

ВЫСОКОНАДЕЖНЫЕ ИЗОЛИРОВАННЫЕ МОДУЛЬНЫЕ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КОМПАНИИ GAÏA CONVERTER



GALVANIC ISOLATION DC/DC CONVERTER FROM GAÏA CONVERTER

В статье рассматриваются высоконадежные модульные DC/DC-преобразователи.

В. Котигорошко

Abstract - The article discusses the features of galvanic isolation DC/DC converter.

V. Kotigoroshko

Введение

Использование стандартных DC/DC- и AC/DC-преобразователей, а также других дополнительных модулей (фильтров помех, корректоров мощности и пр.) позволяет создавать разнообразные блоки питания на базе модульной архитектуры.

Концепция построения универсальных блоков питания на базе модульной архитектуры во многом упрощает процесс разработки сложных блоков питания для разных приложений.

Модульные изолированные DC/DC-преобразователи предназначены для эксплуатации в жестких условиях окружающей среды. Это аппаратура для гражданской и военной авиации, наземной и морской военной техники, а также промышленное оборудование, медицинская техника, системы связи и пр. [1-7].

Высокая надежность изделий достигается благодаря принятым схемотехническим, технологическим и конструктивным решениям, благодаря автоматизации процессов сборки и контроля качества выполнения каждой операции, а также тестированию и отбору изделий.

В статье рассматриваются DC/DC-преобразователи, выпускаемые компанией Gaïa Converter (Франция).

Продукция компании Gaïa Converter – это модификации DC/DC- и AC/DC-преобразователей, отличающихся уровнем выходной мощности, а также входные модули разного назначения.

Многие известные компании используют DC/DC-преобразователи компании Gaïa Converter в своих изделиях. Это Airbus, Boeing, Bombardier и др. в гражданской авиации и аэрокосмической сфере; в военной авиации – F-16 Falcon, F/A-22 Raptor, F-35 JSF, AWACS; в танках – Leclerc и Leopard. Изделия компании Gaïa Converter применяются также в торпедах и беспилотных летательных аппаратах, ко-

раблях военно-морского флота, на транспорте и пр.

К источникам питания для военной техники предъявляются жесткие требования. Это защита от пропаданий до нуля и скачков входного напряжения, возникающих при переходных процессах, защита от электромагнитного излучения, а также высокая надежность при эксплуатации в жестких условиях окружающей среды и др. Поэтому большинство источников питания разработано с учетом этих и других специфических требований.

DC/DC-преобразователи компании широко используются также в промышленной сфере. Это оборудование электроснабжения, системы контроля окружающей среды и сейсмоактивности, устройства гидролокации, нефтегазодобывающее оборудование и многое другое.

Изделия подразделяются на две категории – для промышленных и высоконадежных приложений, соответственно, имеющие обозначение – Industrial (I) и Hi-rel (M) Grade (табл. 1).

Изделия для высоконадежных приложений подвергаются отбору в соответствии со стандартом MIL-STD-883C и отличаются, главным образом, параметрами надежности и подтвержденными протоколами испытаний.

DC/DC-преобразователи компании Gaïa Converter отличаются широким диапазоном входных напряжений от 4.5 до 480 В и имеют один или более независимых выходов (каналов).

Входные модули имеют встроенные функции защиты от переходных процессов, содержат фильтры электромагнитных помех, а также обеспечивают защиту от провалов входного напряжения.

MGDS-100

Высоконадежные (Hi-rel) изолированные DC/DC-преобразователи MGDS-100 номинальной мощностью 100 Вт изготавливаются в металлическом корпусе и ориентированы на применение в системах с распределенной архитектурой электропита-

Таблица 1. Параметры DC/DC-преобразователей компании Gaïa Converter

Тип	Габаритные размеры, мм	Мощность, Вт	Исполнение	Напряжение, В		Число выходов
				Входное	Выходное	
MGDD-40	42.67×31.75	40	M/I	4.5-33, 9-60	3.3-24	2
MGDDx-60	82.5×48.5	60	M/I	12-160	5-48	2
MGDxx-60	72.7×47.9	60	I	14-55, 36-140	3.3-26	1/2
MGDSx-75	57.91×36.83	75	M/I	9-36, 9-45, 18-75, 16-80, 155-480	3.3-28	1
MGDD-80	48.5×40.7	80	M	9-60	5-24	2
MGDSx-100	82.5×48.5	100	M/I	14-55, 36-140, 10.7-100	3.3-26	1
MGDSx-150	60.95×57.91	150	M/I	9-36, 9-45, 18-75, 16-80, 155-480	3.3-28	1

ния, в которых входное напряжение изменяется в широком диапазоне значений (от 10.7 до 100 В).

Основные характеристики модификаций преобразователей MGDS-100 и MGDSI-100 даны в табл. 2, 3.

Таблица 2. Модификации DC/DC-преобразователей MGDSI (Industrial) мощностью 100 Вт

Тип	Напряжение, В		Ток, А
	Вх.	Вых.	
MGDSI-100-G-B	14-55	3.3	20
MGDSI-100-G-C	14-55	5	20
MGDSI-100-G-E	14-55	12	8.25
MGDSI-100-G-F	14-55	15	6.5
MGDSI-100-G-26	14-55	26	3.8
MGDSI-100-Q-B	36-140	3.3	20
MGDSI-100-Q-C	36-140	5	20
MGDSI-100-Q-E	36-140	12	8.25
MGDSI-100-Q-F	36-140	15	6.5
MGDSI-100-Q-26	36-140	26	3.8

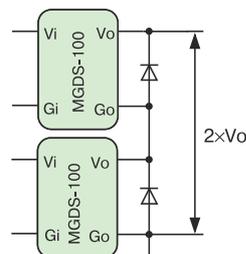
Отличительные особенности этих преобразователей – повышенный уровень входного напряжения, а также возможность синхронизации импульсного преобразователя от внешнего сигнала. Кроме того, предусмотрена возможность дистанционного вкл./выкл. Для увеличения выходного напряжения допускается последовательное соединение выходов преобразователей (рис. 1).

Предусмотрена защита от уменьшения входного напряжения ниже (Undervoltage Lock-Out – UVLO) и увеличения выше (Overvoltage Lock-Out – OVLO) допустимого уровня (рис. 2), защита от перегрузки

Таблица 3. Модификации DC/DC-преобразователей MGDS (Hi-rel) мощностью 100 Вт

Тип	Напряжение, В		Ток, А
	Вх.	Вых.	
MGDS-100-M-B	10.7-100	3.3	20
MGDS-100-M-C	10.7-100	5	20
MGDS-100-M-E	10.7-100	12	8.25
MGDS-100-M-F*	10.7-100*	15	6.5
MGDS-100-M-26*	10.7-100*	26	3.8

* Вх. напряжение MGDS-100-M-F и MGDS-100-M-26 составляет 10.7-60 В. Выдерживают выбросы напряжения амплитудой 100 В и длительностью 0.1 с.


