же максимальной температуре корпуса позволило поднять максимальную температуру окружающей среды до значения $+65\text{ °C}$.

Наконец, на рис. 6 дополнительно показан радиатор с толстым основанием — ре-

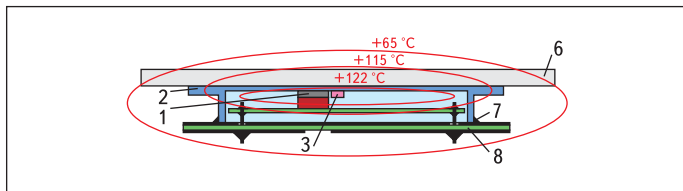


Рис. 5. Модуль с более правильными конструктивными особенностями применения в аппаратуре

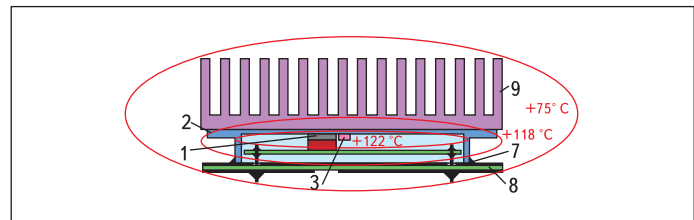


Рис. 6. Модуль с радиатором и печатной платой (наилучший вариант)

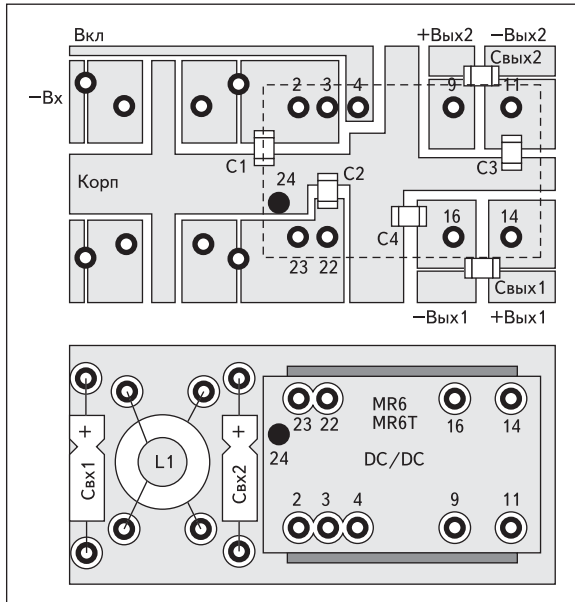


Рис. 7. Топология печатной платы для модуля MR6-T группы компаний «Александр Электрик»

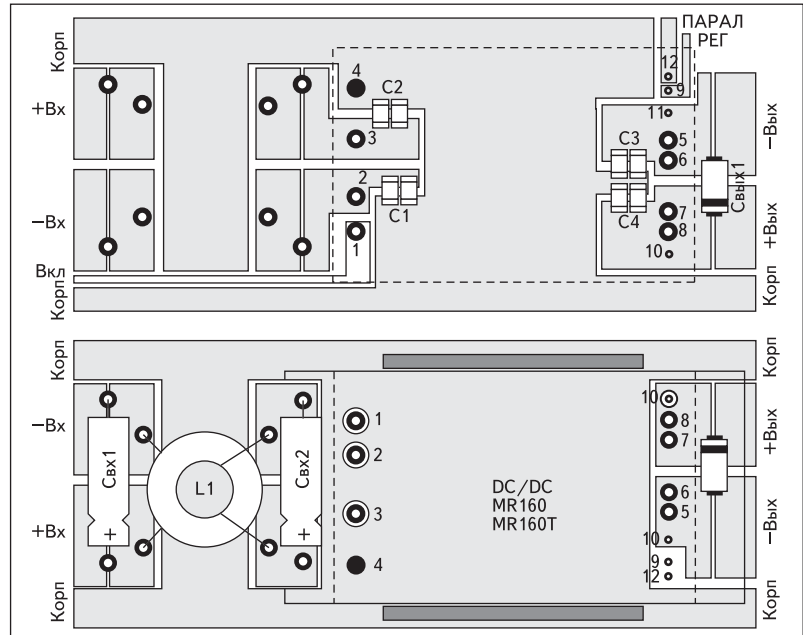


Рис. 8. Топология печатной платы для модуля MR160-T группы компаний «Александр Электрик»

шение с «отличными» конструктивными особенностями. В результате перегрев модуля стал еще меньше, а максимальная температура окружающей среды увеличилась до значения +75 °С.

Для пояснения рисунков печатных плат мы приводим топологию, рекомендованную группой компаний «Александр Электрик» для модулей серии MR-T [4] с максимальной температурой корпуса +125 °С (рис. 7, 8).

