

Технологии ограничения пускового тока

В системах электропитания

В статье описываются алгоритмы и особенности работы ограничителей пускового тока в системах электропитания постоянного тока. Рассматриваются вопросы повышения их надежности и расширения функциональных возможностей.

Анатолий Миронов

Ограничители пускового тока (ОПТ) широко применяются для построения систем электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), чувствительной к броскам тока и помехам в сети, а также имеющей первичный источник электропитания, ограниченный по мощности. К таковым в первую очередь относятся системы вторичного электропитания (СВЭП) космических аппаратов (КА), чей первичный источник питания имеет ограниченные энергоресурсы.

Обычно ОПТ включается на входе СВЭП, ограничивая зарядный ток конденсаторов входных фильтров всей группы модулей электропитания и защищая от подгорания контакты силового коммутатора, ресурс которых невелик. С другой стороны, при выходе из строя одного из модулей питания СВЭП ОПТ должен ограничивать потребляемый ток и защищать его от полного разрушения. Включения через ОПТ требуют и такие нагрузки, как электродвигатели, нагрузки

типа лампы накаливания, электрические фильтры радиопомех и другие, потребляемый ток в режиме включения которых значительно превышает указанный параметр в установившемся режиме работы.

Рассмотрим различные структуры ОПТ, их особенности и возможности. Для маломощных нагрузок (единицы ватт) можно применять простые ОПТ, в которых регулирующий элемент РЭ работает в непрерывном режиме. На рис. 1 приведена функциональная схема ОПТ с общей для входа и выхода шиной [1]. Он содержит регулирующий элемент РЭ, резисторный датчик тока $R_{ДТ}$, источник опорного напряжения $U_{ОП}$ и узел управления работой УУ.

Максимальное значение тока ОПТ $I_{ОПТ,МАКС}$ определяется номиналом резистора-датчика тока $R_{ДТ}$:

$$I_{ОПТ,МАКС} = U_{ОП} / R_{ДТ}$$

Работой регулирующего элемента РЭ управляет УУ, на который поступает в качестве уставки напряжение от источника опорного напряжения $U_{ОП}$ и для сравнения — напряжение с датчика тока, содержащее информацию о реальном значении тока через РЭ. Выходной конденсатор C имеет небольшую емкость и обычно выполняет роль корректирующего.

При токе регулирующего элемента РЭ $I_{РЭ} < I_{РЭ,МАКС}$ сигнал на выходе УУ максимален, РЭ открыт и работает в режиме насыщения либо в граничном режиме. При увеличении тока нагрузки до значения $I_{РЭ,МАКС}$ сигнал на выходе УУ уменьшается, переводя РЭ в линейный режим и ограничивая тем самым ток через него и в нагрузку значением $I_{РЭ,МАКС}$. Установившееся значение выходного напряжения ОПТ при этом

$$U_{ВЫХ} = R_{Н} \times I_{РЭ,МАКС}$$

где $R_{Н}$ — эквивалентное активное сопротивление нагрузки.

На РЭ в этом режиме выделяется мощность $P_{РЭ} = (U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) \times I_{РЭ,МАКС}$, а при коротком замыкании

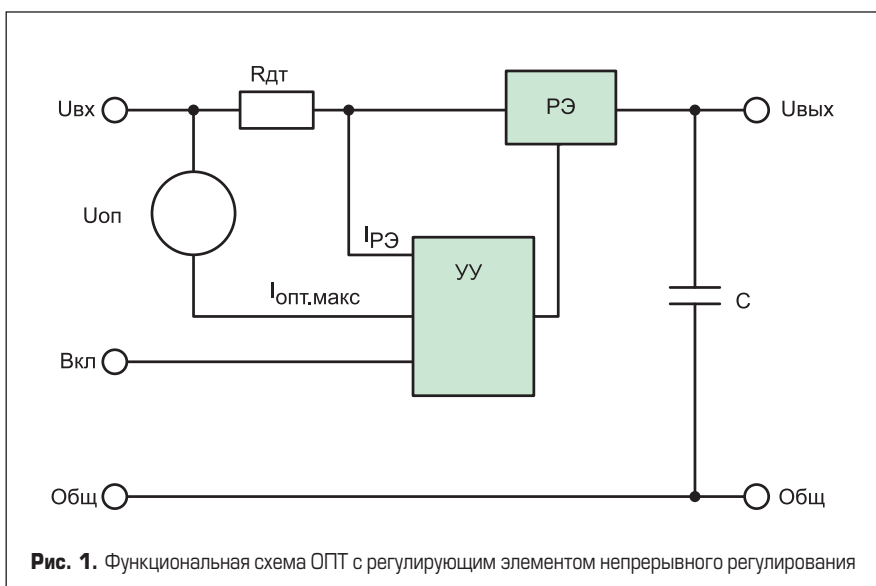


Рис. 1. Функциональная схема ОПТ с регулирующим элементом непрерывного регулирования

на выходе или в первый момент после включения ОПТ — $P_{РЭ\text{ МАКС}} = U_{ВХ} \times I_{РЭ\text{ МАКС}}$.