Рис. 1. Вариант последовательного соединения выходов преобразователя

по току (Output Current Limitation Protection – OCP) и перегрева (Over Temperature Protection – OTP).

Ограничение по току происходит в случае увеличения выходного тока на 30% от максимального значения для данной модификации преобразователя. Для снижения выходного тока выходное напряжение уменьшается на 25%. Ниже этого порога преобразователь переключается в "пульсирующий" режим работы hiccup, т.е. осуществляется периодиче-

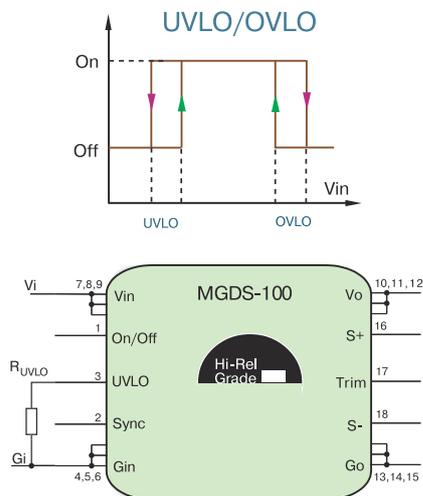


Рис. 2. Иллюстрация работы систем защиты UVLO и OVLO

ская проверка наличия перегрузки и преобразователь автоматически переключается в нормальный режим работы при снятии перегрузки по току (рис. 3).

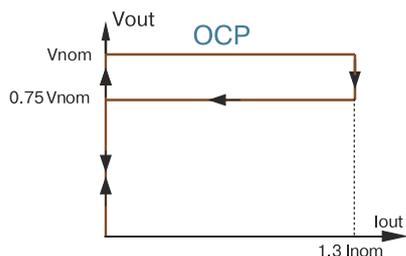


Рис. 3. Диаграмма, иллюстрирующая работу системы OCP (MGDD-100)

Устройство защиты от перегрева срабатывает и преобразователь выключается при достижении температуры корпуса $115 \pm 5.75 \text{ }^\circ\text{C}$. Включение преобразователя происходит при снижении температуры на $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4).

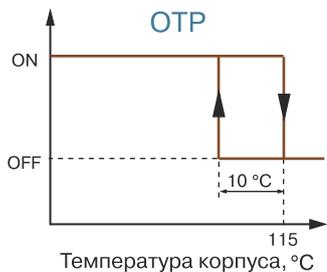


Рис. 4. Диаграмма, иллюстрирующая работу системы OTP

Наличие функции "мягкого" старта позволяет ограничить уровень входного и выходного тока при включении преобразователей.

Основные параметры DC/DC-преобразователей MGDS-100 и MGDSI-100 даны в табл. 4, параметры надежности этих преобразователей – в табл. 5.

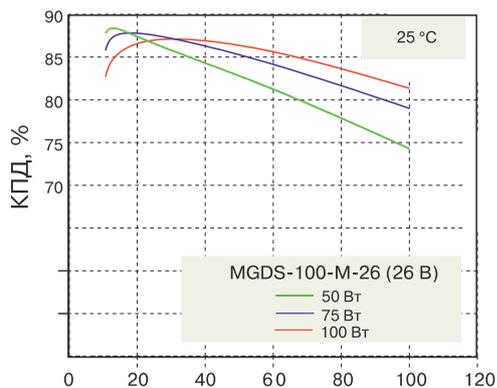
В DC/DC-преобразователях предусмотрена возможность регулировки выходного напряжения с использованием внешнего резистора, который подключается к специально предназначенным выводам. Зависимость КПД от входного напряжения и мощности в нагрузке приведена на рис. 5.

Таблица 4. Основные параметры DC/DC-преобразователей MGDS-100

Параметр	Обозначение		
	MGDS-100	MGDSI-100-G	
Вых. мощность, Вт	100	100	
КПД (тип. при Uном), %	88	88	
Частота импульсного преобразователя, кГц	260	260	
UVLO, напряжение включения, В	10.5	13.5	
UVLO, напряжение отключения, В	9.5	12.5	
OVLO, напряжение включения, В	98	—	
OVLO, напряжение отключения, В	104	—	
Время старта, мс	30	30	
Погрешность установки вых. напряжения, % Uном	±2	±2	
Максимальное отклонение вых. напряжения при изменении вх. напряжения от мин. до макс., тока нагрузки от 0 до макс., В	±1	±1	
Уровень вых. шумов и пульсаций, п-п, мВ при Uвх.ном ² в полосе 20 МГц	3.3/5 В	50	50
	12 В	100	100
	15 В	150	150
	24 В	320	320
Электрическая прочность изоляции (постоянный ток), В	1500	1500	
Сопротивление изоляции, мин., МОм	100	100	
Тепловое сопротивление (корпус окружающая среда), °C/Вт.	6	6	
Габаритные размеры, мм	82.5×48.5×12.5	72.7×47.9×12.5	
Масса, г	65	65	

Таблица 5. Параметры надежности DC/DC-преобразователей MGDS-100

Условия	MGDS-100	MGDSI-100-G
Ground fixed (Gf). Оборудование, устанавливаемое в приборных стойках с достаточным объемом охлаждающего воздуха в неотапливаемых зданиях. Например, радиолокаторы управления воздушным движением и средства связи.	600 * (40 **) 210 * (85 **)	600 * (40 **) 300 * (70 **)
Airborne Inhabited Cargo (AIC). Типичные условия окружающей среды в грузовых отсеках самолетов, в которых могут находиться летные экипажи или обслуживающий персонал. Давление, температура, удары и вибрации далеки от экстремальных значений. К примеру, самолеты дальнего следования типа C130, C5, B52 и C141.	330 * (40 **) 125 * (85 **)	—
Ground mobile (Gm). Оборудование, устанавливаемое на колесных или гусеничных транспортных средствах, а также оборудование, перевозимое вручную. К примеру, наземное вспомогательное оборудование для тактических ракет, оборудование мобильной связи, системы тактического управления огнем, портативное оборудование связи, лазерные целеуказатели и дальномеры.	—	300 * (40 **) 150 * (70 **)
* среднее расчетное время между отказами (MTBF), мин., тыс. ч в соответствии с MIL-HDBK-217F		
** при температуре корпуса, °C		


Рис. 5. Зависимость КПД от входного напряжения и мощности в нагрузке

MGDD-60

Высоконадежные (Hi-rel) изолированные DC/DC-преобразователи MGDD-60 номинальной мощностью 60 Вт могут эксплуатироваться при входном напряжении 12...160 В. Допускается непродолжительное (в течение 1 с) снижение входного напряжения до уровня 10.5 В. Структура преобразователя MGDD-60 приведена на рис. 6. Их основные технические характеристики даны в табл. 6. Основные параметры модификаций DC/DC-преобразователей мощностью 60 Вт приведены в табл. 7, их параметры надежности – в табл. 8.

