

Структура и алгоритмы работы ограничителей пускового тока

для бортовых систем электропитания

В статье описываются структуры, алгоритмы работы и параметры ограничителей пускового тока для систем вторичного электропитания постоянного тока. Рассматриваются вопросы повышения надежности при увеличении выходной мощности, расширения функциональных возможностей.

Анатолий Миронов

Ограничители пускового тока (ОПТ) широко применяются для построения систем электропитания бортовой РЭА, первичный источник электропитания которых ограничен по мощности и не допускает бросков потребляемого тока. К таковым относятся, например, системы вторичного электропитания (СВЭП) космических аппаратов, первичный источник питания которых (аккумуляторная батарея) имеет ограниченные энергоресурсы. Обычно ОПТ включается на входе СВЭП, ограничивая зарядный ток конденсаторов входных фильтров всей группы модулей электропитания и защищая заодно контакты электромеханического силового

контактора, коммутационный ресурс которых невелик.

На рис. 1 приведена функциональная схема ОПТ с «минусовой» общей шиной, регулирующим элементом (РЭ) которого работает в режиме непрерывного регулирования [1]. Обозначим эту структуру как ОПТ1. Она содержит регулирующий элемент РЭ, резисторный датчик тока $R_{ДТ}$, источник опорного напряжения $U_{оп}$ и регулирующий усилитель $У$.

Максимальное значение тока ОПТ1 $I_{ОПТ.маx}$ устанавливается номиналом резистора — датчика тока $R_{ДТ}$: $I_{ОПТ.маx} = U_{оп}/R_{ДТ}$. Выходной конденсатор C имеет небольшую емкость и играет роль корректирующего во время работы ОПТ в режиме ограничения тока. При токе регулирующего элемента РЭ $I_{РЭ} < I_{РЭ.маx}$ сигнал на выходе усилителя $У$ максимален и регулирующий элемент РЭ открыт. При увеличении тока нагрузки до значения $I_{РЭ.маx}$ сигнал на выходе усилителя $У$ уменьшается, переводя регулирующий элемент РЭ в линейный режим и ограничивая тем самым ток через него и в нагрузке значением $I_{РЭ.маx}$. Установившееся значение выходного напряжения ОПТ при этом $U_{ВЫХ} = R_H \times I_{РЭ.маx}$ где R_H — эквивалентное активное сопротивление нагрузки. На РЭ в этом режиме выделяется мощность $P_{РЭ} = (U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) \times I_{РЭ.маx}$ а при коротком замыкании на выходе — $P_{РЭ.маx} = U_{ВХ} \times I_{РЭ.маx}$!

Недостатком рассмотренного ОПТ является увеличенная мощность, выделяемая на РЭ во время запуска СВЭП или при коротком замыкании на его выходе, что влечет за собой перегрев регулирующего элемента и ограничивает время действия перегрузки на уровне сотен микросекунд — единиц миллисекунд. Поэтому ОПТ с непрерывным режимом регулирования РЭ применяется только при малых токах нагрузки (до 1–2 А). Но даже в этом случае необходимо предусмотреть ограничение длительности перегрузки РЭ во время КЗ в нагрузке включением в схему специального таймера, принудительно выключающего РЭ по истечении указанного времени (на рис. 1 не показан).

Другой путь решения этой проблемы — перевод РЭ при перегрузке в импульсный режим работы. В [1] приведена электрическая схема одного из вари-

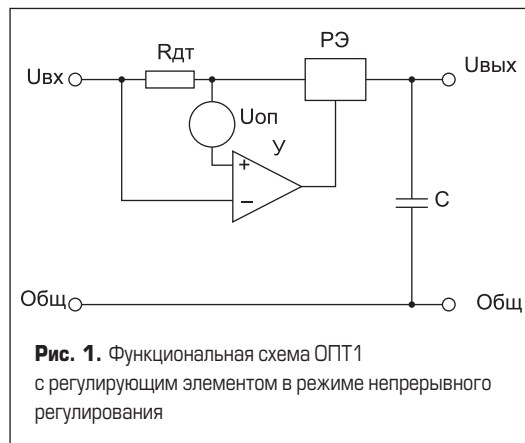


Рис. 1. Функциональная схема ОПТ1 с регулирующим элементом в режиме непрерывного регулирования

