

УДК 621.314.58

А.Н. Четин

Оценка уровня безотказности системы вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой

Рассматриваются особенности оценки уровня безотказности систем вторичного электропитания (СВЭП) с магистрально-модульной архитектурой (ММА), обеспечивающих высокое значение показателя безотказности для питания РЭА, установленной на особо ответственных объектах.

Ключевые слова: система вторичного электропитания, магистрально-модульная архитектура, резервирование, безотказность.

Особенности оценки уровня безотказности СВЭП с ММА. В [1–5] приведены назначение, области применения, варианты создания, способ резервирования и потенциальные возможности СВЭП с ММА.

Главным достоинством такой СВЭП является возможность обеспечения ею высокого значения показателя безотказности для питания РЭА, установленной на особо ответственных объектах. Как правило, этот показатель нормируется при уровне вероятности безотказной работы γ не менее 95% [6].

На рис. 1 представлены значения показателя безотказности различных вариантов СВЭП с ММА со значением выходной мощности от 1 500 до 5 400 Вт, в диапазоне значений температуры окружающей среды от 20 до 60 °С.

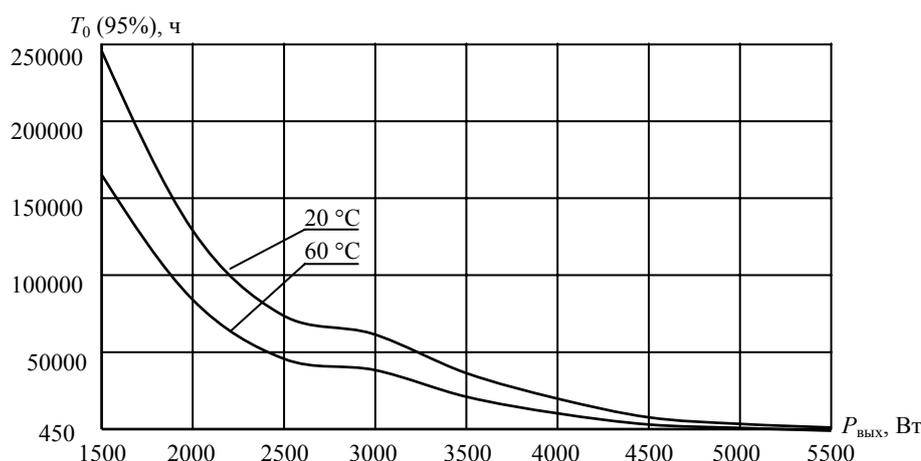


Рис. 1. Зависимость значения показателя безотказности СВЭП с ММА от значения ее выходной мощности при различных значениях температуры окружающей среды

СВЭП реализованы на основе преобразователя напряжения (ПН) класса «DC-DC» фирмы Vicor типа V375A28E600BL, с выходной мощностью 600 Вт, используемого с расчетным коэффициентом нагрузки по мощности $K_p = 0,83$, у которого при температуре корпуса 70 °С средняя наработка до отказа $T_0 = 700 \times 10^3$ ч, что примерно соответствует гамма-процентной наработке до отказа $T_\gamma = 35 \times 10^3$ ч. Помимо ПН, в расчете учтены также другие основные силовые компоненты СВЭП (сетевые фильтры, выпрямители с корректором коэффициента мощности, емкостные сглаживающие фильтры, разделительные диоды, а также вентиляторы, обеспечивающие заданный тепловой режим силовых компонентов).

Представленные на рис. 1 значения получены с учетом следующих условий:

- значение температуры перегрева корпуса ПН относительно окружающей среды принято равным 30 °С;
- наработка до отказа основных компонентов СВЭП подчиняется экспоненциальному закону распределения, т.е. процесс функционирования СВЭП описывается однородным марковским процессом;

– расчет выполнен структурным методом (в качестве структурной схемы надежности использован направленный граф переходов, математически описываемый системой дифференциальных уравнений);

– расчет выполнен для уровня вероятности безотказной работы 95% на интервале времени, в пределах которого СВЭП может не восстанавливаться оператором, а ее поведение во времени описывается так называемой «схемой гибели»;

– в СВЭП применен способ резервирования « $N+1+K$ », поддерживающий длительное время традиционный способ резервирования « $N+1$ », широко используемый в СВЭП с модульной архитектурой (где K – количество ПН в ненагруженном резерве).