Поскольку ОПТ работает в непрерывном режиме, он не создает помех ни в режиме запуска, ни в установившемся режиме, однако и практически не фильтрует помехи, идущие из нагрузки в первичную сеть и обратно. Его выходная характеристика показана на рис. 2 (зависимость а).

Падение напряжения при максимальном выходном токе может составлять десятки милливольт как на датчике тока, так и на открытом РЭ, в качестве которого теперь используются ДМОП-транзисторы с малым сопротивлением открытого канала. Мощность, рассеиваемая ОПТ в установившемся режиме, составляет десятки-сотни милливольт, он практически не нагревается, что помогает решить задачу миниатюризации прибора. И наконец, рассмотренный ОПТ индифферентен к характеру нагрузки, универсален в этом смысле и реализует максимальную скорость заряда батареи конденсаторов из всех типов ОПТ при заданном токе $I_{РЭ\text{ МАКС}}$.

В УУ обычно предусматривают дополнительный вход управления включением ОПТ (вывод Вкл). Это позволяет отключать нагрузку, работа которой в данное время не требуется, подачей маломощного управляющего сигнала логического характера. Таким способом просто реализуется режим энергосбережения, что особенно важно для СВЭП КА.

Недостатком описанной структуры ОПТ является относительно большая мощность, выделяемая на РЭ во время запуска или короткого замыкания на выходе, что может привести к перегреву РЭ и ограничивает время действия перегрузки на уровне сотен микросекунд — единиц миллисекунд. Мощность, выделяемая на РЭ при КЗ, многократно превышает ее значение в установившемся режиме. Поэтому ОПТ с непрерывным режимом регулирования РЭ применяется только при малых мощностях нагрузки и при небольших входных напряжениях (22–34 В). Но даже в этом случае необходимо предусмотреть ограничение длительности перегрузки РЭ включением в схему, например, специального таймера, принудительно выключающего РЭ по истечении указанного времени (на рис. 1 не показан). Тогда при работе в режиме запуска в течение указанного периода («неудачный запуск») ОПТ выключается во избежание перегрева РЭ с последующим автоматическим включением. Кроме того, конструируя прибор, необходимо предусматривать эффективные способы отвода тепла от РЭ.

Другой путь защиты ОПТ от перегрева — перевод РЭ при перегрузке в облегченный режим, при котором выделяемая на нем мощность значительно уменьшается [1]. Функциональная схема такого ОПТ показана на рис. 3. Здесь и далее вход управления включением «Вкл» не показывается.

Здесь УУ анализирует не только ток через РЭ, но и падение напряжения на нем, то есть фактически выделяемую на нем мощность. При малых значениях падения напряжения на РЭ ограничитель пускового тока работает

