

Эволюция функционала ограничителей выбросов напряжения

для систем электропитания авиационной РЭА

Рассмотрены разработки отечественных производителей ограничителей выбросов напряжения для систем электропитания сетей постоянного тока. Описаны алгоритмы их работы и основные параметры.

Предложена структура системы электропитания повышенной надежности и расширенных функциональных возможностей на основе ограничителей выбросов напряжения.

Анатолий Миронов

Надежность систем электропитания (СЭП) летательных аппаратов (ЛА) является одним из основополагающих факторов безопасности полета и выполнения полетного задания. Традиционно бортовая СЭП — это как минимум комплект преобразователей напряжения (ПН) с пассивным фильтром радиопомех (ФРП) на входе. Каждый ПН имеет вход управления включением/выключением с помощью маломощного сигнала логического характера для индивидуального управле-

ния. Структура СЭП и ее узлы проектируются таким образом, чтобы обеспечить требуемую надежность. В статье рассмотрены особенности построения СЭП, питающихся от сети постоянного тока напряжением 27 В с переходными отклонениями до 80 В (ГОСТ Р 54073-2010), хотя выводы и предложения по применению справедливы для любого другого напряжения.

При проектировании ПН СЭП для сети постоянного тока с выбросами напряжения до 80 В разработчики идут двумя путями. Один путь — использование в схеме ПН силовых полупроводниковых элементов, способных надежно работать при пятикратном изменении напряжения на входе преобразователя (минимальное входное напряжение $U_{\text{вх_мин}} = 17$ В, максимальное входное напряжение $U_{\text{вх_макс}} = 36$ В, выброс входного напряжения до 80 В в течение 1 с). Однако такая возможность реализуется с помощью высоковольтных силовых ключей и диодов, а значит, и снижается КПД преобразователя. Другой путь — установка буферного устройства на входе преобразователей, способного ограничивать выбросы напряжения на уровне $U_{\text{вх_макс}} = 36$ В [1]. Двукратное изменение входного напряжения позволяет вдвое уменьшить напряжение на силовых ключах и диодах, что повышает КПД преобразователя и расширяет номенклатуру доступных силовых элементов.

Для реализации этой задачи разрабатывается специальный класс буферных устройств — ограничителей выбросов напряжения (ОВН). Они выпускаются отечественными и зарубежными фирмами и описаны в технической и патентной литературе [1–5].

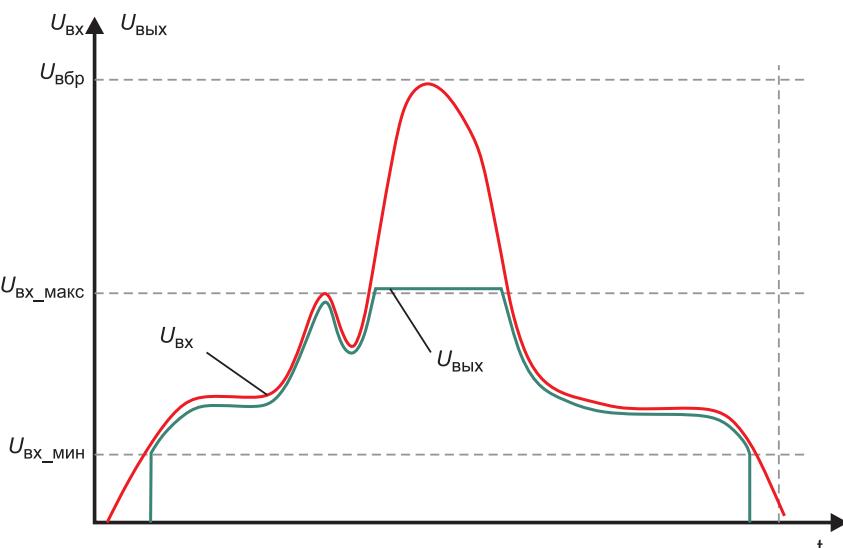


Рис. 1. Графическая интерпретация алгоритма работы ОВН

На рис. 1 графически продемонстрирован алгоритм работы ОВН. В идеале выходное напряжение ОВН должно повторять входное, если последнее находится в диапазоне допустимых значений: $U_{\text{вх мин}} = 17 \text{ В} \leq U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вх макс}} = 36 \text{ В}$. Реально падение напряжения на корректно спроектированном ОВН при номинальном выходном токе составляет сотни милливольт, поэтому можно считать, что в установившемся режиме выходное напряжение практически равно входному. Когда входное напряжение ОВН превышает значение $U_{\text{вх макс}}$ и находится в диапазоне $36 \text{ В} \leq U_{\text{вх}} \leq 80 \text{ В}$, его выходное напряжение должно ограничиваться на уровне чуть более $U_{\text{вх макс}} = 36 \text{ В}$. Рассмотрим подробнее этот класс устройств.

