

Выбор оптимальной структуры авиационной системы электропитания постоянного тока

Анатолий МИРОНОВ

Рассмотрены различные варианты построения бортовых авиационных систем электропитания (СЭП) постоянного тока, их особенности и функциональные возможности. Описаны функциональные схемы построения СЭП, повышающие их надежность и помехоустойчивость.

Надежность бортовых СЭП летательных аппаратов является одним из основных факторов безопасности полета. Особенно это актуально сейчас, когда набирает силу концепция «полностью электрического самолета». Поэтому всегда предусматривается комплекс мер для надежности функционирования и повышения живучести бортовой СЭП. Далее будут рассматриваться варианты построения СЭП постоянного тока напряжением 27 В с переходными отклонениями в диапазоне 8–81 В (ГОСТ Р 54073-2010).

Кратковременные провалы напряжения сети до 8 В могут вызвать сбой в работе СЭП, выбросы же до 81 В — выход последней из строя, если не принять специальных защитных мер. Рассмотрим сначала способы реализации СЭП с защитой от перенапряжений.

При проектировании СЭП сети постоянного тока с выбросами напряжения до 81 В работчики могут идти двумя путями. Первый путь — использование в схемотехнике преобразователей напряжения (ПН) высоковольтных силовых полупроводниковых эле-

ментов, способных корректно работать при пятикратном изменении напряжения на входе (минимальное установившееся значение входного напряжения $U_{ВХ,MIN} = 17$ В, максимальное установившееся значение входного напряжения $U_{ВХ,MAX} = 36$ В, выброс входного напряжения до 81 В в течение 1 с). Однако такая возможность реализуется с применением высоковольтных силовых ключей и диодов в схеме преобразователя, а значит, увеличенными потерями при переключении и снижением КПД. Это наиболее простой вариант построения СЭП, хотя и не самый эффективный. Простой набор ПН, способных «держат» кратковременные выбросы входного напряжения, используется не часто. Обычно на входе такой СЭП устанавливается комплект фильтрующих элементов: фильтрующие конденсаторы, дроссели, а то и помехоподавляющие фильтры. Данные компоненты уменьшают уровень помех в сеть от ПН, но в случае отказа одного из них типа «короткое замыкание по входу» приводят к аварии в сети, поскольку ни фильтры, ни дроссели не ограничивают проходящий через них ток. При необходимости выключить СЭП управляющим сигналом

его следует подавать на каждый ПН СЭП в отдельности.

Альтернативный путь построения СЭП, защищенной от выброса 81 В, — установка на входе СЭП буферного устройства, способного ограничивать выбросы напряжения на уровне максимального значения входного напряжения для применяемых ПН — ограничителя выбросов напряжения (ОВН) [1]. Наиболее часто в этом случае применяются преобразователи напряжения с диапазоном входного напряжения 17–36 В.

Графически представленный алгоритм работы ОВН показан на рис. 1. Красным цветом показано входное напряжение ОВН, синим — выходное. Двукратное изменение выходного напряжения ОВН позволяет вдвое уменьшить напряжение на силовых ключах и диодах, что повышает КПД преобразователей и расширяет номенклатуру доступных силовых элементов. Кроме того, ОВН попутно решает и другие задачи, а именно:

- синхронное управление включением всех ПН СЭП с помощью одного управляющего сигнала;
- защита сети от перегрузок и аварийных ситуаций в случае выхода ПН из строя;
- ограничение пускового тока подключенных к выходу ПН;
- дополнительная фильтрация помех как в сеть, так и из сети элементами ОВН.

