

С. Л. Затулов, С. А. Амелин, М. А. Амелина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОГРАНИЧИТЕЛЯ ВЫБРОСОВ НАПРЯЖЕНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ОГРАНИЧЕНИЯ МОЩНОСТИ

Sergey Zatulov, Sergey Amelin,
Marina Amelina

В настоящей статье с помощью схемотехнического моделирования в пакете Micro-CAP рассматриваются переходные режимы ограничителя выбросов напряжения для сети постоянного тока, работающего в режиме ограничения выходной мощности.

Ключевые слова: ограничитель выбросов напряжения, понижающий регулятор, моделирование, Micro-Cap.

Line Voltage Surge Limiter Operating in Power Limiting Mode
Transient Behavior Simulation

This article studies transient behavior of DC mains voltage surge suppressor operating in power limiting mode by means of circuit simulation in Micro-Cap.

Keywords: voltage surge suppressor, buck converter, simulation, Micro-cap.

Особенностью систем электроснабжения (СЭС) летательных аппаратов и подвижных объектов является наличие переходных отклонений входного напряжения, в несколько раз превышающих установленное значение. По этой причине использование в таких СЭС универсальных модулей питания (МП) возможно только совместно с дополнительными узлами защиты. В случае сетей постоянного тока одним из вариантов построения СЭС является применение универсальных МП совместно с защитными устройствами – ограничителями выбросов напряжения (ОВН). Задача ОВН – уменьшить переходные напряжения на входе МП до допустимых значений. Для ОВН нормируется диапазон рабочего входного напряжения $U_{вх.мин} \leq U_{вх} \leq U_{вх.макс}$ и напряжение ограничения $U_{огр}$. При $U_{вх} > U_{огр}$ ОВН работает в режиме ограничения напряжения, при этом $U_{вых} = U_{огр}$. Значение $U_{огр}$ не должно превышать максимального значения входного напряжения МП.

Технические решения по расширению функциональных возможностей ОВН для сетей постоянного тока были рассмотрены в [1] на примере применения в авиационной бортовой сети 27 В [2]. Показано, что работа ОВН в режиме ограничения выходной мощности существенно уменьшает потери при перегрузке и минимизирует запасы по мощности для элементов, что позволяет при прочих равных условиях получать СЭС большей мощности. На рис. 1 приведена зависимость выходной мощности и выходного тока ОВН от изменения входного напряжения при работе в режиме ограничения выходной мощности.

В настоящей статье с помощью схемотехнического моделирования в пакете программ Micro-CAP [3] рассмотрены переходные режимы работы ОВН, работающего в режиме ограничения выходной мощности.

ОВН, работающий в режиме ограничения выходной мощности [4], реализован на основе импульсного регулятора постоянного напряжения первого типа (понижающий). Функциональная схема ОВН приведена на рис. 2. В установившемся режиме ключ Кл все время замкнут. Ограничение выходного тока и выходного напряжения обеспечивается размыканием ключа на заданный промежуток времени – время задержки $t_{зад}$, которое задается RC-цепями одновибратора Од. Режим постоянной выходной мощности обеспечивают программируемый источник тока (ПИТ) и резистор R1. ПИТ создает на R1 зависящее от $U_{вх}$ падение напряжения (“подставка”), которое, суммируясь с напряжением с датчика тока Rдт, сравнивается с опорным напряжением $U_{оп1}$ на входе компаратора К.

На схеме Rдт – резистор-датчик тока, Кл, L, VD, С – соответственно ключ, дроссель, диод и конденсатор импульсного регулятора напряжения, К – компаратор узла токовой защиты, У – усилитель сигнала рассогласования по напряжению; $U_{оп1}$, $U_{оп2}$ – источники опорного напряжения; R1 и ПИТ – резистор и программируемый источник тока цепи ограничения мощности; R2, R3 – резисторы делителя напряжения цепи обратной связи по

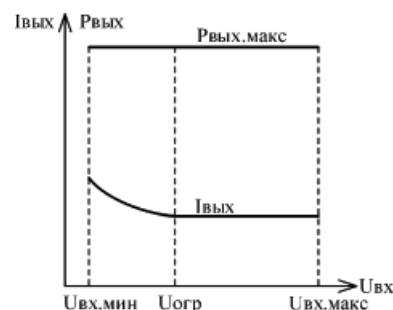


Рис. 1. Зависимости $P_{вых}$ и $I_{вых}$ от изменения входного напряжения при ограничении выходной мощности

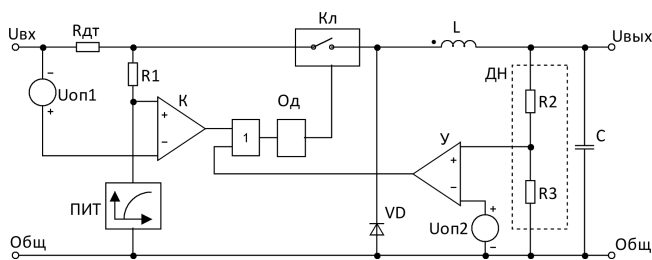


Рис. 2. Функциональная схема ОВН

напряжению; 1 – логический элемент ИЛИ; Од – одновибратор.

