

УДК 519.6:536.764

А.И. Ивон, В.Р. Колбунов, И.М. Черненко
**ЗАЩИТА БЛОКА ПИТАНИЯ КОМПЬЮТЕРА
ОТ ТОКА ВКЛЮЧЕНИЯ**

Аннотация. Выполнен анализ кинетики напряжения и тока во входной электрической цепи блока питания компьютера содержащей критический терморезистор на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики. Показана возможность эффективного ограничения тока включения с помощью такого терморезистора и определены критерии выбора его оптимальных параметров для защиты безтрансформаторных источников питания от тока включения.

Ключевые слова: безтрансформаторный источник питания; критический терморезистор; защита от тока включения.

Введение. Характерной особенностью безтрансформаторного блока питания компьютера, является возникновение при включении сетевого напряжения броска тока через диоды выпрямительного моста. Амплитуда броска тока составляет около сотни ампер, что может привести к пробое диодов. Для предотвращения пробоя во входной цепи блока питания включается терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) [1,2], который в холодном состоянии имеет повышенное сопротивление, что ограничивает бросок зарядного тока емкостного делителя напряжения при включении питания. Поскольку терморезистор разогревается протекающим через него током, его сопротивление падает, и в дальнейшем он не влияет на работу схемы.

Нами разработан терморезистивный материал на основе VO_2 и ванадиево-фосфатных стекол (ВФС) – диоксиднованадиевая стеклокерамика [3], сочетающий свойства терморезистора и термического реле. При нагревании терморезисторы на основе такого материала скачком уменьшают сопротивление на два порядка и могут пропускать в низкоомном состоянии токи до 10 А, разогреваясь до температуры не выше 90 °С [4]. Это выгодно отличает их от обычных полупроводниковых терморезисторов, которые не имеют скачка на температурной зависимости сопротивления (не обладают свойством термического реле) и требуют разогрева до более высоких температур

© Ивон А.И., Колбунов В.Р., Черненко И.М., 2009

для уменьшения сопротивления хотя бы на порядок по сравнению с его значением в холодном состоянии [5].

Постановка задачи. Цель работы – определение оптимальных параметров терморезисторов на основе диоксидванадиевой стеклокерамики для защиты безтрансформаторных блоков питания от тока включения.

Обоснование полученных результатов. Типовая схема входной электрической цепи блока питания компьютера показана на рис.1 [1,2].

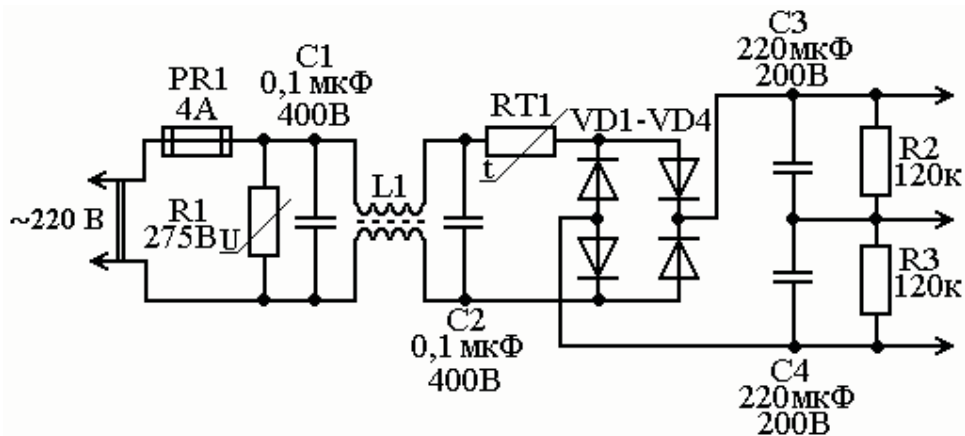


Рисунок 1 - Принципиальная электрическая схема входной цепи блока питания компьютера

На входе блока питания расположен выпрямитель сетевого напряжения на диодах VD1-VD4, в состав которого входит плавкий предохранитель PR1, варистор R1, защищающий блок питания от перенапряжений, фильтр высокочастотных импульсных помех на конденсаторах C1, C2 и дросселе L1, а также терморезистор RT1 с отрицательным ТКС и делитель напряжения на конденсаторах C3, C4 и резисторах R2, R3. Конденсаторы большой емкости C3, C4, включенные на выходе мостового выпрямителя VD1-VD4, выполняют также функцию фильтра, сглаживающего пульсации напряжения.