Обобщенная функциональная схема ОВН, реализующая описанный алгоритм работы, представлена на рис. 2. Она состоит из узла токовой защиты (УТЗ), регулирующего элемента (РЭ), выходного фильтра (Φ), узла обратной связи (УОС). В зависимости от режима работы РЭ во время выброса входного напряжения ОВН делятся на ОВН с непрерывным способом управления РЭ и импульсным.

Первые разработки в этом направлении — это ОВН с непрерывным способом управления РЭ. Такой способ управления РЭ обуславливает небольшие выходные токи (1–2 А), поскольку в процессе ограничения выброса в РЭ выделяется значительная мощность $P_{\text{РЭ}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) \times I_{\text{вых}}$, а при коротком замыкании (КЗ) на выходе — $P_{\text{РЭ}} = U_{\text{вх}} \times I_{\text{вых}}$.

По такому принципу реализован, например, ОВН серии ФО производства АО «НПП «ЭлТом» [6]. Номинальный рабочий ток наиболее мощного ОВН $I_{\text{ном}} = 2,7 \text{ А}$, и даже РЭ не защищен от перегрузок по току.

Существенно большие выходные токи обеспечивают ОВН, в которых в процессе ограничения выходного напряжения РЭ переводится в импульсный режим работы. РЭ в этом случае называют ключом (Кл). Выделяемая на нем мощность в режиме ограничения выходного напряжения уменьшается на порядок и более, а специальные алгоритмы работы позволяют устраниить перегревы даже при КЗ на выходе [2–5]. Ключ Кл, естественно, защищен от перегрузок по току. По такому принципу устроены, например, ОВН серии ФПО производства АО «ГК «Электроинвест» [7] и серий МДН производства ООО «АЭИЭП» [8]. В дальнейшем будем рассматривать только ОВН только с импульсным способом управления РЭ как наиболее перспективные.

Прибор настраивается на максимальный ток $I_{\text{кл макс}}$, которым необходимо ограничить ток через ключ Кл, и напряжение ограничения на выходе $U_{\text{огр}} = U_{\text{вых макс}}$. Это значение должно быть не больше максимального входного напряжения для ПН, подключенных к выходу ОВН.

При увеличении тока нагрузки сверх значения $I_{\text{кл макс}}$ узлом токовой защиты УТЗрабатывается сигнал, размыкающий ключ Кл на время задержки $t_{\text{зад}}$. По истечении времени $t_{\text{зад}}$ ключ Кл замыкается и процесс повторяется до тех пор, пока при очередном открывании ключа Кл значение тока через него не достигнет значения $I_{\text{кл макс}}$. Ключ Кл остается открытым, ОВН переходит в установившийся режим работы. Если этого не происходит в течение 5–8 мс, ОВН переходит в режим релаксации (выключение с последующим автоматическим включением) с частотой 100–150 Гц.

Работа ОВН в режиме ограничения выходного напряжения происходит следующим образом. При увеличении напряжения на выходе сверх значения $U_{\text{огр}}$ узлом обратной связи УОСрабатывается сигнал, переводящий ключ Кл в импульсный режим работы со скважностью, обеспечивающей после слаживающего фильтра Φ среднее значение напряжения на выходе на уровне $U_{\text{огр}}$ с небольшой пульсацией.

На рис. 3 представлены осциллограммы работы ОВН ФПО27-05 (номинальный выходной ток 5 А) в режиме ограничения выходного напряжения при номинальном выходном токе. Здесь и далее на осциллограммах желтый луч — напряжение на входных контактах ОВН, зеленый — на выходных контактах ОВН. Уже здесь видна важная и полезная особенность импульсных ОВН — выброс входного напряжения может длиться значительно дольше 1 с без опасности выхода прибора из строя.

