

НАДЕЖНОСТЬ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ МОЩНЫХ МОДУЛЬНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ.

С.А. Чугунов, И.В. Твердов, Л.С. Крельштейн

(ООО «АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания», г. Москва)

Модульное построение с n+1 избыточностью позволяет создавать надежные мощные выпрямительные устройства (ВУ). На предприятии ООО «Александр Электрик источники электропитания» (АЭИЭП) для таких ВУ разработан двухкиловаттный модуль с КПД 93%. Рассмотрены тепловые режимы модуля с радиатором и вентилятором.

Ключевые слова: мощность, выпрямительное устройство (ВУ), радиатор, вентилятор, модуль, резервирование.

High reliability rectifier applications with n+1 redundancy and efficiency up to 93%, heat condition is considered.

Keywords: redundancy, reliability, heat conditions, rectifier, radiator, fan.

Мощные выпрямительные устройства (ВУ) широко применяются в системах электропитания стационарных и подвижных объектов с электронной аппаратурой (ЭА). Так в распределенных системах электропитания стационарных аппаратных напряжение сети преобразуется в промежуточное постоянное напряжение 27 (48) В, которое подводится к модулям в печатных платах. В системах электропитания переменного тока аппаратных на колесной базе ВУ обеспечивает постоянным напряжением часть аппаратуры, рассчитанной на постоянный ток, и установки гарантированного питания. В аппаратных на гусеничной базе ВУ питает аппаратуру на стоянке.

Одним из перспективных путей создания мощного ВУ является модульное построение [1]. Для получения необходимой надежности ВУ, рассчитанное на мощность $P_{нву}$, строится из n параллельно включенных основных модулей мощностью $P_{нву} / n$ и в него вводятся k резервных. Деление модулей на основные и резервные в таком ВУ является достаточно условным, так как все модули находятся в одинаково нагруженном режиме. При отказе одного из модулей выходная мощность не изменяется, так как оставшиеся работоспособными модули пропорционально увеличивают выходную мощность. При процентном резервировании обязательно включение диодов на выходе каждого модуля, которые защищают нагрузку от короткого замыкания по выходу отказавшего модуля, а также непрерывный и достоверный контроль работоспособности модулей. Неисправный модуль может быть заменен

из ЗИП-а сразу после возникновения отказа без выключения ВУ, что позволяет реализовать устройство с высокой надежностью.

При рассмотренных условиях значение $T_{\text{обВУ}}$ определяется выражением [1]:

$$T_{\text{обВУ}} = T_o^{k+1} [t_3^k \prod_{j=0}^k (n+j)]^{-1}, \quad (1)$$

где T_o – наработка на отказ одного модуля;

t_3 - время замены модуля, мин. ;

n - минимальное количество модулей; $n = P_{\text{нВУ}} / P_m$

k - количество резервных модулей

$P_{\text{нВУ}}$ и P_m - номинальная выходная мощность ВУ и модуля.

Из формулы (1) следует, что каждый дополнительный модуль увеличивает значение $T_{\text{обВУ}}$ примерно в $\frac{T_o}{t_3(n+1)}$ раз. По экономическим причинам (стоимость ВУ возрастает при увеличении количества модулей) « n » обычно выбирается от 3 до 5. Если принять $n = 5$, $t_3 = 30$ мин., $T_o = 50 \times 10^3$ часов, то уже при одном дополнительном модуле значение $T_{\text{обВУ}}$ возрастает на несколько порядков. Поэтому все известные модульные ВУ построены по принципу $n+1$.

Как уже отмечалось, формула (1) применима для ВУ, в котором контроль работоспособности каждого модуля является полным и достоверным. При отсутствии контроля увеличение $T_{\text{обВУ}}$, построенного по принципу $n+1$, не превышает двух раз. Реально же своевременная замена отказавшего модуля достигается, если имеется местная индикация о наличии напряжения на выходе модуля и дистанционная сигнализация оператору об отказе.

Для создания мощных (4...10 кВт и выше) модульных ВУ на предприятии АЭИЭП разработаны модули МАА2000 мощностью 2 кВт.

Модули [2] рассчитаны на трехфазные сети 380 В/50 Гц и 220 В/400 Гц с качеством электроэнергии в соответствии с группой Г по ГОСТ В 24425; выпускаются с выходным напряжением от 24 до 70 В, суммарная нестабильность которого не более $\pm 3 \%$, а амплитуда пульсации не более 1 %.