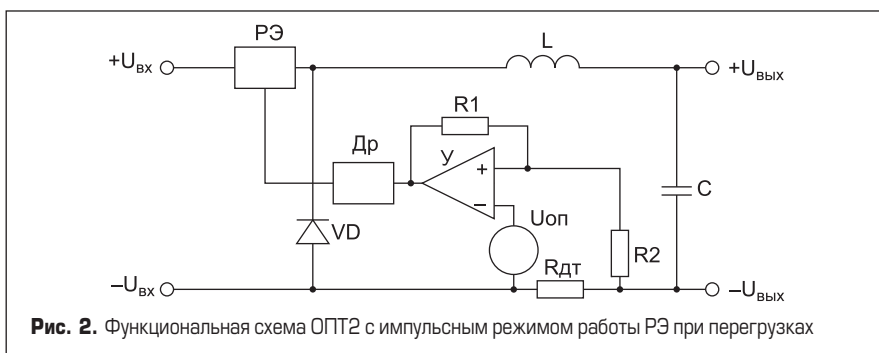


Рис. 2. Функциональная схема ОПТ2 с импульсным режимом работы РЭ при перегрузках

антов ОПТ с «импульсным» алгоритмом работы РЭ. На рис. 2 показана его функциональная схема. Назовем эту структуру ОПТ2.

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 управляющее напряжение $U_{У,РЭ}$ формата, требуемого для быстрого открывания и запираания РЭ. Для устойчивой работы ОПТ в режиме переключения РЭ усилитель У охвачен положительной обратной связью на резисторах R1R2.

В установившемся режиме работы ОПТ2 справедливо соотношение $I_H = I_L = I_{ДТ}$, на выходе У напряжение близко к нулю — $U_{У,ВКЛ} \approx 0$, на выходе драйвера Др — напряжение $U_{РЭ,ВКЛ}$ обеспечивающее открывание РЭ. Рабочий ток протекает от источника входного напряжения через открытый РЭ, дроссель L, нагрузку и резистор — датчик тока $R_{ДТ}$. На рис. 3 показаны эпюры сигналов во время включения ОПТ при запуске на емкостную нагрузку.

При включении ОПТ, когда происходит зарядка конденсатора С и конденсаторов входных фильтров подключенных на выход ОПТ модулей питания СВЭП, ток нагрузки увеличивается, и при напряжении на датчике тока $U_{ДТ,ВЫКЛ} = U_{ОП} \times (1+R1/R2)$ на выходе У скачкообразно устанавливается напряжение $U_{У,ВЫХ}$, на выходе драйвера Др — 0 и РЭ закрывается. Это выражение справедливо при условии, когда $R1, R2 \gg R_{ДТ}$, что легко 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 $R_{ДТ}$ $U_{ДТ,ВКЛ} = U_{ОП} \times (1+R2/R1) - U_{У,ВЫХ} \times R2/R1$ напряжение на выходе У вновь устанавливается на уровне 0, на выходе Др — напряжение $U_{РЭ,ВКЛ}$, РЭ вновь открывается и процесс повторяется. Таким образом, резисторами R1R2 реализован гистерезис напряжения на датчике тока $R_{ДТ}$:

$$\Delta U_{ДТ} = U_{ДТ,ВКЛ} - U_{ДТ,ВЫКЛ} = U_{У,ВЫХ} \times R2/R1.$$

От выражений напряжения переключения $U_{ДТ,ВКЛ}$, $U_{ДТ,ВЫКЛ}$ через $R_{ДТ}$ просто перейти к соответствующим значениям токов $I_{ДТ,ВКЛ}$, $I_{ДТ,ВЫКЛ}$:

$$I_{ДТ,ВКЛ} = U_{ДТ,ВКЛ}/R_{ДТ};$$

$$I_{ДТ,ВЫКЛ} = U_{ДТ,ВЫКЛ}/R_{ДТ}.$$

С каждым периодом работы напряжение на выходе ОПТ увеличивается до тех пор, пока на очередном периоде работы ток $I_{ДТ}$ уже не достигает значения $I_{ДТ,ВЫКЛ}$. РЭ остается открытым и переходный процесс включения заканчивается. ОПТ на этапе запуска работает как импульсный преобразователь релейного типа, у которого меняется как длительность открытого состояния РЭ, так и длительность его закрытого состояния. Такой алгоритм включения обеспечивает минимальное время переходного процесса нарастания выходного напряжения ОПТ при фиксированном потре-