Результаты расчета позволяют, с одной стороны, ориентировочно определить значение показателя безотказности СВЭП с ММА, а с другой – сравнить его со значениями аналогичного показателя для:

– СВЭП, выполненной с традиционным способом резервирования « $N+1$ » на основе ПН того же типа;

– СВЭП, выполненной с традиционным способом резервирования « $N+1$ » на основе гипотетического ПН отечественного производства;

– СВЭП, выполненной с традиционным способом резервирования « $N+1+K$ » на основе гипотетического ПН отечественного производства.

Это дает возможность оценить эффективность применения СВЭП с ММА и заложенных в ней технических решений в части способа резервирования и особенностей алгоритмов ее работы.

Кроме того, становится возможным определить соотношение значений одностипных показателей безотказности для СВЭП и ее основного силового компонента – ПН. Для этого необходимо учесть существующие различия между показателями безотказности для СВЭП и для ПН, заключающиеся в следующем:

– СВЭП после возникновения отказа подлежит восстановлению в условиях эксплуатации (является восстанавливаемым объектом), в то время как ПН – нет (является невосстанавливаемым объектом);

– значение показателя безотказности для СВЭП как составной части РЭА следует оценивать гамма-процентной наработкой до отказа T_γ , тогда как для ПН, представляющего собой компонент СВЭП, его изготовители, как правило, регламентируют значение средней наработки до отказа (T_0), являющейся, по сути, интегральной величиной.

Для «выравнивания» позиций:

– условно примем во внимание значение времени наработки СВЭП лишь до первого отказа (до восстановления);

– считаем, что для ПН значение T_0 соответствует $\gamma = 37\%$.

Последнее следует из известного выражения для вероятности безотказной работы для принятого выше экспоненциального закона распределения наработки до отказа

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (1)$$

при подстановке в него значения $t = T_0$ и учитывая, что

$$P(T_\gamma) = \frac{\gamma}{100\%}. \quad (2)$$

Само значение T_0 ПН в зависимости от значения температуры его корпуса, может изменяться от нескольких десятков тысяч до нескольких миллионов часов. Так, для ПН типа МДП-ЕП фирмы «Александр Электрик источники электропитания» при выбранном выше значении температуры корпуса, равном 70°C , значение наработки до отказа составляет порядка 80×10^3 ч (рис. 2). Именно этот тип ПН выбран в качестве гипотетического компонента отечественного производства, так как в номенклатуре поставщика реальный типонаминал ПН с выходной мощностью (500–600) Вт отсутствует.

С другой стороны, значение показателя безотказности зависит также от значения выходной мощности ПН. Фирма «Александр Электрик источники электропитания» для значения температуры корпуса ПН, равного 70°C , приводит график такой зависимости (рис. 3).

Рассмотрим три вышеупомянутых варианта реализации гипотетической СВЭП со значением выходной мощности 2000 Вт.

Для реализации первого варианта со способом резервирования «N+1» применим в ней пять «единичных» ПН фирмы Visog типа V375A28E600BL с отбором от каждого значения выходной мощности 500 Вт, работающих на общую шину нагрузки, а также все остальные компоненты, используемые в СВЭП с ММА.

Второй вариант гипотетической СВЭП полностью повторяет первый, кроме типа ПН (МДМ-ЕП).

Третий вариант гипотетической СВЭП поддерживает способ резервирования «N+1+K» и использует ПН типа МДМ-ЕП.

Расчеты во всех четырех вариантах СВЭП проведены по единой методике с учетом принятых выше условий.

Из графика рис. 3 следует, что значение наработки до отказа гипотетического ПН типа МДМ-ЕП (500 Вт) составляет 100×10^3 ч.