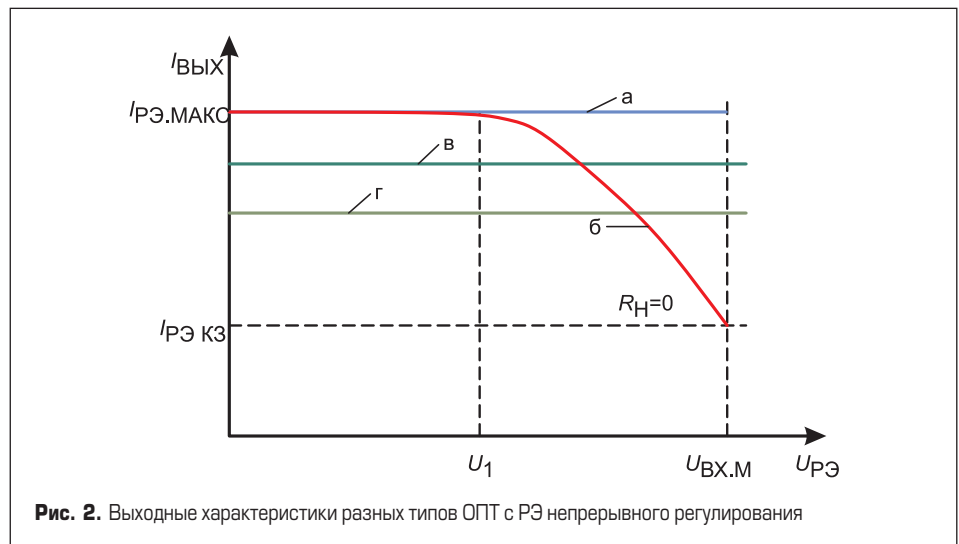


Рис. 2. Выходные характеристики разных типов ОПТ с РЭ непрерывного регулирования

аналогично ОПТ, представленному на рис. 1. При увеличении этого напряжения сверх некоторого предельного значения U_1 УУ переводит РЭ в линейный режим, ограничивая, а затем и уменьшая ток $I_{РЭ\text{ МАКС}}$ и выделяемую на нем мощность. Для аналоговых схем такое техническое решение применяется для защиты РЭ от перегрузки по току и мощности [2] в усилителях, стабилизаторах напряжения непрерывного регулирования. Статическая выходная характеристика ОПТ показана на рис. 2 (зависимость б). При уменьшении сопротивления нагрузки R_H горизонтальный участок плавно переходит в падающий и при коротком замыкании на выходе ($R_H = 0$) выходной ток ОПТ и выделяемая на нем мощность в несколько раз меньше, чем у ОПТ на рис. 1 с таким же максимальным током $I_{РЭ\text{ МАКС}}$. Следовательно, время безопасной работы в режиме перегрузки рассматриваемого ОПТ может быть существенно увеличено.

Эта особенность работы сохраняет РЭ, но сужает функциональные возможности ОПТ. Время запуска увеличится, поскольку на первом этапе ток $I_{РЭ}$ значительно меньше $I_{РЭ\text{ МАКС}}$. Кроме того, описанный алгоритм работы ОПТ таит в себе еще одну нежелательную особенность: описанный ОПТ не всегда сможет работать с нагрузками типа электродвигателя или лампы накаливания.

Двигателю, например, чтобы раскрутиться, как раз и нужен большой пусковой ток. Он уменьшится только после раскручивания. Поэтому двигатель может так и остаться «не раскрутившимся».

Поскольку мощность, выделяемая на РЭ при перегрузке, существенно меньше таковой в сравнении с ОПТ на рис. 1, описанный ОПТ может работать с более мощными нагрузками. Остальные характеристики прибора не отличаются от ОПТ, описанного ранее.

Еще один способ защиты РЭ во время запуска или КЗ на выходе — установка в УУ элементов защиты от перегрева. Функциональная схема такого ОПТ показана на рис. 4.

Конструктивно датчик температуры D° должен устанавливаться в непосредственной близости от РЭ, чтобы адекватно измерять его температуру. В идеале он должен быть реализован на одном кристалле с РЭ также по полупроводниковой технологии. Схемотехника полупроводниковых датчиков температуры достаточно хорошо разработана и широко используется при проектировании РЭА [4].

При этом датчику D° не важно, по какой причине происходит повышение температуры. Это может быть перегрев РЭ вследствие перегрузки на выходе ОПТ либо повышение температуры окружающей среды, в которой работает РЭА. При температуре датчика