Устройства, предназначенные для борьбы с выбросами напряжения секундной длительности, представляют собой схемотехнически сложные приборы, работающие на основе активных алгоритмов ограничения напряжения и вообще помехоподавления. Они серийно выпускаются рядом отечественных фирм [2, 3]. Различные варианты исполнения ОВН описаны в технической [1, 4] и патентной литературе [5–7]. Наиболее востребованным в авиационном приборостроении является ОВН с импульсным способом ограничения напряжения, так как он может передавать в нагрузку большую мощность с малыми потерями [1]. И несмотря на то,

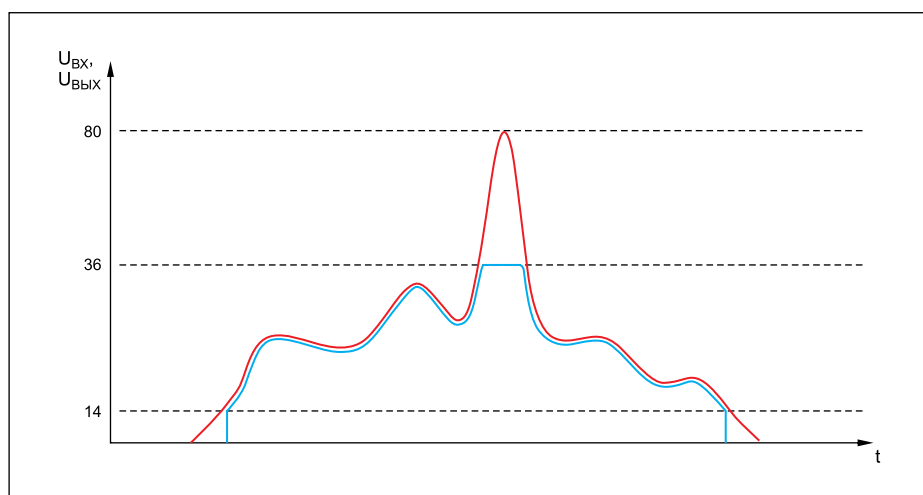


Рис. 1. Алгоритм работы ОВН

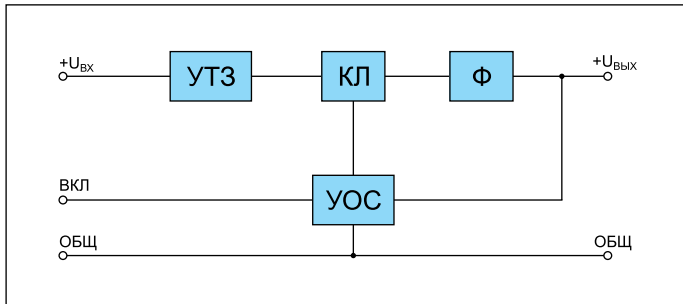


Рис. 2. Функциональная схема ОВН с импульсным способом ограничения напряжения

что ниже речь пойдет об ОВН для авиационной сети постоянного тока, алгоритмы его работы универсальны и их можно распространить на сети других номиналов постоянного напряжения.

Функциональная схема типового ОВН с импульсным способом ограничения напряжения показана на рис. 2. Разработчикам РЭА удобно, чтобы он был выполнен по схеме с общей отрицательной шиной. Действие ОВН в режиме ограничения выходного напряжения происходит следующим образом. При увеличении напряжения на выходе сверх значения $U_{огр}$ чуть больше максимальной величины входного напряжения ПН $U_{вх,MAX}$ узлом обратной связи УОС вырабатывается сигнал, переводящий ключ КЛ в импульсный режим работы со скважностью, обеспечивающей на выходе фильтра Ф среднее значение напряжения на уровне $U_{огр}$ с небольшой пульсацией. Для защиты ключа от перегрузок по току прибор настраивается узлом токовой защиты (УТЗ) на максимальное значение тока ключа $I_{кЛ,MAX}$ и узлом УОС — на напряжение ограничения на выходе $U_{огр} \approx U_{вых,MAX}$. ОВН может быть выключен замыканием вывода «ВКЛ» на вывод «ОБЩ» с помощью маломощного ключа.

