

# Способы параллельного включения ИВЭП

Юрий Шуваев (Москва)

Рассмотрены два варианта параллельного включения импульсных стабилизирующих источников вторичного электропитания с перекрёстными связями между каналами и с ограничением тока нагрузки каждого канала.

## ВВЕДЕНИЕ

Система энергоснабжения сложных автономных авиационных и космических комплексов включает в себя первичные источники электропитания – электромашинные генераторы и преобразователи, аккумуляторные и солнечные батареи и др., а также большое число различных источников вторичного электропитания (ИВЭП), предназначенных для радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Для электропитания функциональных шкафов, блоков, приборов и модулей, входящих в комплекс РЭА, требуются ИВЭП, рассчитанные на различные выходные напряжения и токи нагрузки.

Для маломощных потребителей обычно применяются ряды унифицированных модулей питания, рассчитанных на широкий диапазон входных и выходных параметров, а для мощных (неделимых) потребителей, как правило, разрабатываются специальные источники электропитания. Вместо одного стабилизирующего ИВЭП большой мощности предлагается использовать систему вторичного электропитания (СВЭП) из нескольких одинаковых ИВЭП меньшей мощности, работающих на общую нагрузку.

При параллельном соединении источников питания, работающих в режиме «горячего» резервирования, надёжность системы существенно повышается. Упрощается компоновка аппаратуры, поскольку разместить несколько малогабаритных приборов легче, чем один громоздкий блок.

Уменьшаются объём и масса ЗИП, облегчается ремонт аппаратуры, так как при отказе требуется замена только отказавшего прибора. Возможность поочередной коммутации отдельных каналов позволяет уменьшить пусковые токи и выбросы питающего напряжения при включении и отключении аппаратуры. Следует отметить, что уменьшение пусковых токов важно при работе РЭА от автономного пер-

вичного источника питания ограниченной мощности.

## ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ИВЭП НА ОБЩУЮ НАГРУЗКУ

Преимущества системы вторичного электропитания с параллельным включением ИВЭП реализуются наиболее полно, если в источниках питания предусмотрены устройства, обеспечивающие равномерное, заданное или рациональное распределение между ними общего тока нагрузки.

Существуют различные схемы для распределения тока нагрузки между параллельно работающими ИВЭП:

- схема с ведущим и ведомыми каналами;
- схема с кольцевой связью между каналами;
- схема с перекрёстными связями между каналами;
- схема с ограничением тока нагрузки каждого канала.

Наиболее известной является *система электропитания, состоящая из ведущего и нескольких ведомых каналов* [1]. Входящие в систему электропитания ИВЭП могут быть выполнены по любой структурной схеме, с непрерывным или ключевым регулирующим элементом. В каждом ИВЭП предусмотрен резистивный датчик тока нагрузки (ДТ), включенный в одну из силовых шин. Схема управления ведомого канала содержит дифференциальный усилитель постоянного тока (УПТ), источник опорного напряжения (ИОН), делитель выходного напряжения (ДН) и согласующее устройство (СУ), связанное с регулирующим элементом. В схему управления каждого ведущего канала входят усилитель отрицательной обратной связи по току (УОСТ), один вход которого подключен к ДТ своего ИВЭП, а другой вход всех УОСТ подключен к ДТ ведущего канала. Выход УОСТ через СУ подключен к регулирующему элементу  $k$ -го ведущего канала.

Ведущий ИВЭП обеспечивает стабилизацию напряжения на выходе СВЭП, а ведомые каналы воспроизводят с заданной точностью ток нагрузки ведущего ИВЭП при воздействии любых возмущающих факторов, т.е. ток нагрузки каждого ведомого канала автоматически устанавливается равным току нагрузки ведущего канала. Например, при сбросе тока нагрузки системы или при выходе из строя одного или нескольких ведомых каналов изменяется ток нагрузки ведущего канала, что приводит к соответствующему изменению тока нагрузки оставшихся ведомых каналов.

Чтобы система могла обеспечить работоспособность питаемой РЭА при выходе из строя одного или нескольких ведомых каналов, в ней должен быть предусмотрен «горячий» резерв, т.е. включено соответствующее количество дополнительных ведомых ИВЭП.

Отметим, что выход из строя ведущего канала приведёт к выходу из строя всей системы питания, поэтому необходимо принимать особые меры для повышения надёжности ведущего канала, что является существенным недостатком такой системы. Ведущий и ведомые ИВЭП имеют разные схемы, что также является недостатком. По этим причинам система с ведущим и ведомыми каналами далее не рассматривается.

*Система электропитания с кольцевыми связями между каналами* состоит из нескольких одинаковых импульсных ИВЭП, которые содержат специальное устройство для выравнивания токов между источниками питания, работающими на общую нагрузку [2, 3]. Каждый ИВЭП содержит ключевой элемент (КЭ), LCD-фильтр, импульсную и аналоговую части схемы управления и специальное выравнивающее устройство (ВУ). Схема управления служит для стабилизации выходного напряжения ИВЭП на заданном уровне, а выравнивающее устройство обеспечивает равномерное распределение тока нагрузки системы между параллельно работающими каналами.