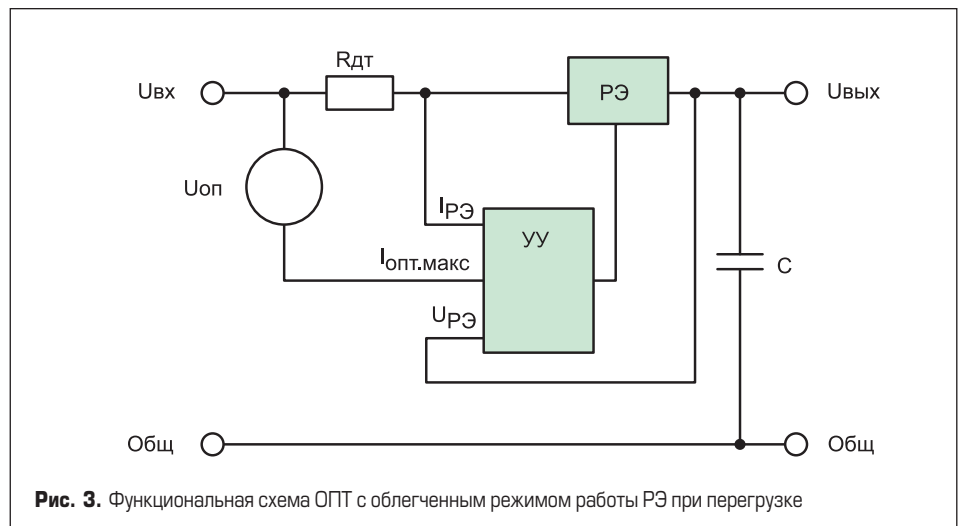


Рис. 3. Функциональная схема ОПТ с облегченным режимом работы РЭ при перегрузке

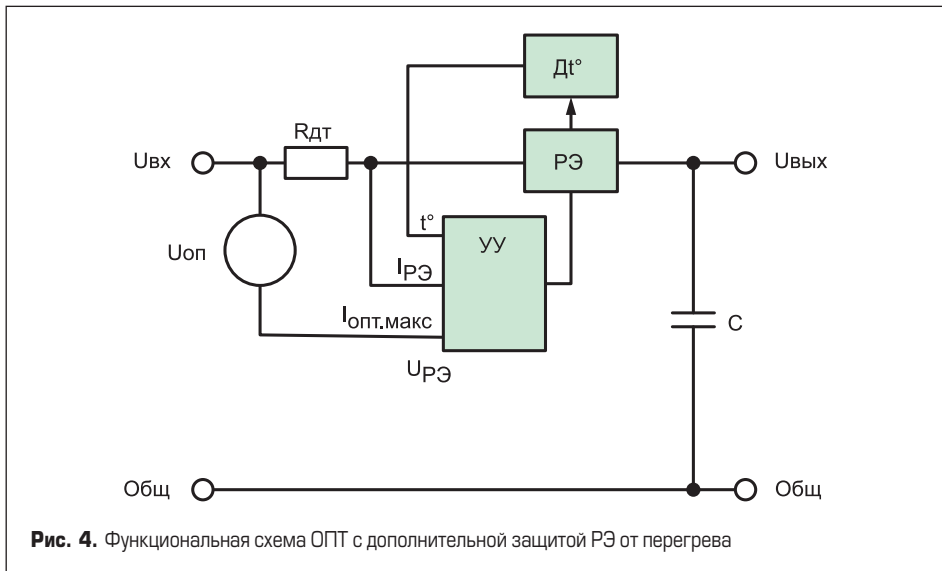


Рис. 4. Функциональная схема ОПТ с дополнительной защитой РЭ от перегрева

меньше предельной выходная характеристика ОПТ соответствует показанной на рис. 2 (зависимость а). При повышении температуры

РЭ алгоритм работы ОПТ может быть различным. Можно, например, пропорционально увеличению температуры сверх некоторого

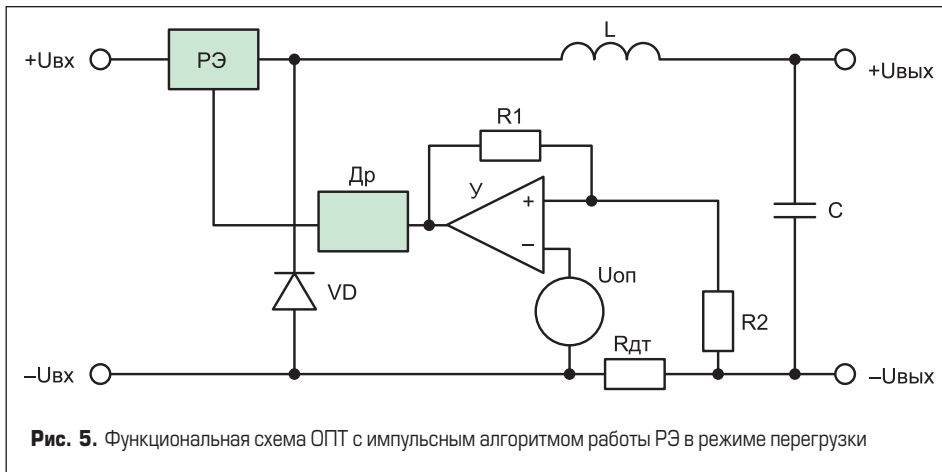


Рис. 5. Функциональная схема ОПТ с импульсным алгоритмом работы РЭ в режиме перегрузки