Преобразователи MGDD-60 имеют два выхода с возможностью синхронизации от внешнего сигнала. Предусмотрено также их дистанционное вкл./выкл. Для увеличения выходного напряжения допускается последовательное соединение выходов преобразователей MGDD-60, а для повышения

выходной мощности – параллельное. Диапазоны выходных напряжений при последовательном и параллельном соединении выходов преобразователей MGDD-60 даны в табл. 9.

В преобразователях MGDD-60 имеется встроенный LC-фильтр, предназначенный для фильтрации входного напряжения и обеспечения электромагнитной совместимости. Для увеличения емкости конденсатора этого LC-фильтра за счет подключения внешнего конденсатора предусмотрен дополнительный вывод. Рекомендуется использовать керамические конденсаторы с низким значением эквивалентного последовательного сопротивления (Equivalent Series Resistance – ESR) емкостью 2.2 ... 10 мкФ на соответствующее номинальное напряжение.

В преобразователях предусмотрена защита от снижения входного напряжения (UVLO) ниже допустимого уровня, перенапряжения на выходе (Output Overvoltage Protection – OVP), перегрузки по току (OCP) и перегрева (OTP). Наличие функции "мягкого" старта позволяет ограничить уровень входного и выходного тока при включении преобразователей.

Напряжение срабатывания устройства защиты от снижения входного напряжения может регулироваться с помощью внешнего резистора, подключаемого ко входу UVLO. При отсутствии резистора порог срабатывания – 10.5 В.

Устройство защиты от перенапряжения на выходе ограничивает рост напряжения преобразователя на уровне $130 \pm 10\%$ от номинального значения. Устройство защиты от перегрева срабатывает и преобразователь выключается при достижении

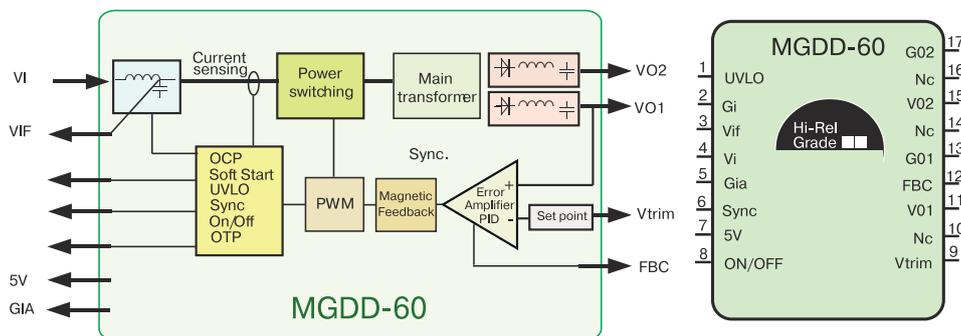


Рис. 6. Структура преобразователя MGDD-60

Таблица 6. Основные параметры преобразователей MGDD-60 (Hi-rel)

Параметр	MGDD-60	
Вх. напряжение, В	12...160	
Число выходов	2	
Суммарная вых. мощность, Вт	60	
КПД, %	91	
Частота импульсного преобразователя, кГц	270	
Время старта, мс	30	
UVLO, напряжение включения, В	11.8	
UVLO, напряжение отключения, В	10.5	
Погрешность установки вых. напряжения, % Unom	±2	
Диапазон регулировки вых. напряжения, % Unom	80...110	
Максимальное отклонение вых. напряжения, В при изменении вх. напряжения от мин. до макс., тока нагрузки от 0 до макс.	±1.5	
Уровень вых. шумов и пульсаций, п-п, мВ при Uвх.ном, в полосе частот 20 МГц	5 В	200
	12 В	240
	15 В	300
	24 В	520
Электрическая прочность изоляции, В	1500 (между вх. вых., 1 мин)	
	300 (между вых., 1 мин)	
Макс. допустимая величина емкостной нагрузки, мкФ (при вых. напряжении, В)	2 200 (5)	
	820 (12)	
	680 (15)	
	470 (24)	
Сопrotивление изоляции, МОм	100	
Тепловое сопротивление (корпус-окружающая среда), °C/Вт.	6.5	
Габаритные размеры, мм	82.5×48.5×12.5	
Масса, г	110	

температуры корпуса 125 ± 6.25 °C (гистерезис – 10 °C). Отключение преобразователя происходит также в случае увеличения выходного тока на более чем 5% от максимального номинального значения для данной модификации преобразователя. В этом случае преобразователь переключается в режим Hiccup и

периодически осуществляется проверка наличия перегрузки по току. При ее отсутствии преобразователь автоматически переключается в нормальный режим работы (рис. 7). В режиме hiccup средний ток потребления составляет 25% от номинального тока.

Таблица 7. Модификации DC/DC-преобразователей MGDD-60 (Hi-rel) мощностью 60 Вт

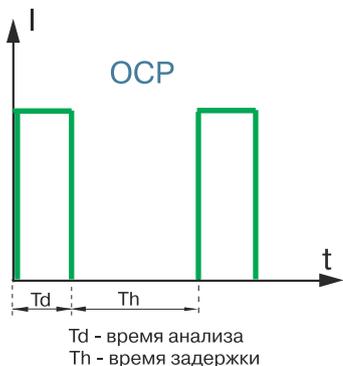
Тип	Напряжение, В		Ток, А
	Вх.	Вых.	
MGDD-60-R-C	12-160	2×5	5
MGDD-60-R-E	12-160	2×12	2.5
MGDD-60-R-F	12-160	2×15	2
MGDD-60-R-I	12-160	2×24	1.25

Таблица 8. Параметры надежности DC/DC-преобразователей MGDD-60 (Hi-rel)

Ground fixed (Gf)	680 * (40 **) 235 * (85 **)
Airborne Inhabited Cargo (AIC)	395 * (40 **) 150* (85 **)
* среднее расчетное время между отказами (MTBF), мин., тыс. ч в соответствии с MIL-HDBK-217F ** при температуре корпуса, °С	

Таблица 9. Значения выходных напряжений при последовательном и параллельном соединении выходов DC/DC-преобразователей MGDD-60 (Hi-rel)

Тип	Выходное напряжение, В	
	Параллельное соединение	Последовательное соединение
MGDD-60-R-C	4...5.5	8...11
MGDD-60-R-E	9.6...13.2	19.2...26.4
MGDD-60-R-F	12...16.5	24...33
MGDD-60-R-I	19.2...26.4	38.4...52.8


Рис. 7. Диаграмма, иллюстрирующая работу системы OCP (MGDD-60)

В преобразователях MGDD-60 предусмотрена

возможность регулировки выходного напряжения с использованием внешнего резистора, который подключается к выводу (Vtrim).