Выбросы входного напряжения секундной длительности можно рассматривать как внешние помехи сверхнизкой частоты и сверх-

большой амплитуды, которые ОВН активно фильтрует, поскольку является устройством с обратной связью. В силу же своей структуры импульсные ОВН «автоматически» являются и фильтрами высоких частот. На рис. 4 показана слаженная частотная характеристика коэффициента ослабления $K_{\text{осл}}$ ОВН МДН5 (максимальный выходной ток 5 А) в установившемся режиме. Как видно из характеристики, наибольшее ослабление имеют помехи в диапазоне частот 50–500 кГц — именно там, где находятся первые, самые мощные гармоники ПН СЭП.

В динамическом режиме работы (режиме ограничения входного напряжения) ОВН продолжает оставаться эффективным фильтром вплоть до самых низких частот. На рис. 5 показан результат помехоподавления ОВН в режиме ограничения выходного напряжения.

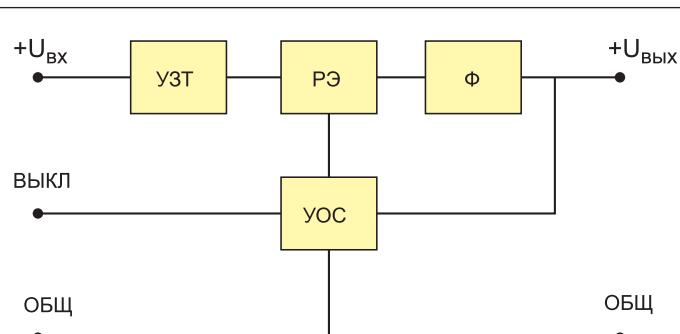


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема ОВН

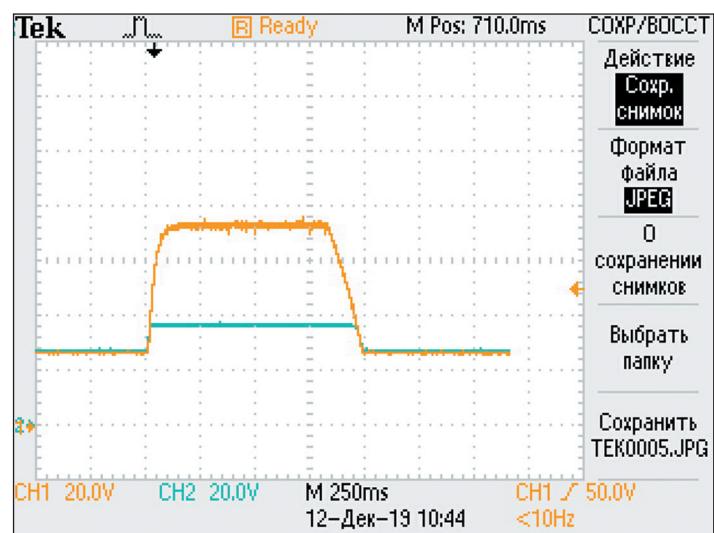


Рис. 3. Работа ОВН ФПО27-05 в режиме ограничения выброса выходного напряжения

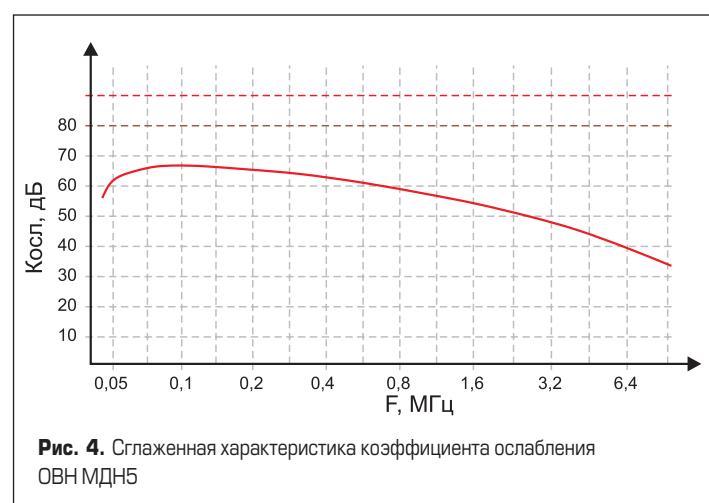


Рис. 4. Сглаженная характеристика коэффициента ослабления ОВН МДН5

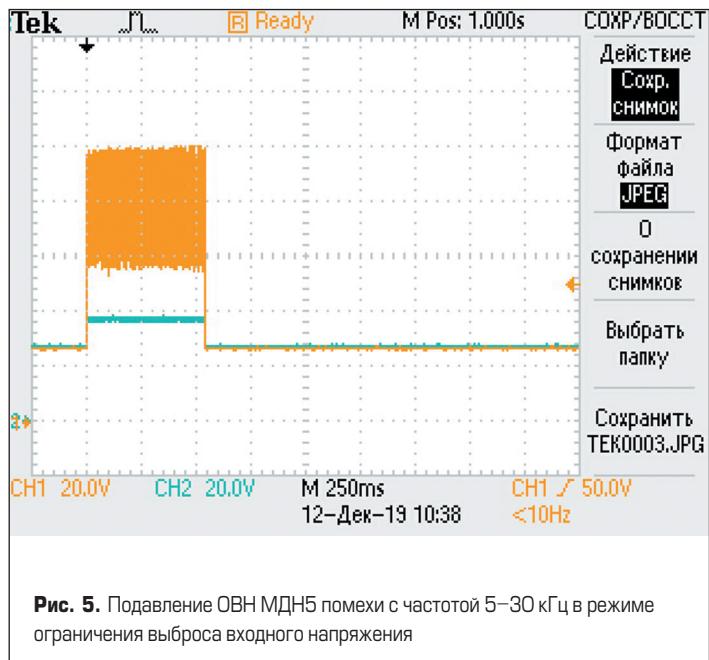


Рис. 5. Подавление ОВН МДН5 помехи с частотой 5–30 кГц в режиме ограничения выброса входного напряжения

Испытательная установка накладывает периодическую помеху с частотой 5–30 кГц и амплитудой около 50 В на выброс входного напряжения. При подключении генератора помех к ОВН уровень помехи на входе последнего уменьшается более чем вдвое — первичная фильтрация на входном фильтре ОВН. При этом на выходе ОВН амплитуда пульсаций составляет не более 1 В на активной нагрузке. Подключение же на выход ОВН ПН уменьшает амплитуду помехи еще вдвое — работает уже его входной фильтр. Однако это уже лишнее, поскольку сам ПН активно подавляет помеху такого уровня на входе.