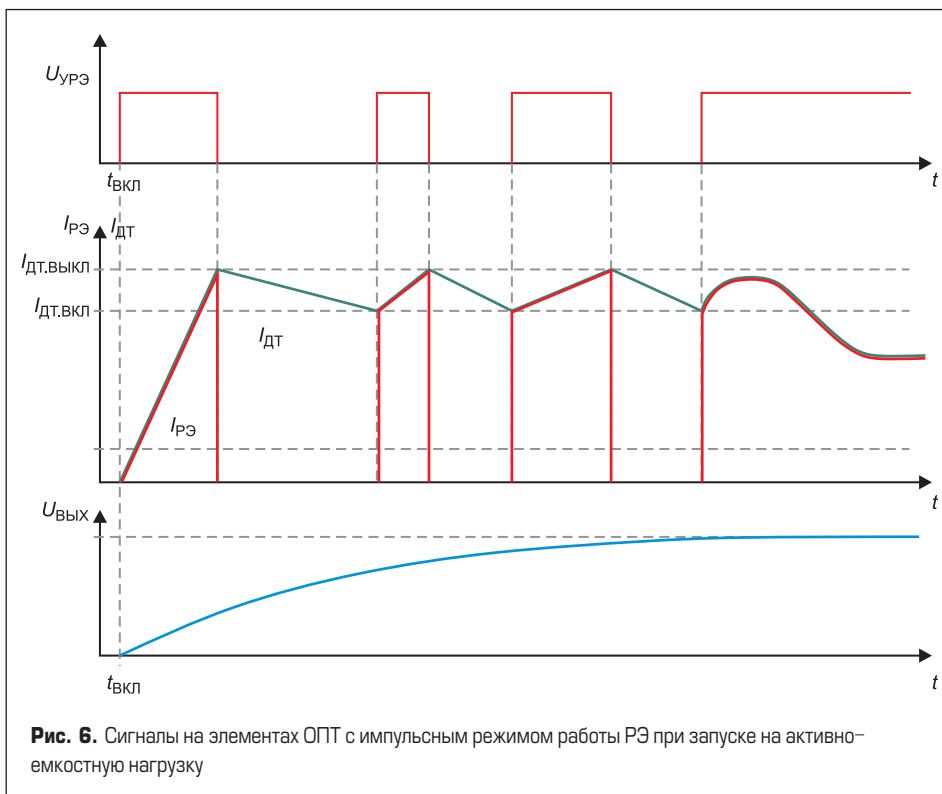


Рис. 6. Сигналы на элементах ОПТ с импульсным режимом работы РЭ при запуске на активно-емкостную нагрузку

предела уменьшать значение $I_{PЭ \text{ макс}}$ (зависимости в, г на рис. 2, причем температура $t_B < t_T$). Или при достижении некоторой предельной температуры ОПТ может просто выключаться с последующим автоматическим включением при остывании.

Мощность обслуживаемой нагрузки такого ОПТ при одинаковых силовых элементах и другие технические характеристики будут такого же уровня, как и у ОПТ, построенного по схеме рис. 3.

Повысить надежность ОПТ можно, дополнив схемотехнику и алгоритмы работы ОПТ на рис. 3 датчиком температуры Dt° .

Альтернативный путь уменьшения выделяемой в ОПТ мощности — перевод РЭ при перегрузке в импульсный режим работы. В [4] приведена электрическая схема одного из вариантов ОПТ с «импульсным» алгоритмом работы РЭ. На рис. 5 показана его функциональная схема, на рис. 6 — эпюры сигналов во время запуска на активно-емкостную нагрузку.

Усилитель У измеряет ток в «минусовой» шине питания с помощью резистора-датчика тока $R_{дт}$ и управляет работой регулирующего элемента РЭ. Драйвер Др преобразует выходной сигнал У в формат, требуемый для открытия и запираия РЭ. Для устойчивой работы ОПТ в режиме переключения усилитель У охвачен положительной обратной связью на резисторах R_1, R_2 .

В установившемся режиме работы ОПТ для тока нагрузки I_H справедливо соотношение: $I_H = I_L = I_{дт}$. На выходе У напряжение близко к нулю: $U_{у \text{ вкл}} \approx 0$ и РЭ открыт. Рабочий ток протекает от источника входного напряжения через открытый РЭ, дроссель L, нагрузку и резистор-датчик тока $R_{дт}$. При включении ОПТ, когда происходит зарядка конденсатора C и конденсаторов входных фильтров, подключенных на выход ОПТ модулей питания СВЭП, ток нагрузки увеличивается. При напряжении на датчике тока $U_{дт \text{ вкл}} = U_{оп} \times (1 + R_1/R_2)$ на выходе У скачкообразно устанавливается напряжение $U_{у \text{ вых}}$, а РЭ закрывается. Это выражение справедливо при условии, когда $R_1, R_2 \gg R_{дт}$, что выполняется во всех практических реализациях ОПТ. Ток в дросселе L начинает уменьшаться, протекая теперь через замыкающий диод VD, нагрузку и $R_{дт}$.

При напряжении на $R_{дт}$ $U_{дт \text{ вкл}} = U_{оп} \times (1 + R_2/R_1) - U_{у \text{ вых}} \times R_2/R_1$ на выходе У вновь устанавливается на уровне 0, РЭ открывается и процесс повторяется. Таким образом резисторами R_1, R_2 реализован гистерезис $\Delta U_{дт} = U_{дт \text{ вкл}} - U_{дт \text{ выкл}} = U_{у \text{ вых}} \times R_2/R_1$. От выражений напряжения переключения $U_{дт \text{ вкл}}, U_{дт \text{ выкл}}$ через $R_{дт}$ просто перейти к соответствующим значениям токов $I_{дт \text{ вкл}}, I_{дт \text{ выкл}}$.

С каждым периодом работы напряжение на выходе ОПТ увеличивается до тех пор, пока на очередном периоде работы ток $I_{дт}$ не достигает значения $I_{дт \text{ выкл}}$. РЭ остается открытым и переходный процесс включения заканчивается. ОПТ на этапе запуска работает как импульсный преобразователь релейного типа.

РЭ при перегрузке или запуске работает в ключевом режиме. Мощность, выделяющаяся на нем, во много раз меньше аналогичного показателя ОПТ с РЭ непрерывного регулирования, поэтому он может работать с нагрузками в десятки и сотни ватт. Длительность перегрузки значения уже не имеет. ОПТ фактически теперь является не ограничителем пускового тока, а просто ограничителем тока. Выходная характеристика ОПТ для среднего значения выходного тока соответствует зависимости a на рис. 2.