Выравнивающее устройство содержит датчик тока нагрузки (ДТ) и дифференциальный усилитель (ДУ). На один из входов ДУ подаётся сигнал обратной связи по току – напряжение, пропор-

циональное току нагрузки данного ИВЭП, со своего ДТ, а на другой вход ДУ поступает аналогичное напряжение с датчика тока другого ИВЭП. Второе напряжение является опорным для первого. Входные цепи ДУ образуют замкнутое кольцо. Отметим, что в качестве ДТ может быть использована обмотка дросселя фильтра с подключенным параллельно ей интегрирующим звеном.

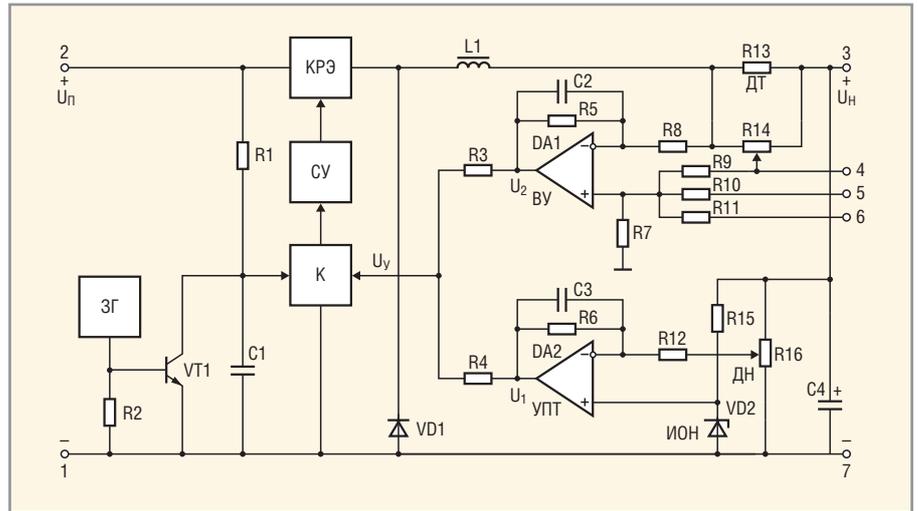
Выравнивающее устройство работает следующим образом. Усиленный сигнал рассогласования, сформированный вследствие неравенства токов нагрузки соседних каналов и поступающий с выхода ДУ, суммируется с усиленным сигналом рассогласования по напряжению, поступающим с выхода аналоговой части схемы управления, и подаётся на импульсную часть схемы управления ИВЭП. Схема управления ИВЭП работает как обычно.

Если все ИВЭП, входящие в систему электропитания, исправны, напряжение, пропорциональное току нагрузки каждого канала, подаётся на вход своего ДУ и сравнивается с опорным напряжением, которое пропорционально току нагрузки  $(k + 1)$ -го канала. Если указанные токи равны, сигнал рассогласования на выходе ДУ равен нулю и не оказывает влияния на работу стабилизатора напряжения ИВЭП. При отклонении тока нагрузки любого канала от среднего значения на выходе соответствующего ДУ, появляется сигнал рассогласования, который возвращает ток нагрузки ИВЭП к среднему значению.

При выходе из строя одного из ИВЭП и отключении его от питающей сети с помощью соответствующего контактора или реле ток нагрузки отказавшего ИВЭП становится равным нулю. Вследствие этого сигнал на выходе ДУ исправных ИВЭП резко изменяется и выходит за допустимые пределы. Если в устройстве выравнивания не предусмотрены дополнительные элементы, схема «опрокидывается» и СВЭП теряет работоспособность. Это является основным существенным недостатком схемы выравнивания токов с кольцевой связью между каналами.

### СИСТЕМА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ПЕРЕКРЁСТНЫМИ СВЯЗЯМИ ПО ТОКУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ИВЭП

Схема включения источников питания с перекрёстными связями между



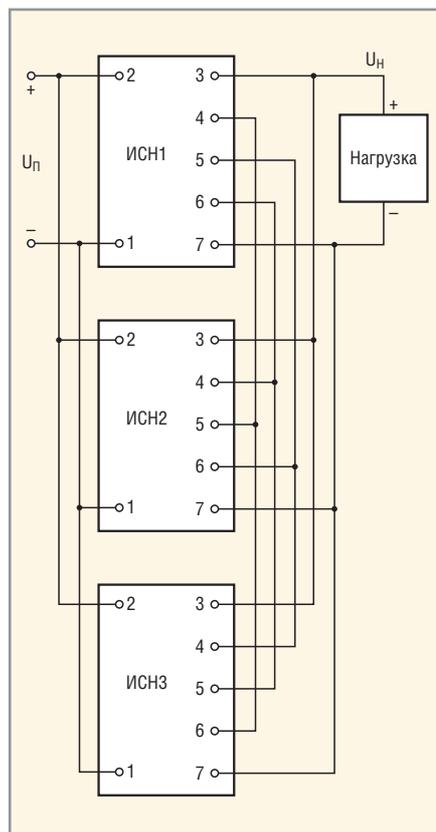
**Рис. 1. Компенсационно-параметрический импульсный стабилизатор напряжения с токовым выравнивающим устройством**