На рис. 3 представлены осциллограммы работы ОВН с максимальной активной нагрузкой около 7 Ом (максимальный выходной ток 5 А при $U_{вх,MAX} = 36$ В). Желтый луч — напряжение на входных контактах ОВН, синий — на выходных контактах ОВН. Как видно из осциллограмм, выходное напряжение ОВН ограничивается на уровне $U_{вых} \approx 37$ В независимо от величины нагрузки. Кроме того, перевод ключа КЛ в импульсный режим работы во время перенапряжения на входе позволяет значительно уменьшить выделяемую на нем мощность по сравнению с мощностью, выделяемой на ключе КЛ при работе в линейном режиме, и продолжительность перегрузки уже не имеет значения — к перегреву ключа КЛ она не приводит. На рис. 3 она составляет более 3 с. При проверке ОВН регулировщик может удерживать перегрузку в течение 10–15 с, требующихся ему для измерения необходимых параметров прибора без ущерба для последнего. Нечувствительность ОВН к продолжительности перенапряжения на входе по существу превращает прибор просто в ограничитель напряжения. При работе ОВН на нагрузки, которые имеют

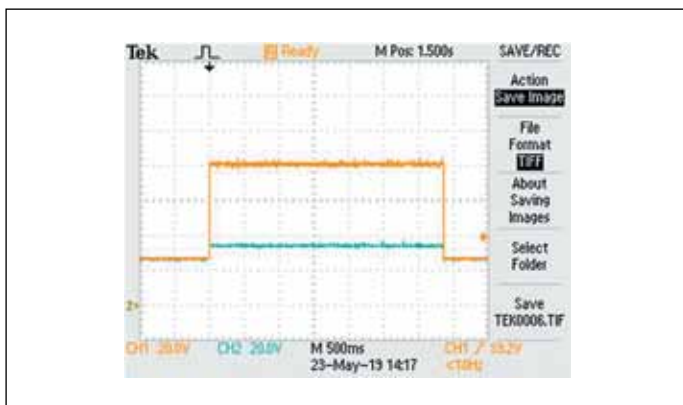


Рис. 3. Работа ОВН при перенапряжении на входе

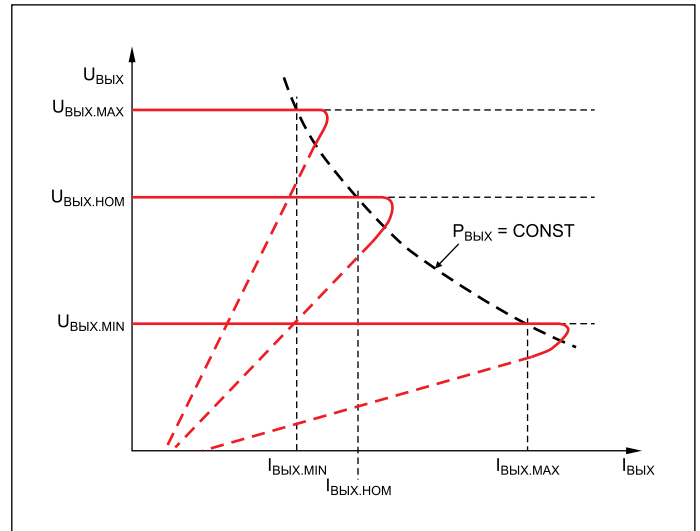


Рис. 4. Реализация режима стабилизации максимального значения выходной мощности в ОВН серии МДН

сложный комплексный характер, такие как импульсный ПН, осциллограммы переходного процесса аналогичны.

Обычно максимальное значение среднего выходного тока ОВН остается постоянным независимо от входного (выходного) напряжения, как это реализовано в ОВН серии ФПО предприятия ООО «ГК «Электронинвест». Однако это не всегда удобно. Дело в том, что основные нагрузки ОВН — импульсные преобразователи напряжения. Их отличительная особенность — повышенный и практически постоянный КПД во всем диапазоне входных напряжений. То есть при увеличении входного напряжения потребляемый ПН ток будет уменьшаться. Указанная особенность учтена в ОВН серии МДН предприятия ООО «АЭИЭП» [8]. Одна из опций ОВН автоматически изменяет ток срабатывания защиты ключа КЛ таким образом, чтобы максимальное значение выходной мощности ОВН оставалось постоянным вне зависимости от входного напряжения (рис. 4).