Описанный ОПТ обладает рядом полезных свойств. Он, так же как и ОПТ на рис. 1, нечувствителен к типу нагрузки, для него не имеет значения величина емкости на входе СВЭП или другой нагрузки. Он также с максимальной скоростью заряжает батарею конденсаторов на входе СВЭП. Кроме того, в установленном режиме LC-элементы схемы работают как фильтр помех как из СВЭП в первичную сеть, так и обратно с эффективным диапазоном фильтрации до нескольких десятков МГц.

В установленном режиме суммарное падение напряжения на открытом РЭ, L и ДТ чуть больше, чем у ОПТ с непрерывным регулированием РЭ, и составляет доли вольта. Кроме того, необходимо учитывать, что нагрузка должна быть выбрана на максимальное значение среднего выходного тока $I_{\text{ВЫХ МАКС}} = (I_{\text{ДТ ВКЛ}} + I_{\text{ДТ ВЫКЛ}})/2$, хотя в импульсный режим ОПТ переходит при значении тока через РЭ $I_{\text{ДТ ВЫКЛ}} > I_{\text{ВЫХ МАКС}}$.

Особенностью рассмотренного ОПТ является отсутствие общего для входа и выхода провода, что ограничивает его функциональные возможности и сужает область применения.

Этот недостаток устранен в ОПТ, функциональная схема которого показана на рис. 7 [5]. Здесь, кроме перечисленных выше узлов, в состав ОПТ включен одновибратор Од.

В установленном режиме работы при токе регулирующего элемента РЭ $I_{\text{РЭ}} < I_{\text{РЭ МАКС}}$ сигнал на выходе усилителя У максимален. Одновибратор Од он дискриминирует как логическая единица, и на его выходе удерживается сигнал логического нуля. При этом РЭ открыт. При увеличении тока через него до значения $I_{\text{РЭ МАКС}}$ сигнал на выходе усилителя У уменьшается. Когда его значение достигнет уровня логического нуля, одновибратор Од запускается. Напряжение на его выходе скачкообразно устанавливается на уровне логической единицы и удерживается в этом состоянии в течение времени задержки $t_{\text{ЗАД}}$, запирая РЭ на указанное время. Таким способом в ОПТ формируется пауза в работе РЭ, за время которой ток в дросселе L уменьшается. По окончании паузы одновибратор Од возвращается в исходное состояние, РЭ открывается и ток через РЭ, L и C вновь начинает увеличиваться. В итоге при перегрузке по току на выходе ОПТ переходит в импульсный режим работы, ограничивая максимальное значение тока через регулирующий элемент РЭ и нагрузку на уровне $I_{\text{РЭ МАКС}}$. При этом РЭ также работает в ключевом режиме с минимальной рассеиваемой на нем мощностью. В установленном режиме характеристики описанных «импульсных» ОПТ идентичны.

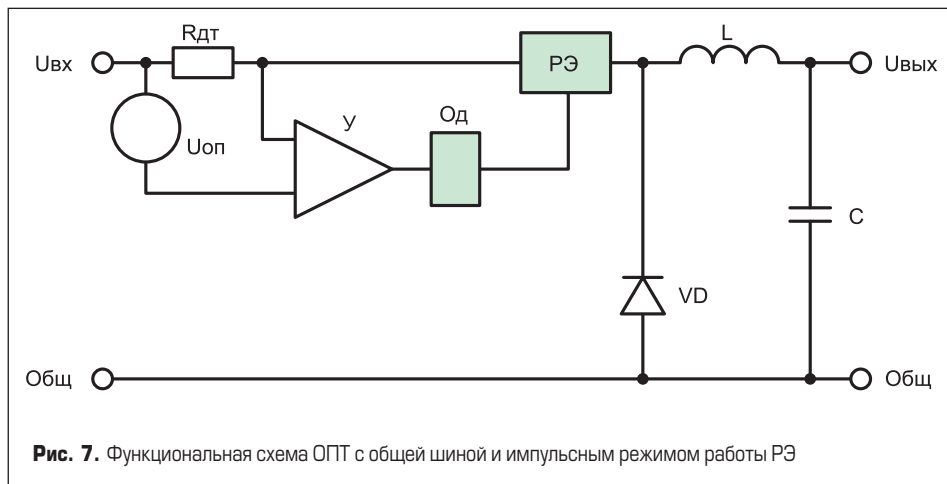


Рис. 7. Функциональная схема ОПТ с общей шиной и импульсным режимом работы РЭ

При выборе структуры ОПТ необходимо учитывать характер конкретной нагрузки, особенности ее включения и работы. Например, современные модули электропитания, составляющие СВЭП, имеют высокий КПД и работают по принципу импульсного преобразования энергии. Их важная особенность — отрицательное статическое входное сопротивление. Это означает, что при уменьшении входного напряжения потребляемый СВЭП ток увеличивается. Максимальное значение он имеет при включении на минимальном входном напряжении. Поэтому, если при включении СВЭП ее модули начинают работать сразу по достижении на выходе ОПТ минимального рабочего напряжения, СВЭП с ОПТ на входе, показанным на рис. 3, может не включиться. Чаще же используются модули питания с задержкой при включении (порядка 10–70 мс). За это время входные конденсаторы СВЭП успевают полностью зарядиться, и включение происходит штатным образом.