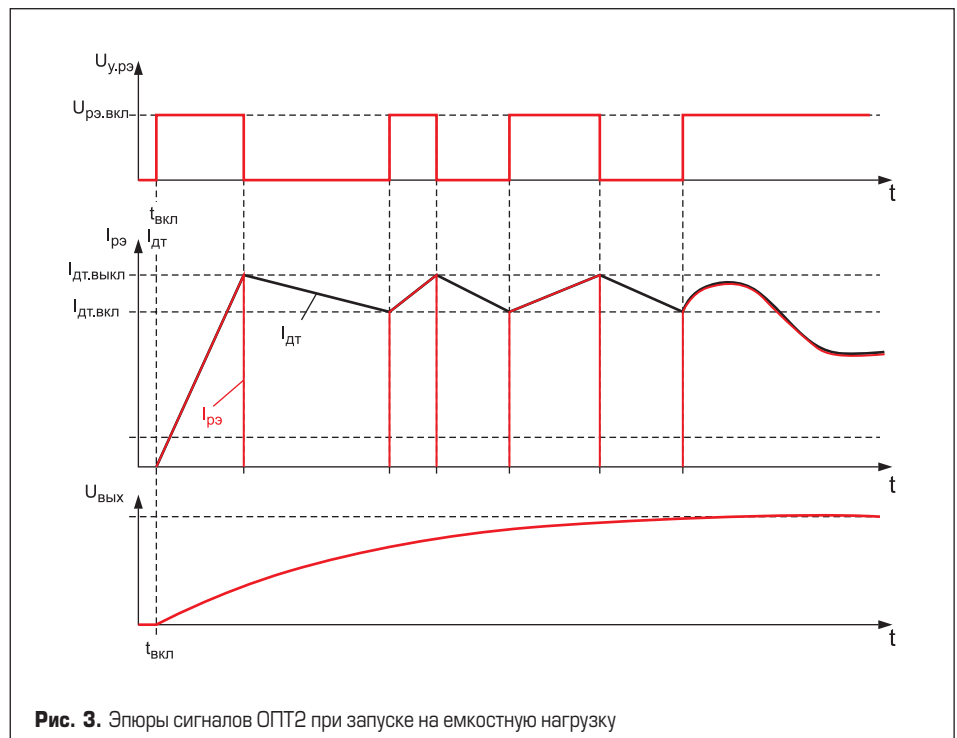


Рис. 3. Эпюры сигналов ОПТ2 при запуске на емкостную нагрузку

бляемому токе среди всех других импульсных способов управления РЭ (ШИМ, ЧИМ).

РЭ в режиме перегрузки или запуска ОПТ2 работает в импульсном режиме. Мощность, выделяющаяся на нем, многократно меньше аналогичного показателя структуры ОПТ1, поэтому длительность перегрузки значения не имеет. Он, фактически, теперь является не ограничителем пускового тока, а просто ограничителем тока (ОТ), защищая узлы СВЭП во всех режимах работы, а не только при запуске. Так, например, при выходе из строя одного из модулей питания СВЭП, ОПТ2 ограничивает потребляемый им ток и защищает его от полного разрушения. Кроме того, в установившемся режиме LC-элементы устройства работают как помехоподавляющий фильтр с эффективным диапазоном фильтрации до нескольких десятков мегагерц.

В установившемся режиме суммарное падение напряжения на открытом РЭ, L и ДТ практически не отличается от аналогичного параметра ОПТ1 и составляет для современных элементов доли вольт. Кроме того, необходимо учитывать, что нагрузка должна выбираться на максимальное значение среднего выходного тока $I_{ВЫХ,МАХ} = (I_{ДТ,ВКЛ} + I_{ДТ,ВЫКЛ})/2$, хотя в импульсный режим ОПТ2 переходит при максимальном значении тока $I_{ВЫХ} = I_{ДТ,ВЫКЛ}$.