Нагрузкой ОВН являются МП. При запуске ОВН нагружен только на входные цепи МП – емкость входного фильтра и сопротивление цепей запуска. В установившемся режиме мощность, потребляемая МП, является практически постоянной величиной и не зависит от входного напряжения (изменением КПД МП в данном случае можно пренебречь). Поэтому после запуска управляющей части МП и выхода его на установившейся режим стабилизации, для ОВН он представляет нагрузку постоянной мощности.

В момент включения при подаче напряжения $U_{вх.мин} \leq U_{вх} \leq U_{огр}$ на вход ОВН ключ Кл замкнут. Емкости с выходного фильтра ОВН и входного фильтра МП разряжены и представляют для ОВН короткое замыкание, ток через ключ Кл возрастает. Мгновенное значение тока через ключ Кл достигает значения, при котором срабатывает компаратор К. При этом на верхнем входе компаратора К напряжение датчика тока и “подставки” равно $U_{оп1}$. На выходе компаратора появляется сигнал высокого уровня, который через логический элемент ИЛИ запускает одновибратор Од, размыкающий ключ Кл на время задержки $t_{зад}$. Ток через дроссель L начинает уменьшаться, протекая на этом интервале через диод VD, заряжая конденсаторы выходного фильтра ОВН и входного фильтра МП. По истечении времени $t_{зад}$ ключ Кл вновь открывается и процессы коммутации повторяются до тех пор, пока при очередном замыкании ключа Кл амплитудное значение тока через него не достигнет значения, при котором срабатывает компаратор К. Начиная с этого момента ключ Кл все время замкнут, при этом $U_{вых} \approx U_{вх}$.

После заряда конденсаторов фильтров и запуска МП на выход ОВН подключается эквивалентная нагрузка постоянной мощности.

При уменьшении сопротивления нагрузки (менее номинального значения) ОВН переходит в режим стабилизации выходной мощности, в котором ток, отдаваемый в нагрузку, будет ограничен значением, определяемым номинальной выходной мощностью и входным напряжением ОВН. Процессы происходят также как при включении – ток через ключ Кл возрастает до порогового значения,

а по сигналу с одновибратора Од ключ размыкается на время задержки $t_{зад}$, и процесс периодически повторяется, выходное напряжение при этом уменьшается. Поскольку нагрузкой является МП, то при достижении на его входе минимального значения входного напряжения он выключается. Ток через ОВН уменьшается до нуля, напряжение на верхнем входе компаратора К становится равным напряжению “подставки”. С этого момента ключ Кл замкнут, $U_{вых} \approx U_{вх}$. Затем МП снова включается, и повторяется процесс включения ОВН, начиная с подключения нагрузки постоянной мощности. В случае короткого замыкания (КЗ) на выходе ОВН периодическое запираение открывание ключа сохраняется до снятия КЗ.

При увеличении входного напряжения ограничителя сверх значения $U_{огр}$ на выходе усилителя У появляется сигнал, который через логический элемент ИЛИ запускает одновибратор Од, размыкающий ключ Кл. Этот ключ замкнется вновь только после окончания импульса одновибратора при условии, что выходное напряжение станет меньше $U_{огр}$.

В этом режиме ОВН представляет собой импульсный преобразователь напряжения первого типа с релейным регулированием, ограничивающий среднее значение напряжения на выходе на уровне $U_{огр}$. При этом длительность паузы постоянна и задается одновибратором Од, а длительность импульса задается сигналом с усилителя У – пока напряжение на выходе усилителя У имеет низкий логический уровень и не работает одновибратор Од, ключ Кл замкнут.

Для исследования характеристик ОВН воспользуемся пакетом программ компьютерного моделирования *Micro-CAP* [3]. Схема моделирования ОВН на функциональных блоках с нагрузкой, эквивалентной МП для режима включения, приведена на рис. 3. Параметры заданы для ОВН с выходной мощностью 20 Вт, работающего от бортовой авиационной сети 27 В (ГОСТ Р 54073-2010 [2]). Для ОВН задано $U_{вх.мин} = 10$ В, $U_{вх.макс} = 82$ В, $U_{огр} = 33,5$ В (значения выбраны с учетом требований раздела 5 ГОСТ и использования ОВН с универсальными МП с диапазоном входного напряжения 9–36 В (4:1)).