Если к ОПТ предъявляются требования по стойкости к спецвоздействиям, они удовлетворяются выбором соответствующей элементной базы и подтверждаются испытаниями или расчетами. В любом случае необходимо учитывать, что мощные элементы, изготовленные по биполярной технологии, более устойчивы к воздействию ТЗЧ, нежели маломощные, а маломощные биполярные более устойчивы, чем маломощные МОП-элементы. Зачастую именно эти особенности элементной базы и определяют выбор подходящей структуры ОПТ либо вынуждают выбрать другую, реализуемую на доступной элементной базе.

В качестве примера конкретной реализации рассмотрим характеристики унифицированной линейки ОПТ в модульном исполнении серии МДО (разработчик — ООО «АЭИЭП») на основе «импульсной» структуры. ОПТ

предназначены для ограничения пускового тока импульсных преобразователей напряжения СВЭП. Техническое решение, на основе которого реализованы приборы, запатентовано [6]. Основные характеристики внешних воздействующих факторов (ВВФ) ОПТ серии МДО:

- диапазон входных напряжений: 17–36, 82–154 В (ОПТ на сеть 82–154 В разрабатываются только на рабочие токи 1 и 3 А);
- диапазон температур окружающей среды: –60...+100 °С;
- диапазон давлений окружающей среды: 10⁻⁶–1500 мм рт. ст.;
- механический удар одиночного действия: 1000g;
- механический удар многократного действия: 150g;
- линейное ускорение: 115g;
- повышенная относительная влажность воздуха при температуре окружающей среды +35 °С: 98–100%.

Массогабаритные и основные электрические характеристики линейки ОПТ приведены в таблице.

Модули ОПТ серии МДО имеют общую отрицательную шину, реализуют возможность управления включением с помощью маломощного сигнала логического характера. На рис. 8 показана осциллограмма тока на датчике тока R_{ДТ} при запуске ОПТ МДО5 на активно-емкостную нагрузку при входном напряжении 27 В, сопротивлении нагрузки R_Н = 5,4 Ом и емкости нагрузки 100 мкФ. Желтым цветом отображено напряжение на выходе ОПТ, зеленым — ток на входе ОПТ. Ток в нагрузке в установленном режиме составляет 5 А, его амплитудное значение во время запуска не превышает 7 А. Запуск продолжается около 1,5 мс.

На осциллограммах хорошо видно, как после заряда емкости нагрузки ОПТ переходит

Таблица. Основные характеристики унифицированных модулей ОПТ серии МДО

Обозначение модуля	Номинальный рабочий ток, А	Максимальный импульсный входной ток, А	Максимальное падение напряжения, не более, мВ	Габариты корпуса без фланцев, мм	Масса, г
МДО1	1	2	300	30×20×10	20
МДО3	3	5		40×30×10	35
МДО5	5	8		48×33×10	45
МДО10	10	16		58×40×10	65
МДО20	20	32	400	73×53×13	100

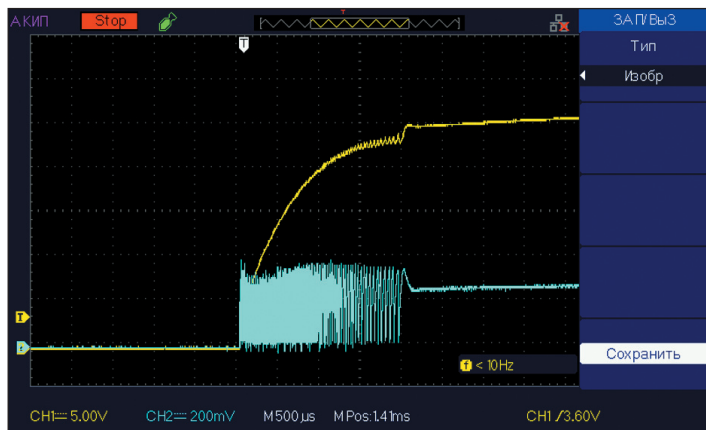


Рис. 8. Осциллограммы входного тока и выходного напряжения ОПТ серии МДО5 при включении на активно-емкостную нагрузку