В петлю обратной связи (рис. 6), с помощью которой осуществляется регулирование выходного напряжения, включен первичный выход (V01/G01). Чтобы обеспечить правильную работу преобразователя при несбалансированной нагрузке, мощность потребления по этому выходу должна быть не менее 6 Вт. Вторичный выход (V02/G02) может оставаться незагруженным. Минимальная нагрузка может отсутствовать, если два выхода подключены параллельно или сбалансированы.

Тепловой расчет

Нижний предел диапазона рабочих температур преобразователей MGDD-60/100 составляет -40 °С. По отдельному заказу возможна поставка преобразователей для эксплуатации при температуре -55 °С. Значение верхнего предела зависит от условий отвода тепла от корпуса. Можно использовать несколько вариантов отвода тепла: естественную конвекцию без применения теплоотвода, принудительный отвод тепла потоком воздуха при наличии или отсутствии теплоотвода.

Теплопередача – физический процесс передачи тепловой энергии от более горячего тела к менее горячему, либо непосредственно (при контакте), либо через разделяющую перегородку из какого-либо материала.

Основная цель теплового расчета состоит в прогнозировании (оценке) степени нагрева DC/DC-преобразователя в процессе эксплуатации для того, чтобы не превысить его максимально допустимую температуру. Тепловая энергия передается из зоны с высокой температурой в зону с меньшей температурой посредством трех основных механизмов – это:

- тепловое излучение, т.е. электромагнитное излучение
- теплопроводность, т.е. передача тепла через твердую среду (например, через теплоотвод, выполненный в виде алюминиевого радиатора)
- конвекция, т.е. передача тепла через текучую среду (обычно воздух).

Все эти механизмы теплопередачи в той или иной степени присутствуют всегда.

Тепловое излучение – передача тепла посредством электромагнитного излучения, главным образом, в инфракрасном диапазоне. Излучение – единственное средство передачи тепла между телами,

разделенными вакуумом. Многие факторы способствуют эффективности излучения – это разность температур, площадь и излучающая способность поверхности. Например, радиатор, выполненный из черного анодированного алюминия, с максимальной площадью поверхности для данного объема можно эффективно использовать для теплового излучения. Однако в большинстве случаев для мощных преобразователей на тепловое излучение приходится не более 5% от общей теплопередачи.

Эффект теплового излучения лучше использовать в качестве “запаса прочности” в тепловом расчете, поскольку его вклад в теплопередачу небольшой, его трудно определить количественно, и для эффективности излучения требуется большая площадь поверхности радиатора.

Теплопроводность – основной и самый важный механизм теплопередачи. В электрической цепи аналог теплового потока – ток. Процесс переноса тепла – функция тепловых сопротивлений и градиента температуры. Простейшая эквивалентная модель переноса тепла приведена на рис. 8.

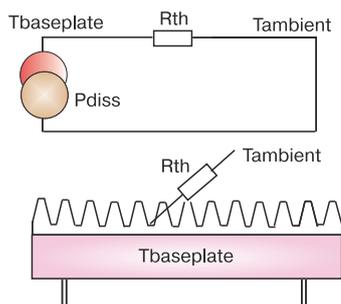


Рис. 8. Упрощенная эквивалентная модель теплопередачи

Для отвода тепла повсеместно используются разнообразные радиаторы, которые характеризуются тепловым сопротивлением. Единица измерения – °С/Вт. Многочисленные производители радиаторов в документации приводят значение теплового сопротивления. В качестве примера, на рис. 9 приведены параметры радиаторов типа SK DC 5 59 SA и SK DC 5 1 59 SA компании Fisher Elektronik [5]. На рис. 10 приведены возможные варианты отвода тепла от корпуса преобразователя.

Для эффективной передачи тепла и минимизации теплового сопротивления между кондуктивными средами, т.е. между корпусом преобразователя и радиатором, крайне важно обеспечить тесный контакт. Тепловое сопротивление неподвижного воздуха может быть примерно в 5000 раз выше, чем

у алюминия. Поверхности площадью 25 см² при воздушном зазоре 0.254 мм имеют тепловое сопротивление 3.5 °С/Вт. Это явно многовато для обеспечения эффективного отвода тепла. При монтаже радиатора на корпус преобразователя следует минимизировать суммарное тепловое сопротивление, что, как правило, достигается применением специальных термопрокладок. Оптимальная величина давления – 1...7 кг/см², а их поверхность должна быть ровной и гладкой. Тепловое сопротивление (Rth) однородной проводящей термопрокладки можно определить из простого выражения

$$R_{th} = L/K \times A,$$

где, R_{th} – тепловое сопротивление (°С/Вт), L – длина или ширина (мм), A – площадь поперечного сечения (мм²), K – теплопроводность материала (Вт/мм °С).

Естественная или принудительная конвекции – передача тепла через окружающую текучую среду (обычно воздух). Эффективность этого механизма теплопередачи зависит от многих факторов и довольно сложна для расчета. Необходимо учитывать площадь поверхности, градиент температуры, теплопроводность, скорость перемещения и плотность среды, а также ряд других факторов.