Вот, собственно, и все «плохие» новости.

«Хорошая новость»

«Хорошая» новость (которая, как известно, была хорошей только для командира) заключается вот в чем. У нас появилась уникальная возможность показать уважаемым читателям пользу вышеприведенных методик для реального определения тепловых характеристик модулей электропитания любой фирмы, рекламирующей свои достижения, независимо от того, сколько достоверна рекламная информация. Помог этому критический отзыв на нашу работу [5].

Мы еще раз тщательно ознакомились с материалами [6] по рекламируемым модулям МДМ-ЕП и после анализа и практических исследований получили следующие результаты, размещенные в таблице.

Обращаем внимание читателей на большое расхождение данных в 7-м и 15-м столбцах. Реальные, экспериментально измеренные значения тепловых сопротивлений сильно отличаются от рассчитанных по методике [7–8], которая обычно применяется как предварительная.

Таблица. Характеристики модулей электропитания

Модуль питания	Габариты, мм			Площадь поверхности без доннышки, см ² по методике статьи [10–11]	Расчетное тепловое сопротивление (исходя из тепловой кривой) [6–9], °С/Вт	Расчетное тепловое сопротивление из соотношения 25 см ² = 30 °С/Вт	Максимальная температура среды при нулевой мощности (по материалам [6–9]), °С	Температура начала снижения мощности на тепловой кривой [6–9], °С	Расчетная температура начала снижения мощности, °С	Заявляемый КПД [6–9]	Расчетное значение тепловых потерь при максимальной нагрузке, Вт	Реальный перегрев корпуса модуля над окружающей средой при максимальной нагрузке, °С	Реальная температура корпуса модуля в точке начала снижения мощности, °С	Измеренное значение теплового сопротивления модуля, °С/Вт	Максимальная температура среды при нулевой мощности, °С	Температура начала снижения мощности на тепловой кривой, °С
	Д	Ш	В													
МДМ20-ЕП	47,5	33,0	10,0	31,8	5,72	23,6	133,6	105	16	0,8	5,0	118	223	8,7	125	81,3
МДМ40-ЕП	57,5	40,0	10,0	42,5	2,86	17,6	133,6	105	-43	0,8	10,0	176	281	7,8	125	46,6
МДМ80-ЕП	72,5	52,5	12,7	69,8	1,43	10,7	133,6	105	-81	0,8	20,0	215	320	5,4	125	17,6
МДМ160-ЕП	95,0	67,5	12,7	105,4	0,72	7,1	133,6	105	-151	0,8	40,0	285	390	3,3	125	-7,4

Использование МДМ160-ЕП мощностью 160 Вт с имеющейся эффективной площадью поверхности теплоотдачи около 105 см² и с КПД 80% приведет к тому, что температура корпуса при +105 °С окружающей среды достигнет отметки около 390 °С (!, если верить методике [10–11])