В схеме моделирования $R_{дт}$ заменен идеальным датчиком тока DA1, используется идеальный компаратор DA2, определяющий пороговое значение тока, и идеальный одновибратор DA3. Для источника опорного напряжения $U_{оп1}$ используется элемент фиксированного смещения, значение задано равным 2,7 В.

ПИТ и R1 реализованы на функциональном источнике $NTVofV$ E1, задаваемом таблицей зависимостей значений выходного сигнала от значений входного сигнала (V_{in}), позволяющем создать желаемую форму напряжения “подставки”. Усили-

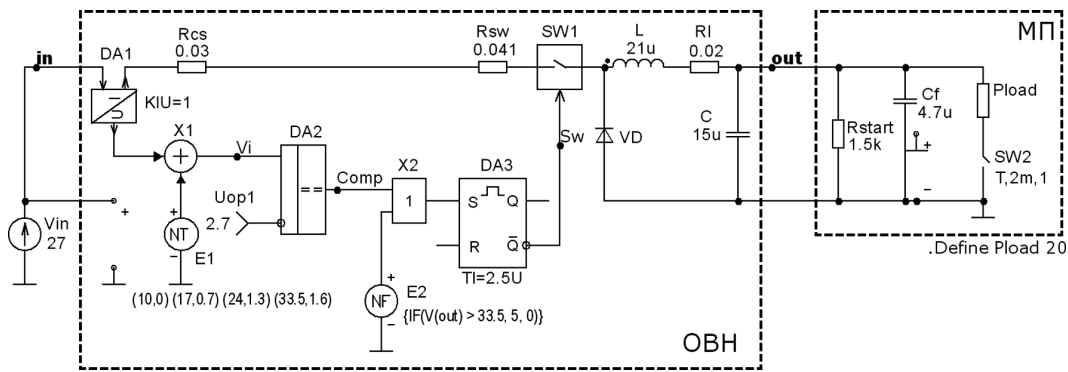


Рис. 3. Схема моделирования

тель сигнала рассогласования по напряжению U , источник опорного напряжения $U_{оп2}$ и делитель напряжения ДН реализованы на функциональном источнике NFV E2, задаваемом формулой. Ключ Кл взят идеальным – SW1, его сопротивление задано внешним резистором Rsw. Сопротивление дросселя L также задано внешним резистором R1.

В схеме МП емкость входного фильтра и сопротивление цепей запуска обозначены Cf и Rstart соответственно. Нагрузка постоянной мощности, которой для установившегося режима заменен МП, задана элементом Constant Power [3]. Подключение нагрузки производится через несколько миллисекунд после подачи входного напряжения (после запуска управляющей части МП) ключом SW2.

Для реализации режима ограничения выходной мощности следует получить необходимую характеристику программируемого источника тока (ПИТ).

Согласно [4] для устранения зависимости максимальной выходной мощности от входного напряжения параметры ПИТ программируют таким образом, чтобы при изменении входного напряжения в диапазоне $U_{вх.мин} \leq U_{вх} \leq U_{огр}$ он создавал на резисторе R1 (рис. 2) напряжение “подставки”, определяемое из выражения

$$U_{R1} = U_{оп1} \times (1 - U_{вх.мин}/U_{вх}). \quad (1)$$

При изменении входного напряжения в диапазоне $U_{огр} \leq U_{вх} \leq U_{вх.макс}$ значение

$$U_{R1} = U_{оп1} \times (1 - U_{вх.мин}/U_{огр}).$$

Графическая зависимость напряжения на R1 представлена на рис. 4, верхний график.

Рассчитанная по формуле (1) “подставка” справедлива для среднего значения входного (выходного) тока в установившемся режиме. Но при работе в импульсном режиме ОВН должен также обеспечивать на выходе ток не менее $I_{вых} = P_{вых.макс}/U_{вых}$. При этом максимальное мгновенное значение тока через ключ будет превышать рассчитанное выше среднее значение на амплитуду пульсации тока в дросселе, т. е. реальные значения напряжения U_{R1} будут отличаться от расчетных в меньшую сторону.

Наиболее просто эту зависимость можно полу-

чить экспериментально для нескольких значений входного напряжения (рис. 4, нижний график). Для этого в схеме моделирования на рис. 3 функциональный источник NTVofV E1 (реализующий ПИТ и R1) был заменен на источник постоянного напряжения (Battery)). Для диапазона входного напряжения 10–33,5 В ($U_{вх.мин} - U_{вх.огр}$) для четырех значений 10; 17; 24; 33,5 В подбиралась “подставка” и контролировалось установление выходного напряжения.