Особенностью схемы, показанной на рис. 1, является то, что при отсутствии терморезистора RT1, она работает при включении сетевого напряжения в режиме короткого замыкания через незаряженные конденсаторы C3, C4 и открытые диоды выпрямительного моста. Это вызывает бросок тока, величина которого, с учетом малого сопротивления плавкого предохранителя и открытых диодов, может достигать сотни ампер, что является

небезопасным для диодов. При наличии терморезистора, его сопротивление в холодном состоянии ограничивает величину тока включения и тем самым препятствует пробое диодов.

Использование в схеме (рис. 1) вместо обычного полупроводникового терморезистора, критического терморезистора, обладающего свойством термического реле, позволяет повысить эффективность защиты безтрансформаторных блоков питания от тока включения. На рис. 2 показана температурная зависимость удельного электрического сопротивления диоксиднованадиевой стеклокерамики состава (вес. %) $40\text{VO}_2-4,5\text{Cu}-15\text{ВФС}-40,5\text{SnO}_2$.

Как видно, благодаря скачку электрического сопротивления в области температуры фазового перехода металл-полупроводник в VO_2 $T_t \sim 70^\circ\text{C}$, терморезистор на основе такой стеклокерамики достаточно нагреть до температуры $80-90^\circ\text{C}$, чтобы его сопротивление уменьшилось в сто раз. Такая особенность практически идеально подходит для защиты входной цепи безтрансформаторных источников питания от тока включения, поскольку в холодном состоянии терморезистор имеет высокое сопротивление R_{off} , ограничивающее ток заряда конденсаторов C_3, C_4 (рис. 1), а после разогрева скачком уменьшает сопротивление до малой величины R_{on} и, таким образом, не влияет на дальнейшую работу схемы блока питания.

Для определения интервала времени t_p , с момента включения сетевого напряжения, который необходим для нагрева терморезистора до температуры T_t , при которой терморезистор на основе диоксиднованадиевой керамики скачком изменяет сопротивление (рис. 2), запишем уравнение теплового баланса:

$$C_T \frac{d\Delta T}{dt} + K \Delta T = \frac{U_0^2 \sin^2(\omega t)}{R_{\text{off}}}, \quad (1)$$

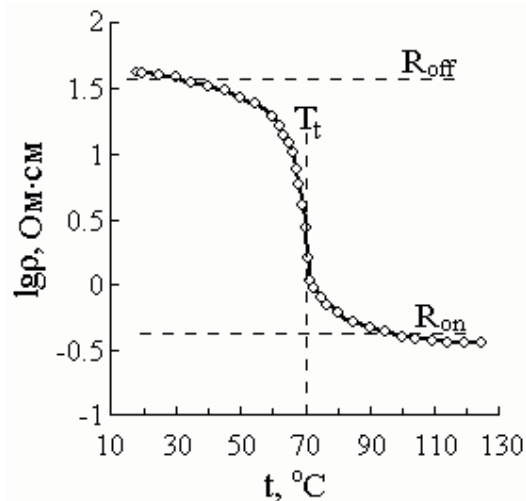


Рисунок 2 - Температурная зависимость удельного электрического сопротивления керамики (вес.%) $40\text{VO}_2-4,5\text{Cu}-15\text{ВФС}-40,5\text{SnO}_2$

где C_T – теплоемкость терморезистора; $\Delta T = T - Q$ – разность между температурой T терморезистора и температурой Q окружающей среды; K – коэффициент теплового рассеивания; R_{off} – сопротивление терморезистора ниже температуры фазового перехода металл-полупроводник T_t (рис. 2); U_0 – амплитуда сетевого напряжения; t – время; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Решение (1) найдем для упрощенного случая, предположив, что R_{off} не зависит от температуры. При начальном условии $t=0$, $\Delta T = 0$ оно имеет вид:

$$\Delta T = \frac{U_0^2 \left(1 + (2\omega\tau_T)^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) \right) - \cos(2\omega t) - 2\omega\tau_T \sin(2\omega t) \right)}{2R_{\text{off}}K \left(1 + (2\omega\tau_T)^2 \right)}, \quad (2)$$

где $\tau_T = C_T/K$ – тепловая постоянная времени терморезистора.