В установившемся режиме работы при входном напряжении $U_{вх} < U_{огр}$ падение напряжения на ОВН импульсного способа ограничения $U_{пад} = U_{вх} - U_{вых}$ изменяется пропорционально выходному току и имеет максимальное значение не более 300–400 мВ при максимальном выходном токе. При этом КПД передачи мощности на выходе превышает 99%.

При перегрузке по току ОВН обычно переходит в режим релаксаций на частоте в несколько десятков герц, а средний потребляемый входной ток не превышает $(0,1-0,2) \times I_{вых,MAX}$, амплитуда тока ключа КЛ ограничена, и его перегрева не происходит.

В установившемся режиме работы ОВН ведет себя как помехоподавляющий фильтр с активным диапазоном помехоподавления до 20–30 МГц. Максимальный коэффициент ослабления в диапазоне до 2 МГц достигает 60–70 дБ. А как раз здесь находятся первые, самые мощные, гармоники помех импульсных ПН.

Типовая функциональная схема СЭП на основе ОВН показана на рис. 5.

СЭП реализована по модульному принципу на базе одно- и многоканальных ПН. Каждый потребитель П1–Пn подключен к своей группе преобразователей напряжения. Группа потребителей, действующих одновременно, питается от «своей» группы ПН через один ОВН. Работой (включением/выключением) каждого конкретного ОВН управляет блок управления БУ. Потребители, работа которых в данный момент не требуется, отсоединяются БУ выключением соответствующего ОВН. Таким образом, СЭП оптимизирована по параметру «энергопотребление», что особенно важно для автономных объектов. Любой потребитель, например потребитель П2, может получать энергоснабжение и от нескольких ОВН.

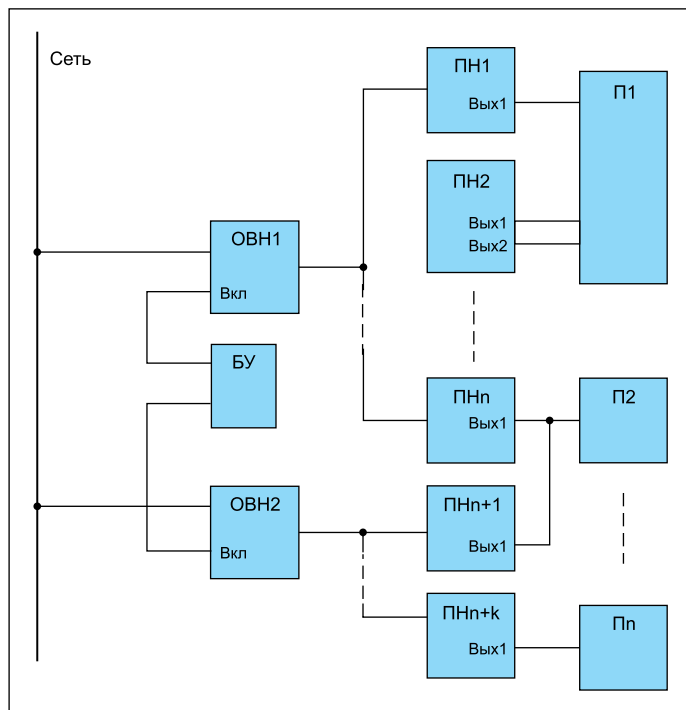


Рис. 5. Функциональная схема СЭП на основе ОВН

СЭП на основе ОВН имеет много других полезных особенностей. Поскольку ОВН имеет защиту своих ключей от перегрузки по току и КЗ на выходе, при его включении подачей питающего напряжения на вход или включение по выводу «ВКЛ» средний ток через его выходной фильтр ограничен, выходное напряжение (оно же входное для ПН) увеличивается относительно медленно (за несколько мс), поэтому пусковой ток нагруженных на него ПН ограничен, что положительно сказывается на надежности конденсаторов выходного фильтра ОВН и входных фильтров ПН.