Аналогичные результаты в динамике получаются при подаче помехи частотой в единицы–сотни герц. На рис. 6 показан результат помехо-подавления в частотном диапазоне 5–100 Гц. В этом случае входной конденсатор и внутренний фильтр ОВН практически не работают — слишком низкая частота. Помехоподавление осуществляется активной фильтрацией схемы ОВН. На выходе ОВН амплитуда пульсаций также не более 1 В на активной нагрузке.

Активное применение ОВН при построении СЭП бортовой авиационной РЭА повлекло за собой и дальнейшее развитие схемотехники и расширение функциональных возможностей ОВН. Например, если ОВН серии ФПО имеют фиксированное значение выходного тока независимо от входного напряжения, а максимальное значение для самого мощного ОВН ФПО составляет 10 А, то ОВН серии МДН выпускается также и в варианте стабилизации значения максимальной выходной мощности. Максимальный выходной ток ОВН серии МДН составляет уже 20 А. Очевидно, что разработчики этого ОВН приняли во внимание, что нагрузкой ОВН являются в основном импульсные ПН с высоким КПД. А это, в свою очередь, означает, что с увеличением напряжения на их входе потребляемый ими ток уменьшается и наоборот. Схемотехника этого варианта ОВН разработана так, что его выходная характеристика автоматически деформируется в зависимости от величины выходного напряжения, как показано на рис. 7.

В современном ОВН обязательно реализована защита ключа Кл от перегрузок по току. А это означает, что для нагрузки ОВН (ПН СЭП) будет автоматически реализован режим ограничения пускового тока. В случае же выхода из строя одного из ПН типа «КЗ по входу» ОВН переходит в режим защиты и потребление входного тока значительно уменьшается, то есть аварии в питающей сети не происходит, что повышает надежность СЭП в целом.