Естественную или свободную конвекцию осуществить легче, чем принудительную. Однако ее недостаток – невозможность получить низкое тепловое сопротивление. При естественной конвекции скорость воздуха определяется локальным нагревом воздуха на поверхности радиатора. Плотность воздуха при нагревании уменьшается, что вызывает его подъем, и тем самым перемещение слоев воздуха. Эффективность естественной конвекции снижается на больших высотах, т.к. уменьшается плотность воздуха. При конвекции для отвода тепла обязательно необходимо перемещение воздуха. “Ограниченный в своем распространении воздух” не приведет к положительным результатам. Как правило, это происходит с DC/DC-преобразователями, установленными с отсутствием теплового контакта, т.е. в закрытом объеме (корпусе). Залог эффективного отвода тепла при естественной конвекции – соблюдение простых рекомендаций, т.е. необходимо:

- устанавливать радиаторы так, чтобы максимальная длина поверхностей (ребер) была в вертикальной плоскости
- устанавливать радиатор таким образом, чтобы воздух поднимался вверх

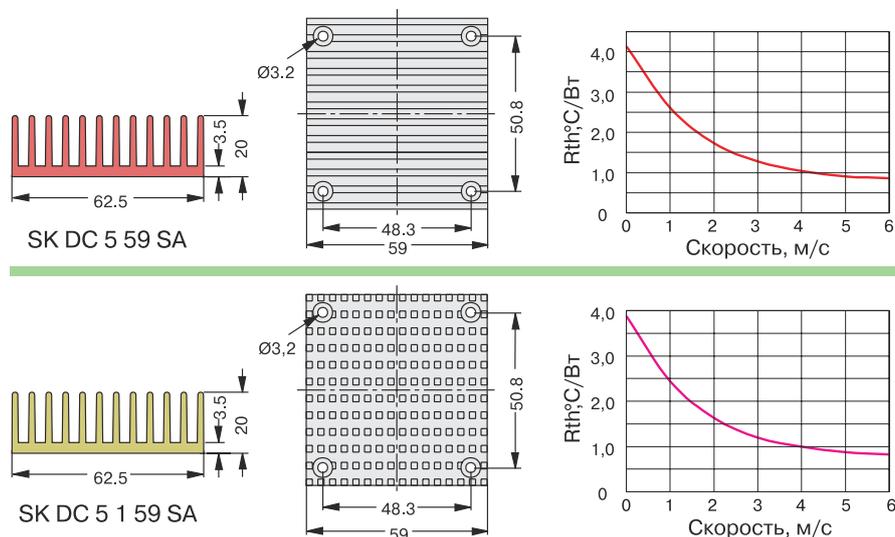


Рис. 9. Параметры радиаторов SK DC 5 59 SA и SK DC 5 1 59 SA компании Fisher Elektronik

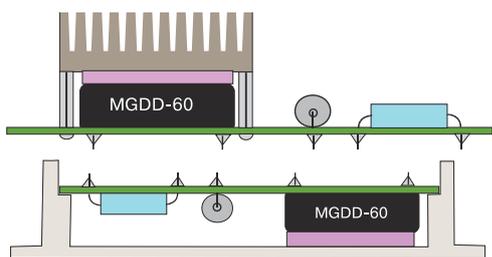


Рис. 10. Возможные варианты отвода тепла от корпуса преобразователя

- обеспечить вентиляцию корпуса для естественной конвекции
- учитывать, что снижение расстояния между ребрами радиатора снижает эффективность отвода тепла.

Вследствие сложности расчета параметров теплопередачи с учетом только естественной конвекции производители DC/DC-преобразователей и радиаторов получают характеристики теплового сопротивления, обусловленные как механизмом теплопроводности, так и естественной конвекции.

Принудительная конвекция подразумевает использование вентиляторов для увеличения скорости перемещения воздуха через теплоотвод. Тепловое сопротивление радиатор-воздух может быть уменьшено до 10 раз по сравнению с естественной конвекцией. Как правило, этот механизм отвода тепла применяют при высокой температуре окружающей среды, больших мощностях или в случае ограниченного пространства. Вентиляторы шумят, а в грязной среде необходимо использовать фильтры, которые, если их не заменить в срок, могут стать

причиной поломки вентилятора. Воздушный поток вентилятора обычно приводится в единицах LFM (Linear Feet per Minute). Производительность вентилятора – это объем воздуха в кубических футах в минуту (Cubic Feet per Minute – CFM). Между этими единицами измерения имеется простое соотношение

$$LFM = CFM/S,$$

где, S – площадь поперечного сечения, через которую проходит поток воздуха. Производительность вентилятора 400 футов/мин (2 м/с) приводит к значительному улучшению теплопередачи посредством конвекции. Воздушный поток со скоростью выше 1000 футов/мин существенно не улучшает теплообмен. Для максимальной теплопередачи с использованием принудительной конвекции следует учитывать следующее:

- компоненты с малой мощностью рассеивания располагаются выше
- расстояние между ребрами радиатора можно уменьшить в сравнении с конструкцией радиатора для естественной конвекции
- поток воздуха направляется в промежутки между ребрами радиатора.

Из-за сложности расчета теплопередачи с учетом только принудительного воздушного охлаждения лучше всего использовать данные о тепловом сопротивлении, предоставляемые производителями радиаторов. В этом случае приводятся либо графики зависимости теплового сопротивления от скорости потока воздуха, либо зависимости роста температуры от рассеиваемой мощности для различных скоростей воздуха.

Модель эквивалентной суммарной цепи теплопередачи для DC/DC-преобразователя показана на рис. 11. Соотношение между перегревом (DT), тепловым сопротивлением (R_{th}) и рассеиваемой мощностью (P_{diss}) определяется следующим выражением

$$R_{th} = DT/P_{diss}.$$

Эта модель используется для определения перегрева корпуса преобразователя (т.е. превышения температуры корпуса выше температуры окружающей среды) в зависимости от рассеиваемой мощности преобразователя и теплового сопротивления корпус-окружающая среда. В используемой тепловой модели имеются аналогии с параметрами электрической цепи, например, перегрев (DT) – это напряжение (V), тепловое сопротивление (R_{th}) – электрическое сопротивление (R).

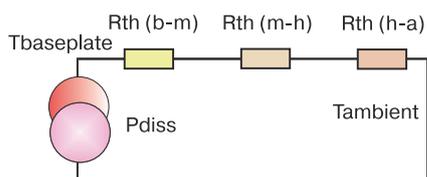


Рис. 11. Модель эквивалентной цепи теплопередачи

Тепловое сопротивление корпус-окружающая среда $R_{th} (b-a)$ существенно отличается в зависимости от механизма теплопередачи. Тепловое сопротивление $R_{th} (b-a)$ преобразователя типа MGDD-60 варьируется в широких пределах – от 1.13 до 6.5 °C/Вт (табл. 10) [4], поскольку зависит от механизма охлаждения, принудительная или естественная конвекция с использованием радиатора или без него и пр. В большинстве случаев тепловое сопротивление корпус-окружающая среда представляет собой сумму тепловых сопротивлений эквивалентной цепи теплопередачи от корпуса к окружающей среде. При наличии радиатора и термопрокладки $R_{th} (b-a)$ определяется из следующего выражения

$$R_{th}(b-a) = R_{th}(b-m) + R_{th}(m-h) + R_{th}(h-a),$$

где, $R_{th} (b-a)$ – тепловое сопротивление корпус-окружающая среда (°C/Вт), $R_{th} (b-m)$ – тепловое сопротивление корпус-термопрокладка (°C/Вт), $R_{th} (m-h)$ – тепловое сопротивление термопрокладка-радиатор (°C/Вт), $R_{th} (h-a)$ – тепловое сопротивление радиатор-окружающая среда (°C/Вт).