При выходе из строя какого-либо ПН, например при КЗ по выходу, не происходит аварии во входной сети. ОВН, к которому неисправный ПН подключен, переходит в режим перегрузки — при нем напряжение на его выходе уменьшается практически до нуля. Все остальные ПН на его выходе выключаются, а потребляемый ОВН ток уменьшается многократно. Автоматически ограничивается и средний выходной ток ОВН, защищая неисправный ПН от полного разрушения. В таком состоянии ОВН может находиться неограниченно долго без опасности выхода из строя.

Преобразователи напряжения для СЭП можно выбрать на двукратно изменяющийся диапазон входного напряжения $U_{ВХ} = 17\text{--}36$ В. Силовые ключи таких преобразователей имеют максимальное напряжение сток-исток в закрытом состоянии не более 100 В, силовые диоды в выходном выпрямителе — также вдвое меньшее максимальное напряжение. Одно это уже повышает КПД ПН на 2–3%! Кроме того, более низковольтные ключи и диоды одновременно являются и более быстродействующими, что уменьшает динамические потери в них при переключении и способствует повышению КПД. В ПН с выходным напряжением менее 12 В вместо диодных выпрямителей можно использовать синхронное выпрямление с пассивно управляемым транзистором — от обмотки силового трансформатора. Повышение КПД таких ПН при низких выходных напряжениях будет еще более существенным — на 6–7%. Без применения ОВН эти режимы работы силовых элементов в преобразователях напряжения так просто реализовать было бы невозможно.

Кратковременные провалы напряжения сети до 8 В могут вызвать сбои в работе потребителей П. Если категория потребителей П требует бесбойной работы, в этой ситуации в качестве буфера необходимо применять другой класс приборов — нормализаторы входного

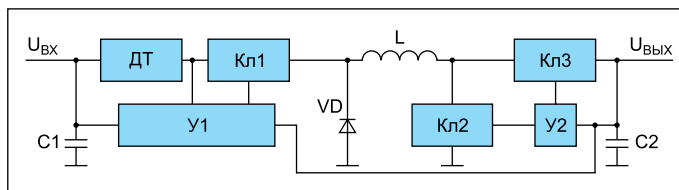


Рис. 6. Функциональная схема нормализатора входного напряжения

го напряжения (НВН). Эти приборы не только «обрезают» выброс напряжения, но и «поднимают» провал до нормального значения $U_{ВХ,MIN} = 17$ В. Функциональная схема одного из возможных вариантов НВН показана на рис. 6 [9].

Работа устройства происходит следующим образом. Узлы управления У1 и У2 включаются при $U_{ВХ} \geq 7\text{--}7,4$ В. Максимальное значение тока через ключ Кл1 $I_{КЛ1,MAX}$, а значит, и максимальное значение выходного тока ОВН устанавливается номиналом датчика тока ДТ, максимальное выходное напряжение $U_{ВЫХ,MAX}$ — элементами в узле управления У1, а минимальное выходное напряжение $U_{ВЫХ,MIN}$ — элементами в узле управления У2. Рабочие напряжения на элементах НВН показаны на рис. 7.

Если входное напряжение находится в допустимых пределах для ПН, то есть $U_{ВХ,ПН,MIN} \leq U_{ВХ} \leq U_{ВХ,ПН,MAX}$ (на интервале времени $t_{ВКЛ} \leq t \leq t1$), узлы управления У1 и У2 вырабатывают управляющие сигналы $U_{У,КЛ1}$, $U_{У,КЛ2}$ и $U_{У,КЛ3}$, при которых ключи Кл1 и Кл3 открыты, а ключ Кл2 закрыт. При этом в установившемся режиме выходное напряжение практически равно входному за вычетом незначительного падения напряжения на открытых ключах Кл1, Кл3, дросселе L и датчике тока ДТ, которое в сумме составляет доли вольта.