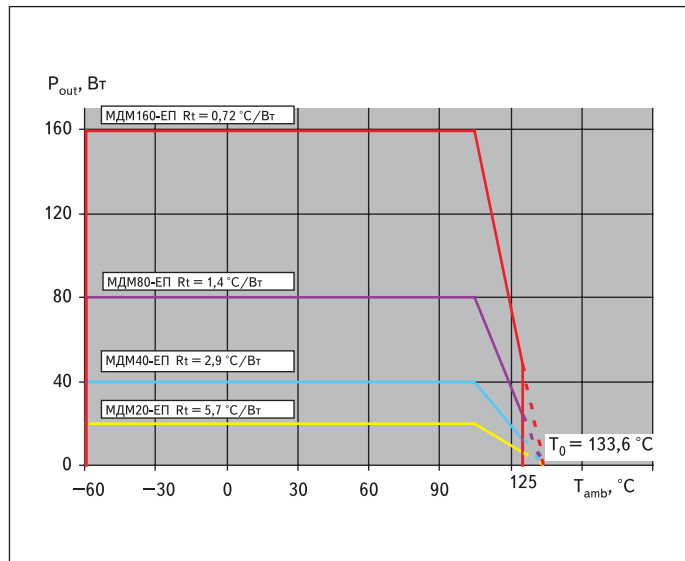


Рис. 9. Декларируемые в [6] тепловые кривые

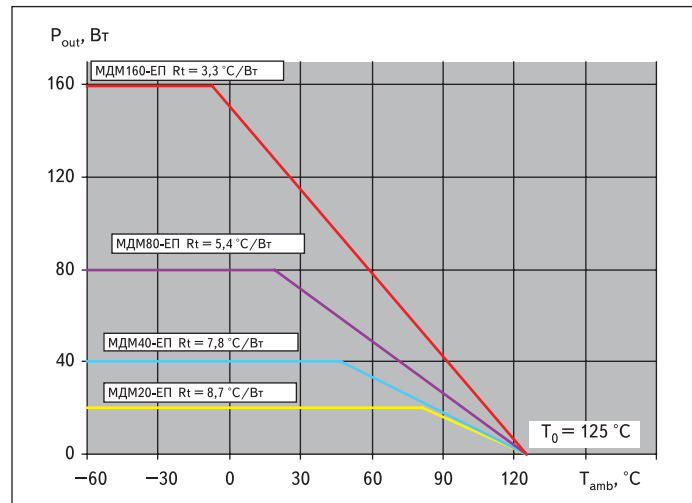


Рис. 10. Реальные тепловые кривые, построенные на основе экспериментально измеренных тепловых сопротивлений корпусов модулей МДМ-ЕП, минимизированных за счет использования теплопроводящих свойств печатной платы

Приведенные в [6] информационные материалы (по состоянию на 12.02.08) содержат тепловые кривые для модулей МДМ-ЕП, показанные с возможными непринципиальными погрешностями на рис. 9.

На рис. 10 приведены рассчитанные нами реальные тепловые кривые при использовании отвода тепла через печатную плату — проведенные натурные эксперименты показали хорошее совпадение практики и теории.

По нашему убеждению, это максимум того, что можно достичь в рекламируемых [6] модулях электропитания. Внимательному читателю необходимо сравнить рис. 9 и рис. 10 и самому сделать выводы о том, сколь может отличаться реклама от реалий. Например, рекламируется получение при температуре 90 °С для МДМ-ЕП номинальной мощностью 20, 40, 80 и 160 Вт выходной мощности 20, 40, 80 и 160 Вт соответственно. Реально потребитель, купив такую продукцию, скорее всего не получит более чем примерно 16, 18, 30 и 42 Вт соответственно. Ошибка в ожиданиях может достигать до 300%, а что это для производителя аппаратуры, у которого сроки для разворачивания производства истекли?

Полезные результаты применения изложенных авторами методик

1. Декларируемые графики на рис. 9 дают нереально заниженные значения тепловых сопротивлений, «превосходящие» в 3–7 раз показатели лучших мировых производителей модулей электропитания, например, VICOR. Реально измеренные значения тепловых сопротивлений корпусов модулей [6] отличаются от декларируемых в худшую сторону, при этом ошибка достигает до 350%.
2. Аппроксимируемая точка T_0 , значение которой на графиках [6–8] равняется примерно 133,6 °С, не соответствует реальным возможностям применяемой элементной базы категории Commercial. Ряд применяемых элементов не может надежно работать при температурах более +125 °С.
3. Ошибка в температурной точке начала снижения выходной мощности [6–8] составляет 150–450%.
4. Реальные тепловые кривые, рассчитанные даже по методике самих авторов работ [7, 8], не оставляют у покупателя надежд

на получение приемлемой мощности при температурах окружающей среды +125 °С.

5. Совпадение температуры вертикального правого участка тепловых кривых со значением максимальной температуры корпуса является ошибкой, так как температура корпуса в этой точке будет равна +133,6 °С и никогда не будет равной декларируемой +125 °С.
6. Авторы настоящей статьи подтверждают, что модули электропитания с характеристиками, указанными на сайте [6], будут иметь нереально высокие температуры корпуса: от +223 °С для МДМ20-ЕП до +390 °С для МДМ160-ЕП!

Литература

1. Гончаров А., Негреба О. Рекомендации по выбору теплового режима модулей питания // Компоненты и технологии. 2007. № 8.
2. Гончаров А., Негреба О. Особенности применения модулей вторичного электропитания с расширенным диапазоном входного напряжения // Современная электроника. 2006. № 7.
3. Модули серии «МДМ». Технические условия БКЯЮ.436630.001ТУ.
4. Официальный сайт группы компаний «Александр Электрик» www.aeps-group.ru
5. Твердов И. Письмо в редакцию // Компоненты и технологии. 2008. № 1.
6. Модули МДМ 20-ЕП (20 Вт); модули МДМ 40-ЕП (40 Вт); модули МДМ 80-ЕП (80 Вт); модули МДМ 160-ЕП (160 Вт). Рекламная информация с сайта www.aeip.ru
7. Нагайцев А., Твердов И. Новые модули питания с широким (4:1) диапазоном входных напряжений // Научно-технический журнал «Электрическое питание». Выпуск 7. Научно-технический сборник докладов I-й Всероссийской конференции по средствам электропитания.
8. Нагайцев А. Н. Новые модули питания с широким (4:1) диапазоном входных напряжений. Статья с сайта www.aeip.ru