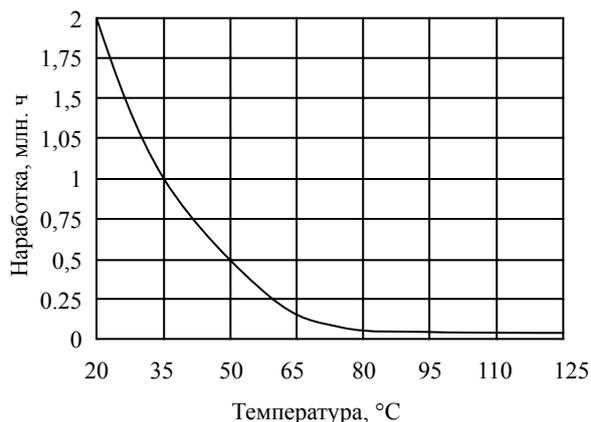


Рис. 2. Зависимость наработки до отказа ПН от температуры корпуса

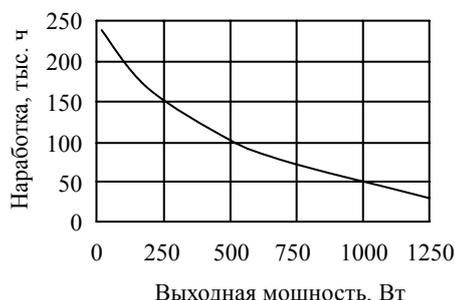


Рис. 3. Зависимость наработки до отказа ПН от выходной мощности

Используя уравнение (2), определим ориентировочные значения T_γ для обоих типов ПН и четырех вариантов СВЭП при значении $\gamma = 95\%$.

Для определения T_γ четырех вариантов СВЭП приведем ее структурную схему надежности (рис. 4), на основании которой составим по каждому из вариантов направленный граф переходов (рис. 5). Вершинами графа являются возможные состояния СВЭП, а ребрами – возможные переходы с интенсивностями, определяемыми соответствующими показателями безотказности элементов. Следует отметить, что номер состояния, в которое может попасть СВЭП, соответствует числу отказавших «линеек» ее силовых компонентов. В связи с этим очевидно, что СВЭП из начального состояния работоспособности «0» может попасть в конечное число состояний, последнее из которых «6» будет «поглощающим» (состоянием отказа).

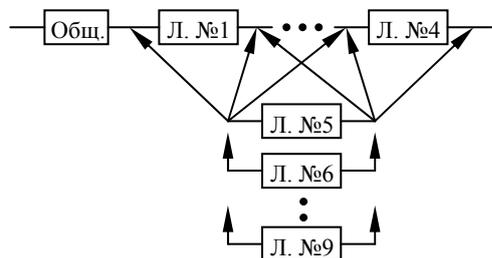


Рис. 4. Структурная схема надежности СВЭП

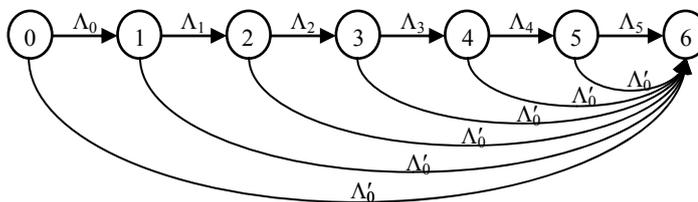


Рис. 5. Граф переходов СВЭП

На графе, представленном на рис. 5, переходы из одного состояния в другое с интенсивностями Λ_i ($i = 0 \dots 5$) происходят при отказе компонентов «линеек» СВЭП, а переходы Λ'_0 происходят при отказе ее общих компонентов. Поскольку интенсивности отказа общих компонентов СВЭП более чем на порядок меньше интенсивностей отказа компонентов ее «линеек», влияние первых на работоспособность СВЭП можно не учитывать. Тогда граф переходов СВЭП будет иметь вид, представленный на рис. 6.

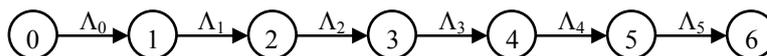


Рис. 6. Граф переходов СВЭП без учета отказов ее общих компонентов

Графу, представленному на рис. 6, соответствует система дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} p_0'(t) = -\Lambda_0 \cdot p_0(t), \\ p_1'(t) = \Lambda_0 \cdot p_0(t) - \Lambda_1 \cdot p_1(t), \\ \vdots \\ p_5'(t) = \Lambda_4 \cdot p_4(t) - \Lambda_5 \cdot p_5(t), \\ p_6'(t) = \Lambda_5 \cdot p_5(t), \end{cases} \quad (3)$$

удовлетворяющая начальным условиям вида

$$\begin{cases} p_0(0) = 1, \\ p_1(0) = 0, \\ \vdots \\ p_6(0) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где p_i – вероятность того, что СВЭП находится в состоянии i , а Λ_i – интенсивность перехода СВЭП из состояния i в состояние $i+1$, $i = 0 \dots 6$, причем $\Lambda_{-1} = \Lambda_6 = 0$.