Значение τ_T для объемных терморезисторов обычно составляет секунды или несколько десятков секунд [5], поэтому на частоте сетевого напряжения $f = 50$ Гц выполняется условие $2\omega\tau_T \gg 1$. Это дает возможность упростить соотношение (2), приведя его к виду:

$$\Delta T = \frac{U_0^2}{2R_{\text{off}}K} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) \right). \quad (3)$$

Подставив в (3) $\Delta T_t = T_t - Q$ и $t = t_p$, для времени разогрева терморезистора до температуры фазового перехода металл-полупроводник получим:

$$t_p = -\tau_T \ln \left(1 - \frac{2R_{\text{off}}K\Delta T_t}{U_0^2} \right). \quad (4)$$

Поскольку амплитуда сетевого напряжения $U_0 = 220$ В, а величины K , R_{off} , ΔT_t имеют типовые значения $K \leq 10^{-1}$ Вт/К, $R_{\text{off}} \sim 10^2$ Ом, $\Delta T_t \sim 70$ К, то выполняется условие $2R_{\text{off}}K\Delta T_t/U_0^2 \ll 1$. С учетом этого условия, разложив в ряд логарифм и ограничившись первым членом разложения, получим:

$$t_p = \frac{2C_T R_{\text{off}} \Delta T_t}{U_0^2}. \quad (5)$$

Проанализируем кинетику напряжения и тока во входной цепи схемы безтрансформаторного источника питания после включения сетевого напряжения. Отметим, что, в принципе, возможны два

способа включения терморезистора R_{T1} (рис. 1): он может быть включен как до выпрямительного диодного моста, так и после него. В обоих случаях терморезистор ограничивает ток заряда конденсаторов делителя-фильтра напряжения $C3$, $C4$. Бросок этого тока при включении питания компьютера опасен для диодов выпрямителя $VD1 - VD4$.

Эквивалентная схема цепи заряда конденсаторов $C3$, $C4$ без учета незначительного влияния на ток заряда фильтра высокочастотных импульсных помех (дроссель $L1$, конденсаторы $C1$, $C2$, рис. 1), показана на рис. 3.

На этом рисунке R_d – эквивалентное прямое статическое электрическое сопротивление диодов выпрямительного моста, R_T – сопротивление терморезистора, C_ϕ – емкость фильтра-делителя напряжения ($C_\phi = C3C4/(C3+C4)$). Для упрощения анализа будем считать, что заряд конденсатора C_ϕ происходит от источника постоянного (выпрямленного и сглаженного) напряжением U_0 , сопротивление терморезистора $R_T = R_{off}$ выше температуры фазового перехода металл-полупроводник не зависит от температуры, а прямое сопротивление диодов R_d – от напряжения.

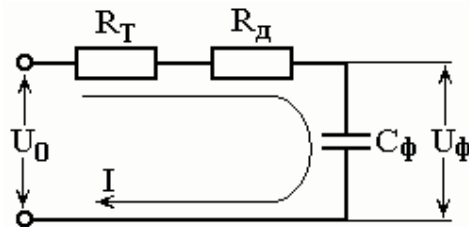


Рисунок 3- Эквивалентная схема цепи заряда конденсаторов делителя-фильтра безтрансформаторного источника питания

Когда во входной цепи блока питания нет терморезистора ($R_T = 0$), кинетика тока I и напряжения U_ϕ на конденсаторе C_ϕ , с учетом эквивалентной схемы на рис. 3, описывается соотношениями:

$$U_\phi(t) = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{C_\phi R_d}\right) \right), \quad (6)$$

$$I(t) = \frac{U_0}{R_d} \exp\left(-\frac{t}{C_\phi R_d}\right), \quad (7)$$

то есть, в момент включения сетевого напряжения, величина броска электрического тока составляет U_0/R_d и при напряжении $U_0 = 220$ В

и прямом статическом сопротивлении диодов единицы Ом достигает сотни ампер.

В интервале времени $t \leq t_p$ терморезистор, имеет высокое сопротивление R_{off} , соответствующее полупроводниковой фазе диоксида ванадия. Поэтому его включение во входную цепь блока питания обеспечивает ограничение тока заряда конденсаторов делителя-фильтра C_ϕ . В этом случае временные зависимости напряжения U_ϕ и тока, с учетом эквивалентной схемы, представленной на рис. 3, описываются соотношениями:

$$U_\phi(t) = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{C_\phi(R_d + R_{off})}\right) \right), \quad (8)$$

$$I(t) = \frac{U_0}{(R_d + R_{off})} \exp\left(-\frac{t}{C_\phi(R_d + R_{off})}\right). \quad (9)$$

Таким образом, величина броска тока включения $U_0/(R_d + R_{off})$ в $\gamma_1 = 1 + R_{off}/R_d$ (10)

раз меньше по сравнению со случаем, когда терморезистор во входной цепи блока питания отсутствует.