Как правило, в процессе отвода тепла задействованы все механизмы. Тепловое сопротивление в экви-

Таблица 10. Значения тепловых сопротивлений для DC/DC-преобразователя MGDD-60 (Hi-rel) при разных условиях теплоотвода

Механизм	Тепловое сопротивление, °C/Вт				
	Условия	$R_{th} (h-a)$	Условия	$R_{th} (b-h)$	$R_{th}(b-a)$
Естественная конвекция	Без теплоотвода	6.5	Без теплоотвода	—	6.5
	Радиатор	3.9	Термопрокладка	0.13	4.03
Принудительная конвекция, 200 LFM	Без теплоотвода	3.8	Без теплоотвода	—	3.8
	Радиатор	2.10	Термопрокладка	0.13	2.23
Принудительная конвекция, 400 LFM	Без теплоотвода	2.63	Без теплоотвода	—	2.63
	Радиатор	1.50	Термопрокладка	0.13	1.63
Принудительная конвекция, 1000 LFM	Без теплоотвода	1.54	Без теплоотвода	—	1.54
	Радиатор	1.00	Термопрокладка	0.13	1.13

$R_{th} (h-a)$ – тепловое сопротивление радиатор-окружающая среда

$R_{th} (b-h)$ – тепловое сопротивление корпус-радиатор

$R_{th} (b-a)$ – тепловое сопротивление корпус-окружающая среда

Радиатор – 824353B03250 (Aavid Thermalloy)

Термопрокладка – Sil-Pad 400 (Bergquist), давление 50 Psi.

валентной модели – это мера способности отводить тепло от корпуса преобразователя. Более высокая теплопроводность – это более низкое тепловое сопротивление и, следовательно, меньший перегрев корпуса.

С увеличением высоты над уровнем моря в расчеты теплопередачи приходится вносить поправки, учитывающие изменения во всех механизмах теплопередачи: излучении, теплопроводности и конвекции. В поправках учитывается снижение плотности воздуха, вызванное более низким давлением воздуха на большой высоте, а также ряд других факторов. В табл. 11 приведены поправочные коэффициенты в зависимости от высоты объекта над уровнем моря.

Перегрев корпуса преобразователя определяется из простого выражения

$$DT = P_{out} (1/\eta - 1) \times R_{th} (b-a),$$

где, η – КПД. При выходной мощности 60 Вт, КПД 90% и естественной конвекции для преобразователя MGDD-60 перегрев составляет:

- 43.3 °C, при отсутствии радиатора, $[60 (1/0.9-1) \times 6.5]$
- 26.8 °C, при наличии радиатора, $[60 (1/0.9-1) \times 4.03]$.

При определении КПД (рис. 12) и максимально допустимой температуры корпуса (рис. 13) необходимо использовать данные, приведенные в Data Sheet [3].

Таблица 11. Поправочные коэффициенты в зависимости от высоты объекта над уровнем моря

Высота, м	Поправочный коэффициент	Тепловое сопротивление, °C/Вт
0	1.00	1.00
1000	0.95	1.05
1500	0.90	1.11
2000	0.86	1,16
3000	0.80	1,25
3500	0.75	1.33

Электромагнитная совместимость

Чтобы не превысить рекомендованные военными стандартами США MIL-STD-461C/D/E (в частности CE102 и CE03) уровни излучаемых помех вместе с DC/DC-преобразователями серии MGDD-60, специалисты компании Gaia Converter предлагают использовать модуль фильтра электромагнитных

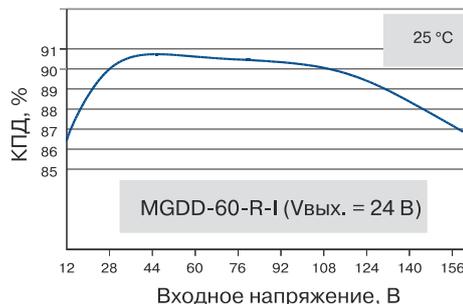


Рис. 12. Зависимость КПД преобразователя MGDD-60 от входного напряжения

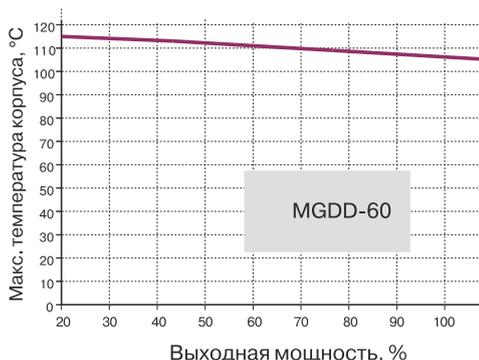


Рис. 13. Зависимость максимально допустимой температуры корпуса преобразователя MGDD-60 от выходной мощности

помех типа FGDS (рис. 14) [3].

Для военных наземных транспортных средств Министерством обороны США (Department of Defense – DOD) рекомендуется использовать стандарт MIL-STD-1275E [6], в котором регламентируются характеристики систем энергоснабжения постоянного тока номинальным напряжением 28 В.

В стандарте оговариваются предельные значения рабочего напряжения и параметры импульсов перенапряжения на входных силовых клеммах оборудования, подключенного к распределенной системе электроснабжения военных наземных

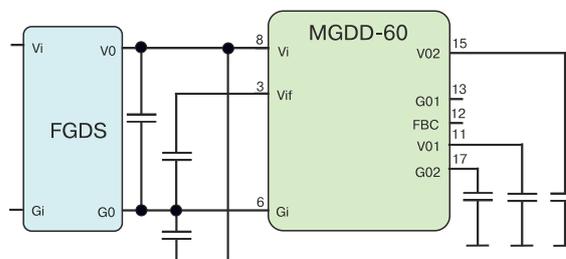


Рис. 14. Вариант подключения модуля фильтра электромагнитных помех (FGDS) и преобразователя MGDD-60

транспортных платформ.

Кратковременные импульсы перенапряжения возникают в результате выброса предварительно запасенной электромагнитной энергии в реактивную нагрузку или в процессе работы разных электромеханических устройств (электродвигателей, генераторов и т.п.).

На рис. 15 приведены соотношения между амплитудой и длительностью импульсов с максимальной энергией до 2 Дж и длительностью ≤ 1 мс.