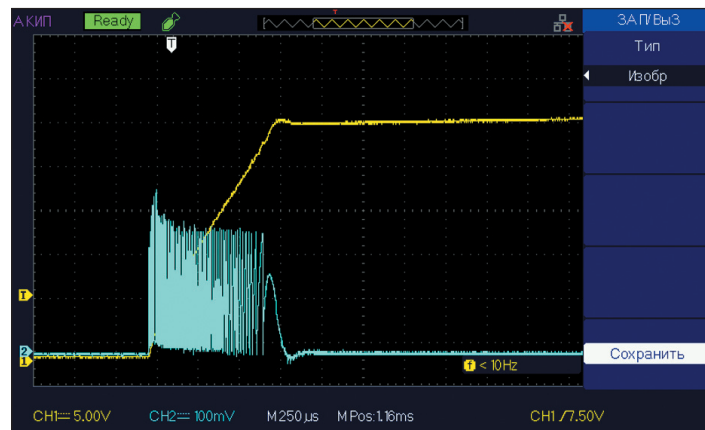


Рис. 9. Осциллограммы выходного напряжения и входного тока ОПТ серии МДО5 при включении на емкостную нагрузку

в непрерывный режим работы. Очевидно, что при такой относительно небольшой скорости нарастания напряжения на выходе ОПТ, то есть на входе емкостных фильтров нагруженных на ОПТ преобразователей, их зарядные токи невелики, что положительно сказывается на надежности последних.

Нагрузкой ОПТ в основном должны быть преобразователи с емкостным фильтром на входе. Поскольку преобразователи обычно включаются с задержкой в несколько миллисекунд, ОПТ в первый момент после включения работает практически на емкостную нагрузку. На рис. 9 показаны осцилло-

граммы запуска ОПТ МДО5 на емкостную нагрузку $C = 100 \text{ мкФ}$. Заряд емкости до напряжения 27 В продолжается около 500 мкс. Амплитудное значение входного тока не превышает 7 А. После окончания заряда входной ток, естественно, уменьшается до нуля.

При увеличении выходной емкости ОПТ процесс включения затягивается. Если зарядить ее за 8–10 мс не удастся, УУ переводит ОПТ в режим периодического выключения/включения с частотой 20–30 Гц для защиты своего силового ключа от перегрева.

В установившемся режиме ОПТ серии МДО работают как помехоподавляющий фильтр

с эффективной полосой подавления до нескольких десятков МГц. Максимальное подавление вплоть до 60 дБ ОПТ имеет именно в зоне действия первых, самых мощных гармоник силовых преобразователей. Частотная зависимость коэффициента ослабления ОПТ МДО3 показана на рис. 10.

Литература

1. Миронов А. А. Некоторые проблемы разработки ограничителей пускового тока. Обзор по материалам отечественной и зарубежной патентной информации за 1972–1989 гг. // Центр научно-технической информации «Поиск». 1990. Вып. 42.
2. Кудряшов Б. П., Назаров Ю. В., Тарабрин Б. В. и др. Аналоговые интегральные схемы. Справочник. М.: Радио и связь, 1981.
3. Миронов А. А. Тепловая защита стабилизаторов напряжения // Радио. 1983. № 10.
4. Миронов А. А. Структура и алгоритмы работы ограничителей пускового тока для бортовых систем электропитания // Силовая электроника. 2017. № 1.
5. Миронов А. А. Ограничитель тока. Патент РФ на полезную модель № 46593, МКИ7:G 05 F 1/56, 2005.
6. Миронов А. А. Ограничитель тока. Патент на полезную модель РФ № 182804, МКИ7:G 05 F 1/56, 2018.

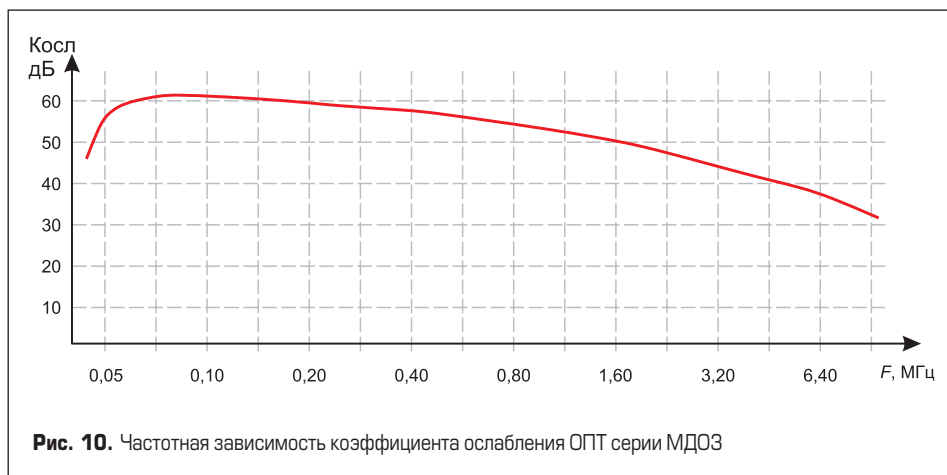


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента ослабления ОПТ серии МДО3