При увеличении входного напряжения сверх значения $U_{ВХ,ПН,MAX}$ (на интервале времени $t1 \leq t \leq t2$) узел управления У1 переводит ключ Кл1 в импульсный режим работы с такой скважностью, чтобы выходное напряжение не превышало значения $U_{ВХ,ПН,MAX}$, то есть предлагаемое устройство действует как импульсный преобразователь I типа (понижающий). При возврате входного напряжения в допустимые пределы для ПН $U_{ВХ,ПН,MIN} \leq U_{ВХ} \leq U_{ВХ,ПН,MAX}$ (на интервале времени $t2 \leq t \leq t3$) узлы управления У1 и У2 вновь вырабатывают управляющие сигналы, при которых ключи Кл1 и Кл3 открыты, а ключ Кл2 закрыт. Таким образом, при $U_{ВХ,ПН,MIN} \leq U_{ВХ} \leq U_{ВБР}$ (на интервале времени $t_{ВКЛ} \leq t \leq t3$) алгоритмы работы НВН и ОВН полностью совпадают.

При уменьшении входного напряжения до значений $U_{ПР} \leq U_{ВХ} \leq U_{ВХ,ПН,MIN}$ узлы управления У1 и У2 вырабатывают управляющие сигналы, при которых ключ Кл1 открыт, а ключи Кл2 и Кл3 действуют в импульсном режиме, открываясь и закрываясь синхронно и противофазно (то есть когда один из ключей открыт, другой — закрыт), так что выходное напряжение стабилизируется на уровне $U_{ВХ,ПН,MIN}$. В этом режиме НВН работает как импульсный преобразователь II типа (повышающий) вплоть до минимального значения входного напряжения провала $U_{ВХ} = U_{ПР}$.

При перегрузке на выходе (запуск НВН или короткое замыкание на выходе), когда мгновенное значение тока через ключ Кл1 достигает значения $I_{КЛ1,MAX}$, узел управления У1 принудительно выключает его. При этом мгновенное значение токов через ключи Кл2 и Кл3 также не могут превысить значения $I_{КЛ1,MAX}$, что защищает их от перегрузок по току, по какой бы причине они ни произошли. Эта особенность НВН, кстати, защищает и его нагрузку от перегрузки по току.

При фиксированном значении $I_{КЛ1,MAX}$ максимальная выходная мощность описанной структуры НВН изменяется пропорционально изменению выходного (входного) напряжения, что сужает ее функциональные возможности. Чтобы максимальное значение выходной мощности оставалось неизменным, в узел управления У1 необходимо ввести дополнительные цепи, реализующие обратно пропорциональную зависимость изменения $I_{КЛ1,MAX}$ от выходного напряжения в диапазоне $U_{ВХ,ПН,MIN} \leq U_{ВЫХ} \leq U_{ВХ,ПН,MAX}$, как это предложено в [10]. Реализуя же, например, кратковременное увеличение $I_{КЛ1,MAX}$ на этапе