Модули МАА2000 базируются на мостовом преобразователе, работающем на частоте 100 кГц с фазовой модуляцией. В преобразователе коммутация ключей происходит при нулевом напряжении. На затвор МОП-транзисторов подается сигнал на отпирание, только когда напряжение сток-исток равно нулю.

В таком преобразователе потери на переключение минимизированы, что позволило получить высокий КПД = 93 %.

В модуль встроен высокоэффективный трехфазный фильтр радиопомех ФРП (коэффициент подавления > 60 дБ), состоящий из двух Т-образных LC-звеньев, в которых одно звено подавляет помехи по симметричному пути, другое – по несимметричному.

Во входной части модуля между линейными проводами установлены варисторы, служащие для защиты от высоковольтных импульсов с амплитудой 1000 В и ограничивающие напряжение на уровне 800 В. Таким образом созданы условия для безопасной работы транзисторов преобразователя.

Корректирующий дроссель обеспечивает получение фазного тока, близкого по форме к синусоиде. Известно [2], что пассивная коррекция в трехфазных модулях значительно эффективнее, чем в однофазных.

Устройство управления модуля включает ИС контроллера фазовой модуляции, ИС с четырьмя усилителями сигнала затвора, модули служебного источника и параллельной работы, трансформаторную развязку.

Модули имеют полный комплект защит – от перегрузки, короткого замыкания, перегрева, превышения выходного напряжения (все виды защит самовосстанавливающиеся), снабжены функцией дистанционного включения – выключения, также предусмотрена возможность параллельного соединения, компенсация выходного напряжения в зависимости от напряжения, дополнительный выход питания вентилятора охлаждения.

Модули МАА2000 (Рис.1) – изготавливаются в четырех исполнениях: в облегченном цельнометаллическом корпусе (284×174×48мм) со штыревыми разъемами СТН и ножевыми разъемами СПН, в сборном металлическом корпусе с кожухом-крышкой СУН (280×170×48мм), и в цельнометаллическом корпусе СКН (284×174×48мм). Все модули герметизированы теплопроводящим компаундом.



Рис.1 Конструктивное исполнение модулей МАА2000

Для реализации выходной мощности модуля 2 кВт должен быть обеспечен надёжный отвод тепла от основания модуля. Представляет интерес определить максимально допустимую выходную мощность модуля при различных условиях охлаждения, и прежде всего, при охлаждении естественной конвекцией: максимальная выходная мощность модуля $P_{\text{вых. макс}}$ при температуре окружающей среды $t_{\text{ср}}$ определяется по формуле [2]

$$P_{\text{вых. макс}} = \frac{t_{\text{км}} - t_{\text{ср}}}{\Theta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)}, \quad (2)$$

где: $t_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды,

$t_{\text{км}}$ - максимальная температура корпуса,

Θ - тепловое сопротивление корпус – окружающая среда,

η - КПД

В последние годы малогабаритные ВУ с небольшим выделением тепла, в основном, размещаются операторном отсеке объекта, где температура ($t_{\text{ср}}$) не превышает 35°C.

Для этой температуры по формуле (2) определена максимально допустимая выходная мощность модуля питания МАА2000 при естественной

конвекции $P_{\text{вых.макс}} = 754 \text{ Вт}$ [4]. При этом $t_{\text{cp}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{км}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Theta = 0,88 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$, $\eta = 0,93$.

Можно декларировать модулю любые значения выходной мощности, но эта величина при естественной конвекции будет определяться только КПД и площадью поверхности корпуса.

Чтобы повысить максимально допустимую выходную мощность модуля, используются радиаторы. Предприятие выпускает радиаторы с высотой ребер 26 и 46 мм, размеры основания которых соответствуют размерам модуля.

Для модулей и радиаторов по методике [3] экспериментально определены значения Θ : для радиаторов с высотой ребра 26 мм $\Theta_1 = 0,4$, для радиаторов с высотой ребра 46 мм $\Theta_2 = 0,2$.

Для этих значений теплового сопротивления по формуле (2) рассчитана максимально допустимая выходная мощность модуля МАА2000 при использовании радиаторов ($t_{\text{cp}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$): для радиаторов с высотой ребра 26 мм $P_{\text{вых м1}} = 1600 \text{ Вт}$, для радиаторов с высотой ребра 46 мм $P_{\text{вых м2}} = 3200 \text{ Вт}$.