На рис. 5 для входного напряжения 27 В приведены осциллограммы установления выходного напряжения ОВН при включении на нагрузку, соответствующую его максимальной выходной мощности, с различными напряжениями “подставки” – 1,1; 1,3; 1,5 В. Для подстановки в функциональный источник NTVofV E1 (реализующий ПИТ и R1) выбрано крайнее значение равное 1,3 В, позволяющее выйти на установившийся режим.

Приведем характерные осциллограммы напряжений в ОВН в точках согласно обозначениям на схеме моделирования рис. 3: In – входное напряжение, Out – выходное напряжение, Vi – напряжение на верхнем входе компаратора, Sw – напряжение на управляющем выводе ключа.

На рис. 6 приведены осциллограммы напряжений в ОВН при включении.

Характер установления выходного напряжения зависит от параметров LC-фильтра ОВН, значения емкости входного фильтра МП и сопротивления (мощности) нагрузки. Чтобы обеспечить наглядность изображения параметры LC-фильтра и на-

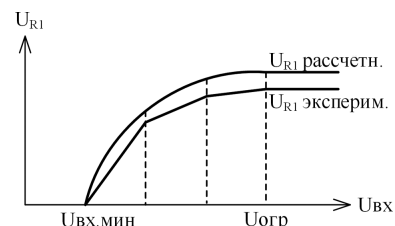


Рис. 4. Зависимость напряжения на резисторе R1 от напряжения $U_{вх}$

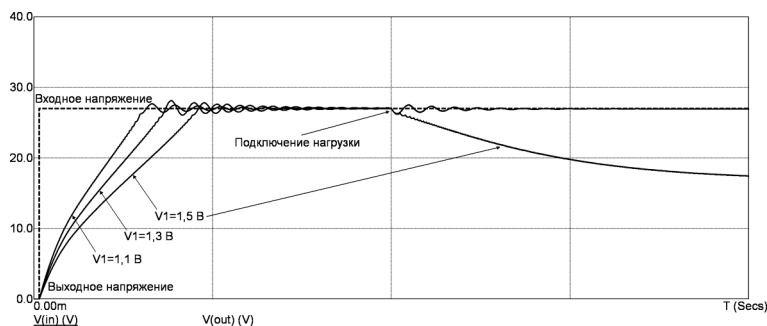


Рис. 5. Осциллограммы установления выходного напряжения в ОВН при включении при различных напряжениях «подставки»

грузки в исходных данных к схеме моделирования отличаются от рассмотренных ранее.

На рис. 7 приведены осциллограммы напряжений в ОВН при кратковременной перегрузке (КЗ) на его выходе. После устранения перегрузки установление выходного напряжения аналогично режиму включения на рис. 6.

Для уменьшения потерь на элементах ОВН и исключения их перегрева при длительных перегрузках обычно используется режим релаксации, при котором ОВН работает в режиме циклического перезапуска. Длительность паузы при релаксации составляет десятки миллисекунд и превышает длительность «рабочего» времени в 5–10 раз. Осциллограммы включения и выключения ОВН при длительной перегрузке в режиме релаксации аналогичны приведенным на рис. 6 и 7.

Короткое замыкание на выходе является самым тяжелым режимом для ОВН с точки зрения тепло-

выделения. Именно при коротком замыкании проявляются главные преимущества ОВН с режимом ограничения мощности. Обработка результатов моделирования позволяет строить сложные зависимости, такие как изменение мощности потерь от входного напряжения. В [1] показано сравнение упомянутых характеристик при ограничении выходного тока и ограничении выходной мощности в ОВН.

На рис. 8 приведены осциллограммы напряжений в ОВН при воздействии импульса верхнего переходного отклонения.

Из осциллограмм видно, что в данном режиме задействованы и обратная связь по току и обратная связь по напряжению. Выходное напряжение увеличивается до значения ограничения (на осциллограмме можно видеть процесс установления) и поддерживается на нем, пока входное напряжение не опустится ниже его.