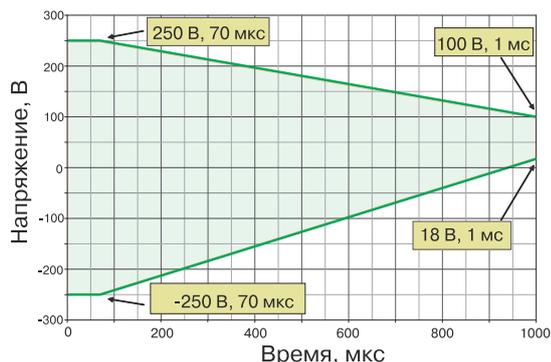


Рис. 15. Соотношения между амплитудой выбросов напряжения и их длительностью

В последней редакции стандарта MIL-STD 1275E были расширены требования по устойчивости к выбросам напряжения небольшой длительности. Энергия импульсов длительностью до 1 мс увеличена с 15 мДж до 2 Дж. Предлагаемая специалистами компании Gaia Converter схема подключения DC/DC-преобразователей серии MGDD-60 (рис. 16) позволяет сохранять работоспособность при воздействии выбросов напряжения энергией до 2 Дж. Преобразователи MGDD-60 могут эксплуатироваться при входном напряжении от 12 до 160 В. Включенный на входе преобразователя TVS-диод (D1) соответствующей мощности позволяет ограничить уровень выбросов напряжения до уровня ниже ± 160 В. Отрицательные импульсы напряжения блокируются диодом D4, а запасенная в конденсаторе C1 энергия обеспечивает энергопитание преобразователя MGDD-60 в течении переходного процесса. Резистор R1 предназначен для ограничения пускового тока при зарядке конденсатора C1.

Преобразователь MGDD-60 может работать при снижении входного напряжения до 10,5 В на протяжении 1 с, что также удовлетворяет рекомендации стандарта MIL-STD-1275E. При этом нет необходимости в использовании накопительного электролитического конденсатора большой емкости.

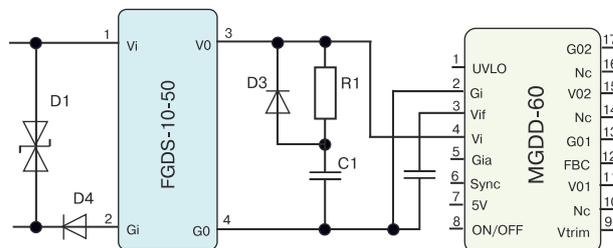


Рис. 16. Вариант подключения фильтра электромагнитных помех FGDS, преобразователя MGDD-60 и TVS-диода

HUGD-300

При эксплуатации разного рода электронной авиационной, военной, связной и другой аппаратуры не исключаются случаи кратковременного снижения входного напряжения вплоть до нуля, что в результате может привести к потере данных и увеличению числа аварийных отказов. В стандартах MIL-STD-704 и DO-160 регламентируется, что источники питания должны гарантировать бесперебойную работу системы на протяжении 50...1000 мс, а в некоторых случаях – даже нескольких секунд. Один из примеров кратковременного снижения входного напряжения – переключение на резервный источник питания. Поэтому, чтобы обеспечить бесперебойную работу системы, приходится применять ряд специальных мер.

Классическое решение – использование на входе преобразователя накопительного конденсатора большой емкости (и, соответственно, габаритов), заряжаемого до рабочего входного напряжения. При пропадании входного напряжения накопительный конденсатор разряжается и снабжает энергией DC/DC-преобразователь. Емкость (C) конденсатора на входе преобразователя зависит от мощности (P) в нагрузке, КПД, используемого DC/DC-преобразователя, длительности интервала удержания напряжения в заданном диапазоне и определяется из следующего выражения

$$C = 2P\Delta t / (V_1^2 - V_2^2),$$

где, P – суммарная мощность, потребляемая преобразователем и нагрузкой, Δt – длительность интервала удержания напряжения в заданных пределах, V_1 – начальное напряжение на конденсаторе, V_2 – минимальное рабочее входное напряжение преобразователя. Простой расчет показывает, что при выходной мощности 60 Вт, КПД преобразователя 90%, минимальном входном рабочем напряже-

нии преобразователя 11 В, начальном напряжении на конденсаторе 38 В и длительности интервала удержания 20 мс емкость конденсатора составит примерно 2000 мкФ.

$$C = (2 \cdot 60 / 0.9 \cdot 0.02) / (1440 - 121) = 201 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

Недостаток такого решения – увеличение площади печатной платы и размеров изделия в целом, большой импульсный пусковой ток зарядки конденсатора, для ограничения которого необходимо модифицировать входную цепь зарядки.

Уменьшить емкость накопительного конденсатора при сохранении той же мощности и длительности интервала удержания можно за счет расширения диапазона входного напряжения DC/DC-преобразователя и, соответственно, увеличения начального напряжения на накопительном конденсаторе.

При выходной мощности 60 Вт, КПД 90%, длительности интервала удержания 20 мс, напряжении на входе преобразователя от 11 до 70 В емкость накопительного конденсатора составит примерно 560 мкФ.

$$C = (2 \cdot 60 / 0.9 \cdot 0.02) / (4900 - 121) = 556 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Однако следует учитывать, что максимально допустимое напряжение конденсатора в этом случае должно быть больше.

Использование модуля контроля и защиты от провалов входного напряжения HUGD-300 позволяет добиться снижения массогабаритных показателей источников питания, а также ограничить величину пускового тока, что в свою очередь способствует повышению надежности всей системы.

Структура модуля HUGD-300 и схема его подключения к DC/DC-преобразователю приведены на рис. 17, графики зависимости емкости накопительного конденсатора от длительности интервала удержания при разной мощности в нагрузке – на рис. 18. В табл. 12 даны основные параметры модуля

ля HUGD-300. Временные диаграммы, поясняющие работу модуля HUGD-300, приведены на рис. 19. Зависимость напряжения на накопительном конденсаторе от сопротивления резистора (Rset) – на рис. 20.

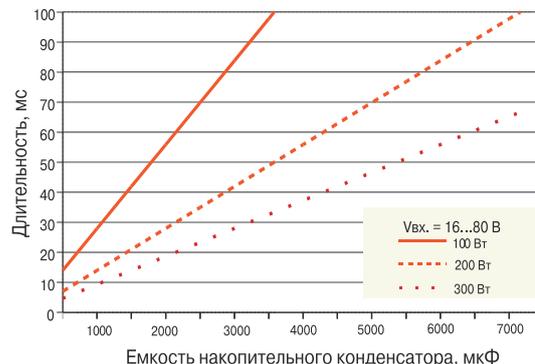


Рис. 18. Графики зависимости необходимой емкости накопительного конденсатора от длительности интервала удержания и мощности в нагрузке

В модуле HUGD-300 также реализована встроенная защита от ошибочного подключения входной цепи в обратной полярности, что соответствует рекомендациям ряда стандартов (MIL-STD-704/1275).