Из дополнительных возможностей ОВН следует отметить управление включением/выключением с помощью внешнего маломощного ключа (контакты реле, транзисторный ключ, выход логической микросхемы типа «открытый коллектор»). При замыкании вывода «ВЫКЛ» на вывод «ОБЩ» ОВН выключен, при размыкании выводов — включен. В выключенном состоянии ОВН потребляет несколько миллиампер. В случае, когда управление включением не используется, вывод «ВЫКЛ» оставляют неподключенным.

В установившемся режиме работы при входном напряжении $U_{\text{вх}} < U_{\text{огр}}$ падение напряжения на ОВН $U_{\text{пад}} = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}$ изменяется пропорционально выходному току и имеет максимальное значение не более 300–400 мВ при номинальном выходном токе. Это означает, что КПД передачи энергии входной сети в СЭП превышает 99%! В установившемся режиме работы ОВН с максимальным выходным током до 10 А практически не нагревается даже при максимальном токе.

Дальнейшее расширение функциональных возможностей ОВН может идти по пути миниатюризации прибора повышением частоты работы в режиме ограничения выброса напряжения, что наглядно прослеживается при сравнении двух однотипных ОВН разного «года рождения» — ФПО27-05 и МДН5. Габариты ОВН ФПО27-05 составляют 64×40×12 мм и максимальная удельная мощность 5,86 кВт/дм³, а у ОВН МДН5 при том же номинальном выходном токе — 48×33×10 мм и 11,36 кВт/дм³ соответственно.

Такие относительно высокие энергетические показатели далеко не предел. Заметим, что понижающий импульсный стабилизатор напряжения с настройкой выходного напряжения $U_{\text{вых_ном}} = 36$ В и максимальной длительностью открытого состояния ключа 100% относительно периода работы будет выполнять функции, анало-

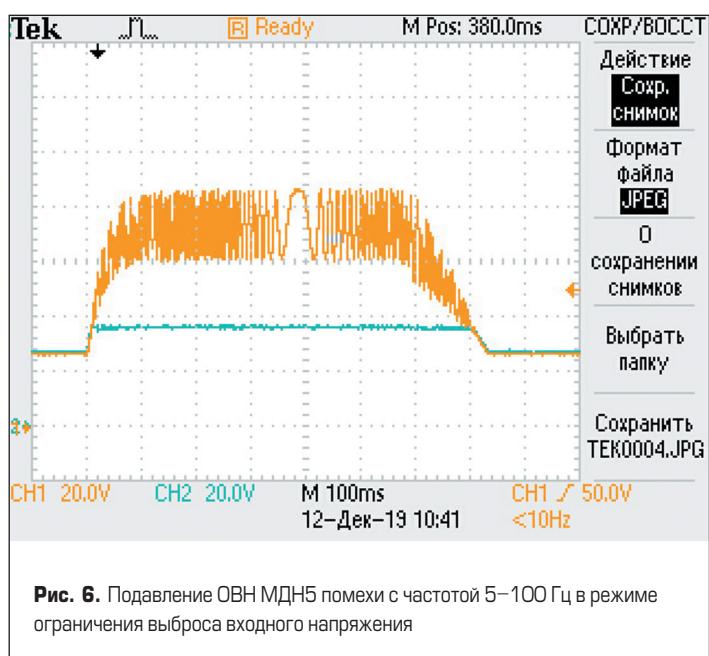


Рис. 6. Подавление ОВН МДН5 помехи с частотой 5–100 Гц в режиме ограничения выброса входного напряжения