При анализе кинетики напряжения и тока в цепях с терморезисторами на основе диоксидованадиевой стеклокерамики нужно учитывать, что в момент времени t_p , определяемый соотношением (5), когда терморезистор нагревается до температуры T_t , возникает вторичный бросок электрического тока, обусловленный резким уменьшением сопротивления от значения R_{off} до малого значения R_{on} (рис. 2). Для цепи, представленной на рис. 3, величину этого броска тока $I(t_p)$ можно найти, воспользовавшись соотношениями (5) и (8):

$$I(t_p) = \frac{U_0 - U_\phi(t_p)}{R_d + R_{on}} = \frac{U_0}{R_d + R_{on}} \exp\left(-\frac{2C_T \Delta T_t}{C_\phi U_0^2}\right). \quad (11)$$

При выводе (11) учтено, что $R_{off} \gg R_d$.

Можно также показать, что в интервале времени $t > t_p$ временные зависимости напряжения U_ϕ и тока в цепи на рис. 3 описываются соотношениями:

$$U_\phi(t) = U_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t_p}{C_\phi(R_d + R_{off})}\right) \exp\left(-\frac{t - t_p}{C_\phi(R_d + R_{on})}\right) \right), \quad (12)$$

$$I(t) = \frac{U_0}{R_d + R_{on}} \left(-\frac{t_p}{C_\phi(R_d + R_{off})} \right) \exp\left(-\frac{t - t_p}{C_\phi(R_d + R_{on})} \right), \quad (13)$$

Результаты расчета временных зависимостей напряжения и тока по формулам (8), (9), (12), (13) представлены на рис. 4, где такие зависимости приведены также для случая отсутствия терморезистора (расчет по формулам (6), (7)). Результаты получены при значениях величин, входящих в формулы: $U_0 = 220$ В, $R_{off} = 60$ Ом, $R_{on} = 0,5$ Ом, $R_d = 2$ Ом, $C_\phi = 110$ мкФ, $T_t = 70$ °С, $Q = 20$ °С.

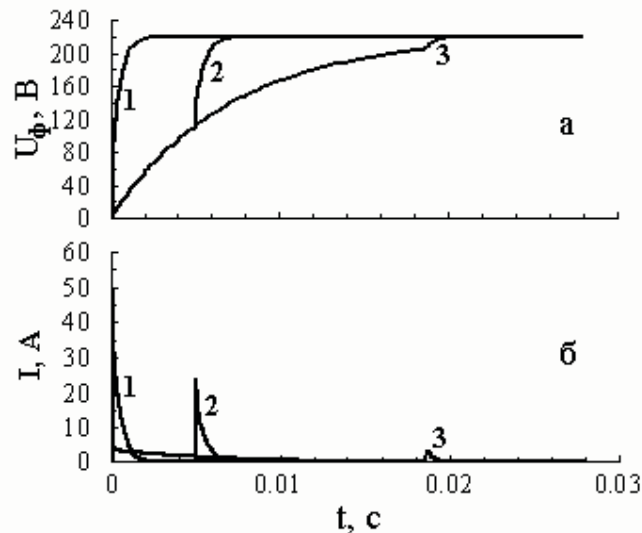


Рисунок 4 - Расчетные временные зависимости напряжения U_ϕ на конденсаторах делителя-фильтра (а) и тока во входной цепи безтрансформаторного источника питания (б) при отсутствии критического терморезистора (1) и при наличии такого терморезистора, который имеет теплоемкость $C_T = 0,04$ Дж/К (2) и $C_T = 0,15$ Дж/К (3)

Из соотношения (11) вытекает, что величину вторичного броска электрического тока ограничивает теплоемкость терморезистора $C_T = c_T dV$ (c_T , d - удельная теплоемкость и плотность материала терморезистора; V - объем рабочего тела терморезистора). С ростом теплоемкости C_T величина вторичного броска электрического тока $I(t_p)$ экспоненциально убывает. Эта величина в

$$\gamma_2 = \frac{U_0}{R_d I(t_p)} = \left(1 + \frac{R_{on}}{R_d} \right) \exp\left(\frac{2C_T \Delta T_t}{C_\phi U_0^2} \right) \quad (14)$$

раз меньше величины броска тока включения при отсутствии терморезистора во входной цепи блока питания.