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. 4 [2]. Здесь, кроме перечисленных выше узлов, в состав ОПТ включен одновибратор Од. Назовем эту структуру ОПТ3.

Максимальное значение тока через регулирующий элемент РЭ и датчик тока $R_{ДТ}$ устанавливается так же, как и в ОПТ2. В установившемся режиме работы при токе регулирующего элемента РЭ $I_{РЭ} < I_{РЭ,МАХ}$ сигнал на выходе усилителя У максимален. Одновибратор Од он дискриминируется как логическая единица и на его выходе удерживается сигнал логического нуля. При этом РЭ открыт. При увеличении тока через него до значения $I_{РЭ,МАХ}$ 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 $t_{ЗД}$, запирая РЭ на указанное время. Таким способом в ОПТ3 формируется пауза в работе РЭ, за время которой ток в дросселе L умень-

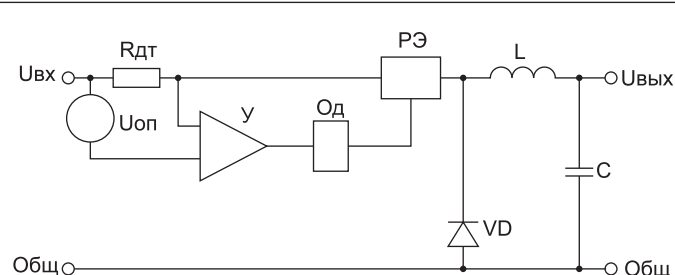


Рис. 4. Функциональная схема ОПТ3 с общей шиной и импульсным режимом работы РЭ при перегрузках

шается. По окончании паузы усилитель U и одновибратор Од возвращаются в исходное состояние, РЭ открывается и ток через РЭ, L и C вновь начинает увеличиваться. В итоге, при перегрузке по току на выходе ОПТ3, аналогично ОПТ2, переходит в импульсный режим работы, ограничивая максимальное значение тока через РЭ и нагрузку на уровне $I_{РЭ,max}$. При этом РЭ также работает в режиме переключения с минимальной рассеиваемой на нем мощностью. Полезно также во время длительной перегрузки на выходе переводить ОПТ в прерывистый режим работы, когда интервал времени, отведенного на запуск $t_{ЗАП}$, чередуется с интервалом выключенного состояния РЭ $t_{ВЫКЛ}$, причем $t_{ЗАП} \ll t_{ВЫКЛ}$. В этом случае перегрев РЭ уменьшается в $t_{ВЫКЛ}/t_{ЗАП}$ раз.

После окончания переходного процесса ряда выходного конденсатора C параметры структур ОПТ2 и ОПТ3 по постоянному току практически эквивалентны. Все преимущества структуры ОПТ2 являются таковыми же и для структуры ОПТ3. Относительно небольшая мощность рассеивания на РЭ во время запуска и перегрузки позволяет проектировать на основе этих структур ОПТ на токи в десятки ампер.

При фиксированном значении $I_{РЭ,max}$ максимальная выходная мощность ОПТ в установленном режиме работы изменяется пропорционально изменению выходного (входного) напряжения, что сужает его функциональные возможности. Чтобы этот параметр оставался неизменным, в схему ОПТ необходимо ввести дополнительные цепи, реализующие обратную пропорциональную зависимость изменения

$U_{ОП}$ от входного напряжения в диапазоне $U_{ВХ,min} \leq U_{ВХ} \leq U_{ВХ,max}$ как это предложено в [3]. Реализуя же кратковременное увеличение $U_{ОП}$ на этапе включения, можно пропорционально уменьшать время включения ОПТ.

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. Пат. № 46593 (РФ). Ограничитель тока / А. А. Миронов. 2005.
3. Патент № 153770 (РФ). Ограничитель напряжения / С. Л. Затулов, А. А. Миронов. 2015.