Когда напряжение на накопительном конденсаторе (Chu) в процессе его зарядки достигнет значения 90% от заданного, на выводе CC (Capacitor Charged) устанавливается активный сигнал высокого уровня – "конденсатор заряжен", и модуль переключается в рабочий режим. В этом режиме для поддержания конденсатора в заряженном состоянии затрачиваемая модулем мощность составляет менее 3 Вт. При уменьшении входного напряжения ниже заданного порога формируется сигнал PF (Power Fail), происходит подключение к нагрузке заряженного до заданного уровня накопительного конденсатора и отключение от источника входного

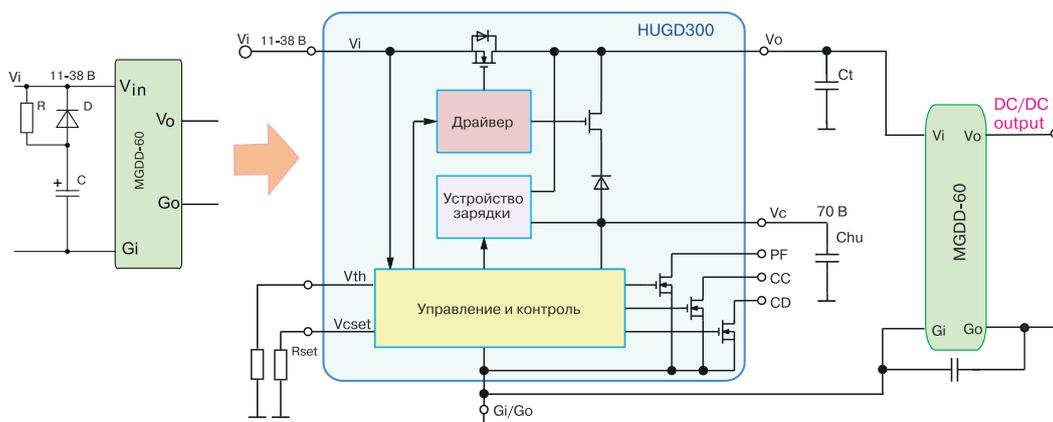


Рис. 17. Структура модуля HUGD-300 и схема его подключения к DC/DC-преобразователю

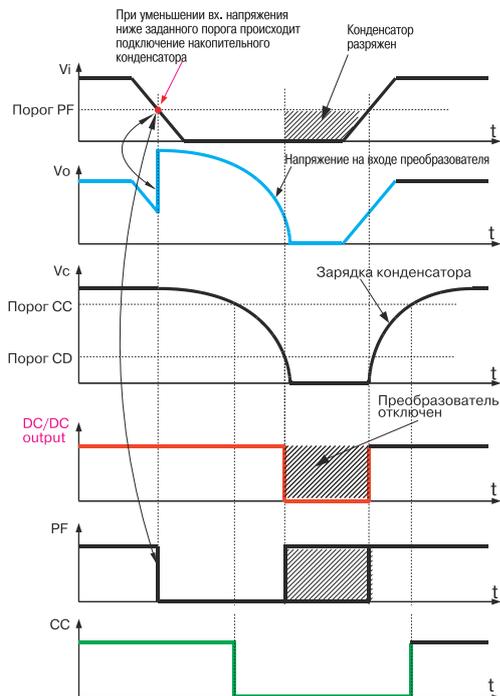


Рис. 19. Временные диаграммы сигналов, поясняющие работу модуля HUGD-300

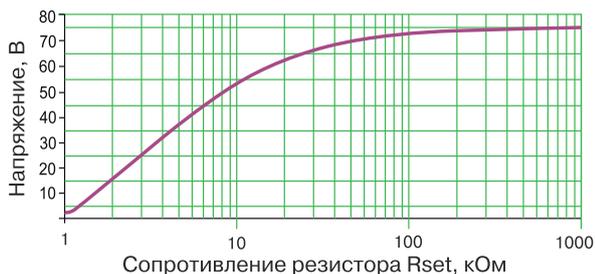


Рис. 20. Зависимость напряжения заряда накопительного конденсатора от сопротивления резистора Rset

напряжения. В этом случае энергопитание DC/DC-преобразователя осуществляется исключительно от конденсатора. При разрядке конденсатора до уровня напряжения аварийного порога формируется сигнал CD (Capacitor Discharged) – “конденсатор разряжен”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высоконадежные изолированные DC/DC-преобразователи компании Gaia Converter соответствуют рекомендациям стандартов DO-160 и MIL-STD-704/461/810. Благодаря высокой надежности они применяются в военной и гражданской авиации, военной технике (беспилотных летательных аппаратах, оборудовании кораблей военно-морского флота и пр.), на транспорте (в метро и трамваях), в

Таблица 12. Основные параметры модуля HUGD-300

Наименование	Значение	
Вх. напряжение, В	8...100	
Частота переключения преобразователя (тип.), кГц	700	
Макс. вых. мощность, Вт	300	
Макс. вых. ток, А	30	
Порог вх. напряжение для подключения накопительного конденсатора, В	6...20	
Макс. напряжение на накопительном конденсаторе, В	70	
Эквивалентное последовательное сопротивление в цепи питания, МОм	3.5	
Тепловое сопротивление корпус-окружающая среда при естественной конвекции, °С/Вт	13	
Макс. температура корпуса, °С	105	
Длительность удержания, мкс/мкФ	300 Вт	5.6
	100 Вт	17
Емкость накопительного конденсатора, мкФ	470...100000	
Электрическая прочность изоляции (вход-корпус, выход-корпус), В	500	
Габаритные размеры, мм	40.2×26.2×12.8	
Масса, г	25	

промышленном оборудовании (приборах гидролокации, нефтегазодобывающем оборудовании и пр.). Более полную информацию о DC/DC-преобразователях можно найти в [1-7] или получить в фирме VD MAIS – официальном дистрибьюторе компании Gaia Converter в Украине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Industrial DC/DC converter MGDI-100 wide Input: 100W power.
2. Hi-Rel DC/DC converter MGDM-100: 100W power.
3. Hi-Rel DC/DC converter MGDD-60: 60W power.
4. DC/DC converter. Thermal management. Application notes. – Gaia Converter.
5. To cool, to protect, to connect. – Fisher Elektronik.
6. MIL-STD-1275E. Characteristics of 28 volt DC input power to utilization equipment in military vehicles (http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-1100-1299/MIL-STD-1275E_45886).
7. Hi-Rel Hold-Up module HUGD-300: 300W power.