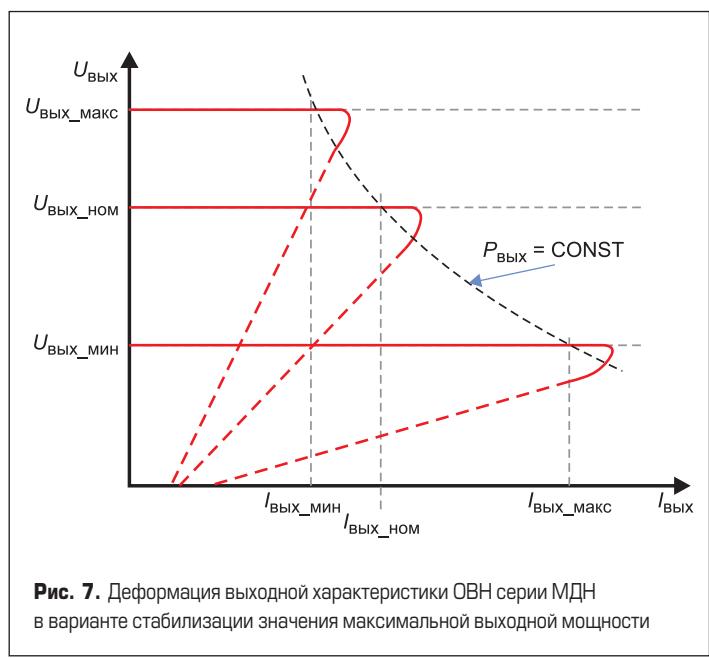


Рис. 7. Деформация выходной характеристики ОВН серии МДН в варианте стабилизации значения максимальной выходной мощности

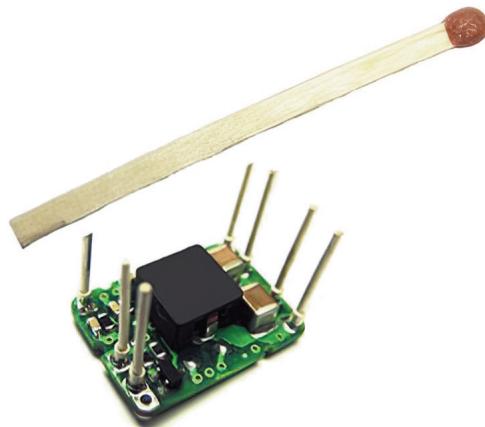


Рис. 8. Габариты ОВН с номинальным выходным током 5 А, выполненного на современной ЭКБ

гичные ОВН. А применяя для управления специализированный контроллер, реализующий управление синхронными ключами, работающий на рабочей частоте до 500–1000 кГц, можно значительно улучшить достигнутые показатели. На рис. 8 показана плата такого импульсного стабилизатора, выполненного на современной ЭКБ.

Силовые ключи с малым зарядом затвора переключаются синхронно сигналами логического уровня и изготовлены в малогабаритных плоских корпусах. Фильтрующие конденсаторы — керамические, дроссель — на сердечнике из магнитного материала с малыми потерями на перемагничивание. При перегрузке такой ОВН не переходит в режим релаксаций. Он работает постоянно в режиме ограничения выходного тока, что позволяет практически неограниченно увеличивать емкость нагрузки. Размеры платы образца составляют 17×12×6 мм, номинальный выходной ток стабилизатора 5 А. Прибор в корпусе имеет размеры 20×15×8 мм и максимальную удельную мощность 75 кВт/дм³! Все остальные параметры соответствуют характеристикам аналогичного ОВН.

СЭП для бортовой авиационной РЭА имеет типовую структуру с фильтром радиопомех (ФРП) на входе. С учетом рассмотренных выше особенностей работы ОВН предлагается при разработке СЭП вместо ФРП использовать ОВН. Габариты и масса СЭП при этом не меняются, а функциональные возможности существенно расширяются, и увеличивается КПД и надежность. Функциональная схема такой СЭП показана на рис. 9.

Представленная СЭП построена по модульному принципу: необходимое число каналов и их мощность набирается разработчиком из набора унифицированных модулей питания (МП), как из кубиков. Поскольку каждый из МП обладает всеми свойствами полноценного ПН, СЭП характерна избыточность и, соответственно, завышенная стоимость ее составных частей. Но это с лихвой компенсируется сокращением времени и стоимости ее разработки.

СЭП состоит из двух подсистем с одно- и двухканальными модулями питания МП1–МПn и МПn+1 — МПn+k, которые подключены к выходам двух ОВН: ОВН1 и ОВН2 соответственно. Каждая из подсистем управляется от блока управления БУ. Нагрузкой МП являются потребители П1–Пn, которые могут получать управление как от «своего» ОВН, так и от обоих (потребитель П2).