Эта мощность для радиаторов с высотой ребра 46 мм для модулей МАА2000 является избыточной. С таким радиатором при реальной мощности $0,8P_{\text{ном}} = 1600 \text{ Вт}$ модуль будет работать с меньшей температурой корпуса.

Расчетная надежность модуля при температуре $t_{\text{cp}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ равна 100000 часов [4].

Потери в модуле составят

$$P_{\text{п}} = P_{\text{вых}} (1/\eta - 1) = 1600 (1/0,93 - 1) = 120 \text{ Вт}$$

Температура перегрева модуля определяется выражением

$$\Delta t = P_{\text{п}} \times \Theta = 120 \times 0,4 = 48 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Тогда температура корпуса модуля } t_{\text{к}} = t_{\text{cp}} + \Delta t = 35 + 48 = 83 \text{ }^\circ\text{C}$$

Оценить надежность модуля МАА2000 для температуры $83 \text{ }^\circ\text{C}$ можно по следующему критерию: интенсивность отказов увеличивается примерно в 2 раза при повышении температуры на 10 градусов [3]. При температуре окружающей среды $35 \text{ }^\circ\text{C}$, выходной мощности модуля МАА2000 1600 Вт и использовании радиатора БКЮС.752695.401 высотой 26 мм с охлаждением естественной конвекцией, температура корпуса модуля составит $83 \text{ }^\circ\text{C}$, а ожидаемая наработка до отказа T_0 составит 3,2 тысяч часов (Рис.2).

Для ВУ с процентным резервированием, когда значение времени наработки до отказа T_0 возрастает на несколько порядков, такое снижение времени T_0 не является критичным.

Так, согласно формуле (1) наработка до отказа $T_{\text{оВУ}}$ выпрямительного устройства, состоящего из 4 модулей МАА2000, работающих в указанном выше режиме, составляет:

$$T_{\text{оВУ}} = T_0^{k+1} [t_3^k \prod_{j=0}^k (n + j)]^{-1} = 3200^2 [0,5^1 \prod_{j=0}^1 (3 + j)]^{-1} = 1700 \text{ тыс. часов.}$$

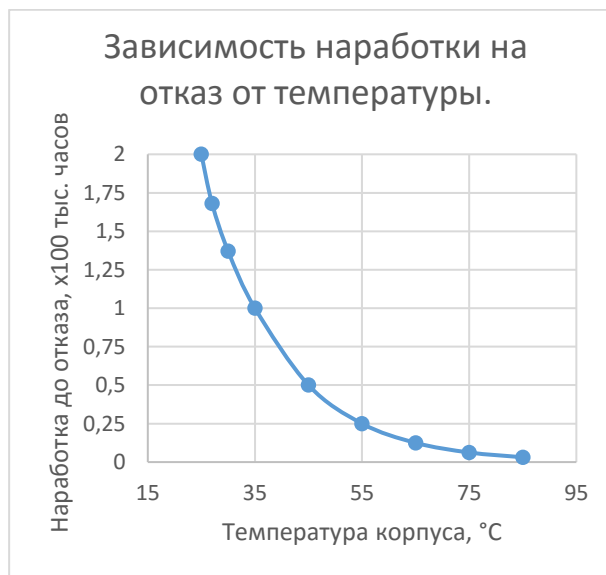


Рис.2. График зависимости наработки до отказа от температуры.

Дальнейшее повышение выходной мощности модуля и увеличение наработки на отказ может быть достигнуто, если применить радиатор и вентилятор (смешанное охлаждение). Наиболее эффективно тепловой импеданс снижается при увеличении скорости воздушного потока до 0,5 м/с (перемешивание воздуха). Уже при скорости 1,5 м/с начинается срыв воздуха с поверхности радиатора и тепловое сопротивление остается практически постоянным. В качестве подтверждения на рис.3 приведены зависимости тепловых импедансов для модуля МАА2000 радиатором высотой 46 мм.