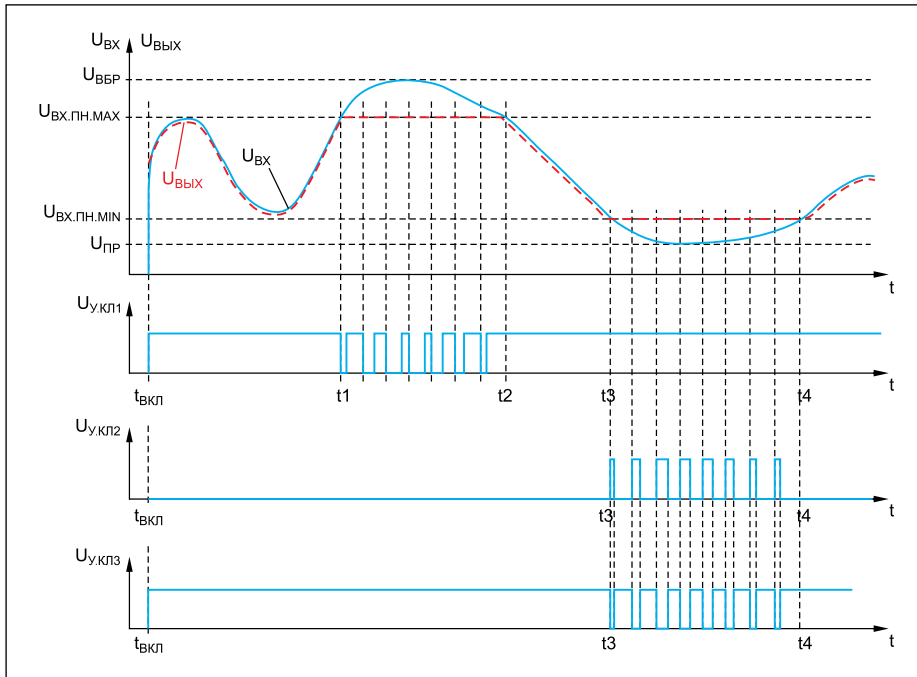


Рис. 7. Эпюры рабочих напряжений на элементах НВН

включения, можно пропорционально уменьшать длительность фронта нарастания выходного напряжения при включении НВН.

НВН с описанным алгоритмом работы, как и «импульсные» ОВН, может длительно находиться как в режиме перегрузки по току, так и при повышенном (пониженном) входном напряжении без опасности перегрева и выхода из строя. Эта особенность НВН представляет дополнительное удобство при регулировке прибора.

В установившемся режиме работы НВН, также как и «импульсный» ОВН, является отличным помехоподавляющим фильтром

на элементах С1LC2. Использование в качестве элементов С1С2 современных керамических конденсаторов расширяет диапазон эффективной фильтрации до десятков мегагерц.

Кроме того, НВН защищает входную сеть в случае, если из строя выходит один или несколько ПН, подключенных на его выход. Узел управления У1 переводит устройство в режим низкочастотных релаксаций, при котором средний потребляемый НВН ток уменьшается до $(0,1-0,15) \times I_{кп1,макс}$, аналогично описанному ОВН. Автоматически ограничивается и средний выходной ток

НВН, защита неисправный ПН от полного разрушения.

Остальные особенности работы и схемы построения СЭП на базе НВН аналогичны СЭП с ОВН.

Литература

1. Миронов А. А. Ограничители напряжения — эффективный способ повышения надежности и помехоустойчивости бортовой РЭА. Сборник докладов научно-технической конференции «Электрическое питание». М.: 2006.
2. Фильтры-ограничители серии ФПО от ООО «ГК «Электронинвест». www.elin-gk.ru/ivyep/filtry_ogranichiteli_fpo
3. Нормализаторы входного напряжения серий НВЕ, НВТ, НЕТ от ООО «МПП «Ирбис». www.mmp-irbis.ru/katalog/DC_DC_converters/istochniki-pitania-100-150wt-normalizatori.php
4. Миронов А. А., Затулов С. Л. Расширение функциональных возможностей ограничителей выбросов напряжения для бортовых // Электропитание. 2015. № 2.
5. Миронов А. А. Ограничитель напряжения. Патент РФ на полезную модель № 46594, 2005.
6. Миронов А. А. Ограничитель напряжения. Патент РФ на полезную модель № 80035, 2009.
7. Миронов А. А., Затулов С. Л. Ограничитель выбросов напряжения. Патент РФ на полезную модель № 153770, 2015.
8. Миронов А. А., Шепета Д. А. Ограничитель выбросов напряжения для систем электропитания летательных аппаратов // Электропитание. 2019. № 1.
9. Миронов А. А. Нормализатор сети постоянного напряжения. Патент РФ на полезную модель № 78016, 2008.
10. Миронов А. А. Ограничитель напряжения с ограничением мощности. Патент РФ на полезную модель № 190341, 2019.