При поиске критерия выбора оптимальных параметров критического терморезистора для защиты безтрансформаторных источников питания от тока включения будем исходить из того, что бросок тока включения, по сравнению со случаем, когда терморезистор отсутствует, должен быть уменьшен в γ раз ($\gamma \sim 10 - 100$). Поскольку это относится к первичному и вторичному броскам тока, в качестве условия их ограничения можно использовать соотношение $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$. Это соотношение позволяет выбрать оптимальные размеры критического терморезистора на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики при заданной величине емкости конденсаторов фильтра-делителя напряжения $C_\phi = C_3C_4/(C_3+C_4)$.

Будем считать, что терморезистор имеет рабочее тело в форме цилиндра с высотой L и площадью оснований S , на которые нанесены электроды. Тогда соотношения (10), (14) через удельные параметры материала и геометрические размеры рабочего тела терморезистора можно записать в виде:

$$\gamma = 1 + \frac{\rho_{\text{off}} L}{R_d S}, \quad (15)$$

$$\gamma = \left(1 + \frac{\rho_{\text{on}} L}{R_d S} \right) \exp \left(\frac{2c_T d L S \Delta T_t}{C_\phi U_0^2} \right). \quad (16)$$

Эти соотношения представляют собой систему уравнений с двумя неизвестными, из которой можно найти геометрические параметры терморезистора на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики, при которых величины вторичного и первичного бросков тока включения безтрансформаторного источника питания будут уменьшены в заданное число γ раз.

При $R_{\text{он}} \ll R_d$ из (15) и (16) вытекает, что оптимальные геометрические параметры критического терморезистора на основе диоксиднованадиевой стеклокерамики могут быть рассчитаны по формулам:

$$L = \sqrt{\frac{R_d C_\phi U_0^2 (\gamma - 1) \ln \gamma}{2c_T d \Delta T_t \rho_{\text{off}}}}, \quad (17)$$

$$S = \sqrt{\frac{\rho_{\text{off}} C_\phi U_0^2 \ln \gamma}{2(\gamma - 1) R_d c_T d \Delta T_t}}. \quad (18)$$

В частности для терморезистора, изготовленного из стеклокерамики состава $40\text{VO}_2-4,5\text{Cu}-15\text{ВФС}-40,5\text{SnO}_2$ (рис. 2), при значениях параметров: $\gamma=40$; $R_d = 2 \text{ Ом}$; $U_0 = 220 \text{ В}$; $\rho_{\text{off}} = 40 \text{ Ом см}$; $d = 3,2 \text{ г см}^{-3}$; $c_T = 0,7 \text{ Дж г}^{-1}\text{К}^{-1}$; $\Delta T_t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_\Phi = 110 \text{ мкФ}$, расчет по формулам (17), (18) приводит к следующим геометрическим параметрам: $L = 0,41 \text{ см}$, $S = 0,21 \text{ см}^2$. Таким образом, рабочее тело терморезистора должно быть выполнено в виде цилиндра с высотой $L \sim 4,1 \text{ мм}$ и диаметром оснований $\sim 2,7 \text{ мм}$. Такой критический терморезистор ниже температуры $T_t \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ будет иметь сопротивление $R_{\text{off}} \sim 80 \text{ Ом}$, а выше этой температуры – сопротивление $R_{\text{он}} \sim 0,8 \text{ Ом}$. Его включение во входную цепь безтрансформаторного блока питания компьютера обеспечит эффективную защиту диодов выпрямительного моста от тока включения сетевого напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николайчук О. Простой импульсный источник питания // Схемотехника. – 2001. - №7. – С. 8-11.
2. Блоки питания [Электронный ресурс] / 2008 – Режим доступа: <http://www.blok-pitaniya.2vs2.ru>.
3. Деклараційний патент 40748А Україна, МКИ С 04 В 35/495, Н 01 В 01/08. Спосіб одержання напівпровідникової кераміки на основі діоксиду ванадію: О.І. Івон, В.Р. Колбунов, І.М. Черненко (Україна); Дніпропетровський державний університет. – № 99031402; Заявл. 16.03.99; Опубл. 15.08.2001. Бюл. №7. – 2 с.
4. Ivon A.I., Kolbunov V.R., Chernenko I.M. Conductivity of VO_2 -based ceramics. // J. Mat. Sci: Materials in Electronics.–2006.– V. 17, №1. – P. 57 – 62.
5. Шефтель И.Т. Терморезисторы (Электропроводность $3d$ –окислов. Параметры, характеристики и области применения) – М.: Наука, 1973.– 416 с.

Получено 26.11.2009г.