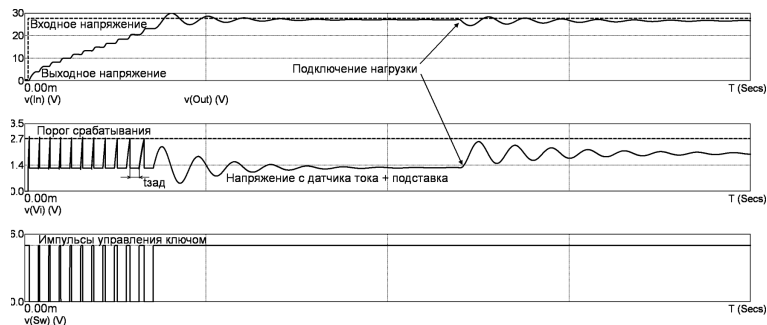


Рис. 6. Осциллограммы напряжений в ОВН при включении

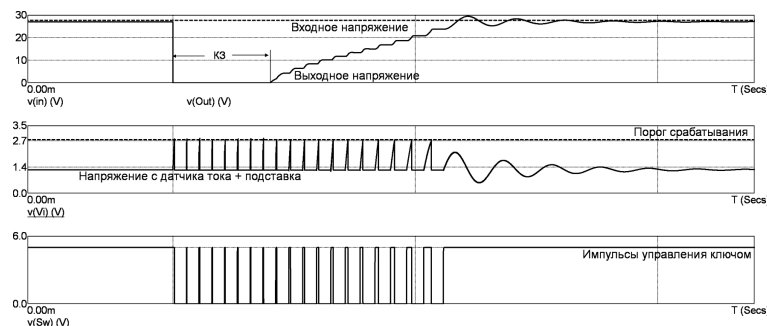


Рис. 7. Осциллограммы напряжения в ОВН при кратковременной перегрузке (КЗ)

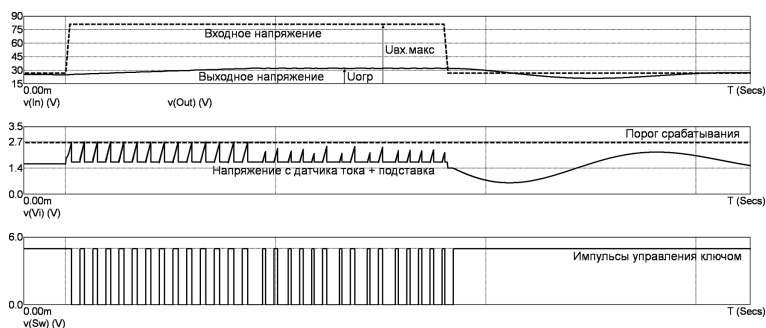


Рис. 8. Осциллограммы напряжений в ОВН при воздействии импульса верхнего переходного отклонения

Заключение

Полученные результаты моделирования подтвердили, что предложенная схема ОВН [4] адекватно работает во всех режимах, характерных для СЭС летательных аппаратов и подвижных объектов. ОВН, работающий в режиме ограничения мощности, является перспективным решением при построении СЭС на основе универсальных МП в сетях постоянного тока с большими значениями верхних переходных отклонений.

Авторы выражают благодарность Анатолию Александровичу Миронову, главному конструктору ООО «Александр Электрик источники электропитания», за помощь при подготовке статьи.

Литература

1. А. А. Миронов, С. Л. Затулов. Расширение функциональных возможностей ограничителей выбросов напряжения для бортовых сетей. — Электропитание, М., 2015 г., № 2, С. 54–58.

2. ГОСТ Р 54073 – 2010 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.

3. Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9, 10. [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Амелина М. А. — Электрон. текстовые дан. — 2-е изд.,

испр. и доп. — СПб.: Лань, 2014. — 632 с. Режим доступа: URL http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=53665.

4. Патент № 153770 на полезную модель «Ограничитель напряжения».

Затулов Сергей Леонидович, главный конструктор ОКР ООО «Александр Электрик источники электропитания», тел.: +7(499)181-19-20, +7(499)181-26-04, +7(909)156-54-97, факс: +7(499)181-05-22, (916)950-87-53, Web-сайт: www.aeip.ru, e-mail: alecsan@aeip.ru, zatulov@aeip.ru;

Амелин Сергей Александрович, к. т. н., доцент кафедры «Электроника и микропроцессорная техника» филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, тел. +7(4812)65-14-61, +7(4812)39-11-38, +7(4812)66-62-97. Факс: +7(4812)65-24-33. Web-сайт: <http://www.sbmpei.ru/>. E-mail: amlmtr@gmail.com;

Амелина Марина Аркадьевна, к. т. н., доцент кафедры «Электроника и микропроцессорная техника» филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске. тел.: +7(4812)65-14-61, +7(4812)39-11-38, +7(4812)66-62-97. Факс: +7(4812)65-24-33. Web-сайт: <http://www.sbmpei.ru/>. E-mail: amelina.marina@gmail.com.