Решая (3) и (4) получим значения T_γ . Эти значения, а также различные сравнительные коэффициенты приведены в таблице.

Сравнение значений показателя безотказности СВЭП и ПН

$\gamma = 95\%$, $t_{\text{корп.}} = 70^\circ\text{C}$		Тип «единичного» ПН	
		Отечественный (гипотетический МДМ-ЕП)	Vicor (V375A28E600BL)
Резервирование «N+1»	$T_\gamma \text{ СВЭП}$	5,5 тыс. ч	11 тыс. ч
	$\frac{T_\gamma \text{ ПН}}{T_\gamma \text{ СВЭП}}$	0,91	3,18
Резервирование «N+1+K»	$T_\gamma \text{ СВЭП}$	55 тыс. ч	110 тыс. ч
	$\frac{T_\gamma \text{ ПН}}{T_\gamma \text{ СВЭП}}$	0,091	0,318
$\frac{T_\gamma \text{ СВЭП}^{\text{«N+1+K»}}}{T_\gamma \text{ СВЭП}^{\text{«N+1»}}}$		10	

Основные результаты оценки уровня безотказности СВЭП с ММА. На основании проведенного расчета при фиксированных $N = K = 4$ (см. структурную схему надежности СВЭП, приведенную на рис. 4) и прочих равных условиях (температура корпуса, коэффициент нагрузки и пр.) можно сделать следующие выводы:

1. Способ резервирования «N + 1 + K», примененный в СВЭП с ММА, дает десятикратное повышение значения показателя безотказности по сравнению со СВЭП, использующей традиционный способ резервирования «N + 1».

2. Для достижения заданного значения показателя безотказности СВЭП с ММА со способом резервирования «N + 1 + K» в ней могут быть применены «единичные» ПН со значением показателя, безотказности более чем в 3 раза меньшим значения аналогичного показателя, заданного для СВЭП. Для СВЭП со способом резервирования «N + 1» значение показателя безотказности «единичных» ПН должно быть не менее чем в три раза выше аналогичного значения, заданного для СВЭП.

Литература

1. Колосов В.А. Проблемы создания современных систем вторичного электропитания РЭА / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко // Электрическое питание (СПб). – 2007. – № 7. – С. 14–20.
2. Колосов В.А. СВЭП с повышенной надежностью для формирования промежуточных напряжений электропитания РЭА / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко // Электропитание. – 2009. – № 1. – С. 8–12.
3. Либенко Ю.Н. Состояние разработки электронных модулей для СВЭП с магистрально-модульной архитектурой / Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2009. – № 4. – С. 17–19.
4. Колосов В.А. Вопросы организации СВЭП, влияющие на создание силовых электронных модулей / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко // Электропитание. – 2010. – № 1. – С. 4–8.
5. Колосов В.А. Результаты выполнения ОКР «Мегалит-Б-ВК» / В.А. Колосов, Ю.Н. Либенко, А.Н. Четин // Электропитание. – 2010. – № 3. – С. 6–15.
6. ГОСТ В 24425-90. Источники электропитания вторичные унифицированные радиоэлектронной аппаратуры. Общие технические требования. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 28 с.

Четин Андрей Николаевич

Аспирант, ст. инженер НТЦ-4 ОАО «НИИВК им. М.А. Карцева», г. Москва

Тел.: (495) 330-15-38

Эл. почта: chetinandrew@yandex.ru

Chetin A.N.

Reliability prediction of power-supply system with dataway-modular architecture

In the article we considered the peculiar properties of reliability prediction of power-supply systems with dataway-modular architecture which provide high reliability index and are used to supply electronics based on main objects.

Keywords: power-supply system, dataway-modular architecture, redundancy, reliability.