Использование ОВН в структуре СЭП автоматически дает ряд полезных дополнительных свойств:

- в установившемся режиме работы ОВН представляет собой отличный помеходавливающий фильтр, коэффициент ослабления в диапазоне частот 50–500 кГц которого достигает 50 дБ и более;
- мгновенное значение тока через ключ ограничено, что защищает как сам ключ, так и нагрузку ОВН (модули питания СЭП) от неограниченных входных токов в каждый момент времени;

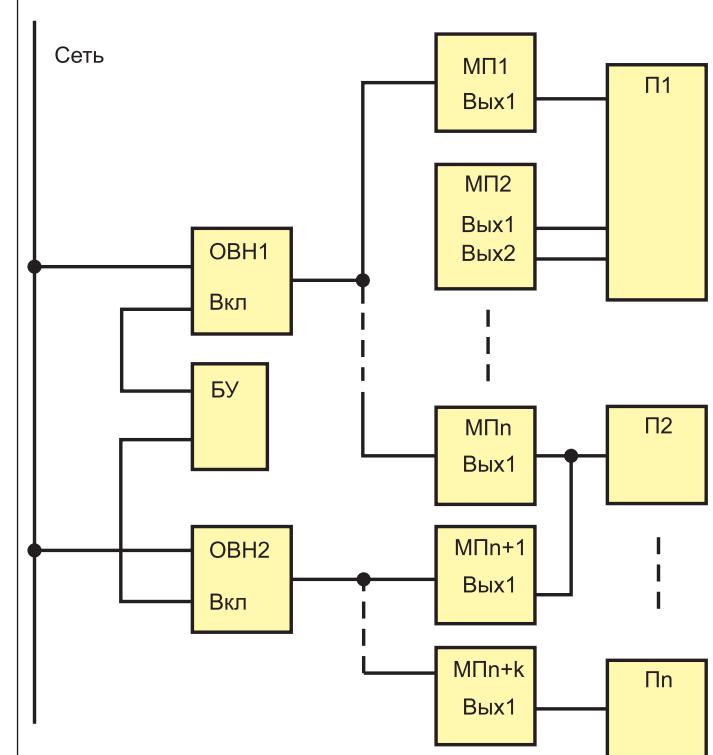


Рис. 9. Функциональная схема СЭП с ОВН вместо ФРП

- при отказе одного из МП, подключенных к ОВН, типа «КЗ по входу» ОВН воспринимает это как КЗ по выходу и переходит в защиту. Средний ток в этом режиме, протекающий через прибор, значительно уменьшается. Такой режим работы безопасен для прибора, он может работать в нем длительное время без опасности перегрева и защищая входную сеть от перегрузки, а отказавший преобразователь — от полного разрушения;
- использование ОВН в структуре СЭП позволяет добиться двукратного изменения входного напряжения для применяемых МП. При этом можно использовать в составе МП силовые элементы с вдвое более низким значением напряжения, что, в свою очередь, уменьшает потери и увеличивает КПД СЭП в целом;
- управление включением целой группы преобразователей можно производить одним маломощным сигналом через соответствующий ОВН.

Литература

1. Миронов А. А. Ограничитель напряжения. Патент РФ на полезную модель № 46594, 2005.
2. Миронов А. А. Ограничители напряжения — эффективный способ повышения надежности и помехоустойчивости бортовой РЭА. Научно-технический сборник «Электрическое питание». Сборник докладов научно-технической конференции. М., 2006.
3. Миронов А. А., Затулов С. Л. Ограничитель выбросов напряжения. Патент РФ на полезную модель № 153770, 2015.
4. Миронов А. А., Затулов С. Л. Расширение функциональных возможностей ограничителей выбросов напряжения для бортсетей // Электропитание. 2015. № 2.
5. Миронов А. А. Ограничитель напряжения с ограничением мощности. Патент РФ на полезную модель № 190341, 2019.
6. Фильтры-ограничители серии ФО на сайте ООО «МПП «ЭлТом». www.optochip.org/docum/store/f/d/38/1500026878-17-12337.pdf
7. Фильтры-ограничители серии ФПО на сайте ООО «ГК «Электронинвест». www.elin-gk.ru/ivyep/filtr_ye_organichiteli_fpo
8. Фильтры-ограничители серии МДН на сайте ООО «АЭИЭП». www.aeip.ru/production/moduli-zashchity-i-filtratsii/moduli-organichiteley-vybrosov-napryazheniya-seriy-mdn/