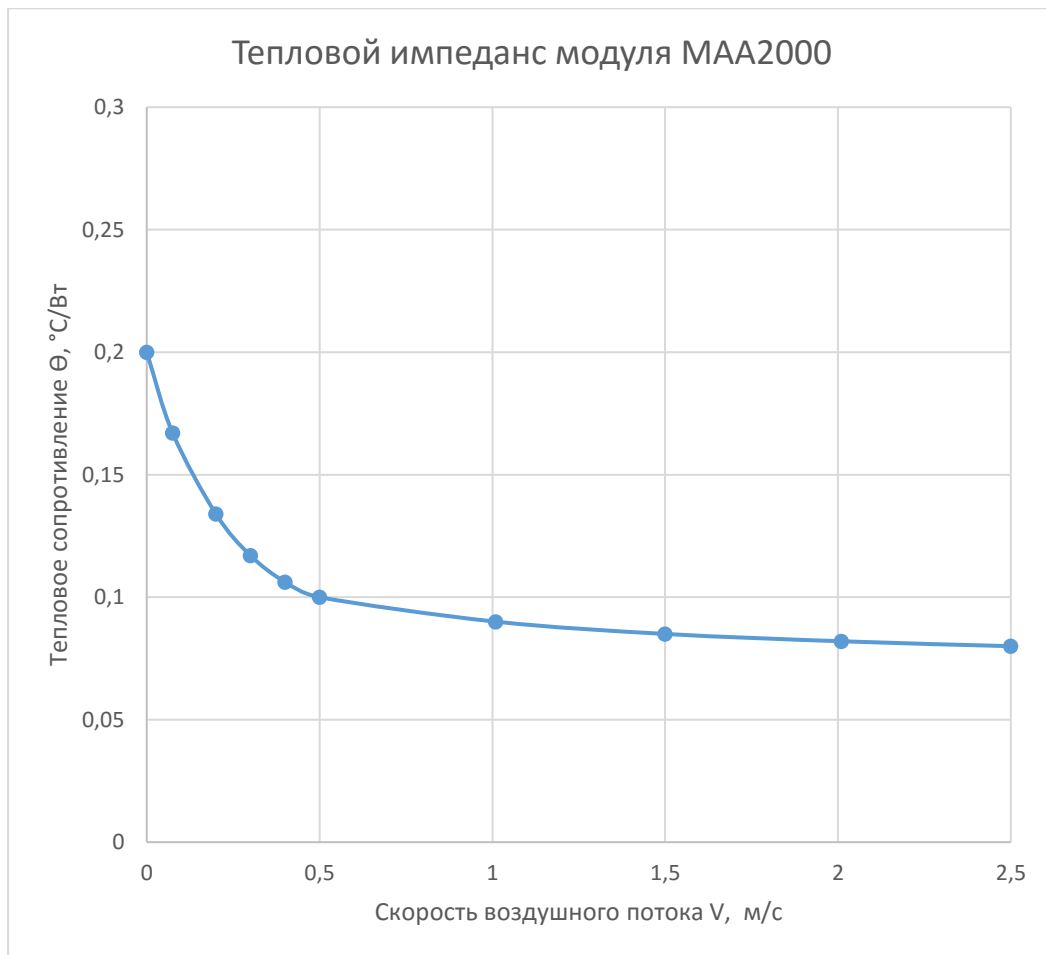


Рис.3. Зависимость теплового импеданса модуля МАА2000 с радиатором высотой 46 мм от скорости воздушного потока.

Применение смешанного охлаждения позволяет уменьшить габаритные размеры ВУ более, чем в два раза. Такое охлаждение широко используется отечественными (Рис. 4) и зарубежными фирмами.



Рис. 4. Выпрямительное устройство АЭИЭП мощностью 8 кВт (4 модуля МАА2000).

В заключение отметим, метод резервирования N+1 позволяет создать надёжные, мощные ВУ. Смешанное охлаждение – радиатор плюс вентилятор, уменьшает объём ВУ более чем в два раза. Чтобы не снизить надёжность ВУ, каждый модуль должен иметь вентилятор.

Литература.

1. И. Р. Плоткин, И. В. Твердов. Мощные модульные выпрямители с процентным резервированием. Компоненты и технологии. №4, 2006г.
2. С. А. Чугунов, И. В. Твердов. Двухкиловаттный AC/DC модуль на основе преобразователя с фазовой модуляцией. Компоненты и технологии №10, 2014г.
3. И. В. Твердов. Охлаждение универсальных модулей питания. Электронные компоненты №8, 2008г.
4. Техническая информация. AC/DC преобразователи серия МАА2000. АЭИЭП, 2014г.