КРЭ – ключевой регулирующий элемент; СУ – согласующее устройство; К – компаратор; ЗГ – задающий генератор; ВУ – токовое выравнивающее устройство; УПТ – усилитель постоянного тока; ИОН – источник опорного напряжения; ДН – резистивный делитель напряжения; ДТ – резистивный датчик тока

каналами свободна от указанных недостатков [4]. Подробнее рассмотрим работу такой системы, в которой в качестве ИВЭП выбраны стандартные импульсные стабилизаторы напряжения (ИСН) с последовательным транзистором и последовательным дросселем с ШИМ-регулированием [5]. Функциональная схема ИСН приведена на рисунке 1.

Стабилизатор содержит ключевой регулирующий элемент (КРЭ) на транзисторах, LCD-фильтр (L1, C4, VD1), резистивный датчик тока нагрузки (R13), согласующее устройство (СУ) и схему

управления с ШИМ, который включает задающий генератор (ЗГ) и генератор пилообразного напряжения, состоящий из времязадающих конденсатора C1 и резистора R1, шунтирующего транзистора VT1 и компаратора (К). В аналоговую часть схемы управления входят усилитель постоянного тока (УПТ) DA2 и узел сравнения, состоящий из источника опорного напряжения ИОН (VD2) и резистивного делителя напряжения (ДН) в виде переменного резистора R16. Инвертирующий вход DA2 подключен к средней точке делителя, неинвертирующий – к выхо-



**Рис. 2. Система вторичного электропитания с перекрёстными связями между каналами**

ду ИОН, а выход DA2 через резистор R4 подключен к управляющему входу компаратора.

В аналоговую часть схемы управления входит также выравнивающее устройство (ВУ), содержащее суммирующий усилитель отрицательной обратной связи по току (УОСТ) DA1. Инвертирующий вход DA1 через резистор R8 соединён с выходом ДТ, а неинвертирующий вход через резисторы R10, R11 подключен к внешним выводам 5, 6 ИСН, а через резистор R3 – к средней точке переменного резистора R14, включенного параллельно ДТ. Средняя точка переменного резистора R14 соединена также с внешним выводом 4 ИСН. Выход УОСТ через резистор R3 подключен к управляющему входу компаратора. Число согласующих резисторов R9 – R11 равно числу параллельно включенных каналов.

Из всех существующих видов ИСН наибольшее распространение получили компенсационные и компенсационно-параметрические стабилизаторы напряжения (КПИС). Последние являются стабилизаторами с комбинированным регулированием: они содержат замкнутый контур регулирования по отклонению выходного напряжения и параметричес-

кий канал регулирования по возмущению входного (питающего) напряжения. Сущность действия параметрического канала регулирования заключается в том, что наклон и амплитуда пилообразного напряжения на времязадающем конденсаторе С1 изменяются пропорционально изменению питающего напряжения. Вследствие этого осуществляется параметрическая стабилизация выходного напряжения при изменении входного (помимо отрицательной обратной связи) и обеспечивается практически полная инвариантность его выходного напряжения относительно входного.

В рассматриваемой СВЭП могут быть использованы оба вида ИСН с ШИМ-регулированием, однако при анализе её работы рассматривался КПИС. Отметим, что для КПИС, выполненного по схеме рис. 1, схема управления должна иметь следующие особенности:

- включение КРЭ должно производиться одновременно с подачей синхронизирующих импульсов с выхода ЗГ, а его выключение – при подаче сигнала с выхода ШИМ, т.е. ЗГ должен фиксировать моменты включения мощного ключа;
- схема сравнения и УПТ должны обеспечивать инверсный сигнал на выходе УПТ относительно выходного напряжения;
- согласующее устройство может быть выполнено с инверсией фазы или без таковой. При этом выход УПТ должен быть подключен к соответствующему входу компаратора.

Сами по себе ИСН работают как обычно. Перед их автономным включением переменные резисторы устанавливают в среднее положение и замыкают между собой внешние выводы 4, 5, 6. Затем подают питающее напряжение  $U_{п}$  на входные выводы 1 и 2 ИСН и с помощью переменного резистора R16 устанавливают номинальное значение выходного напряжения.

После указанной подготовки производят соединение нескольких ИСН для их параллельной работы на общую нагрузку по схеме, приведённой на рисунке 2. Перемычки между выводами 4, 5, 6 снимают, а указанные выводы различных ИСН соединяют по схеме, приведённой на рисунке 2. Переменными резисторами R14 устанавливают оди-

наковые токи нагрузки всех каналов, измеряя их с помощью внешних амперметров или встроенных ДТ. Указанную настройку проводят при максимальном токе нагрузки системы питания.

Сконфигурированная согласно рис. 2 система работает следующим образом. В установившемся режиме выходное напряжение ИСН поступает на резистивный делитель напряжения, его часть сравнивается с опорным напряжением, поступающим с выхода ИОН, и сигнал рассогласования, усиленный УПТ, через резистор R4 подаётся на управляющий вход компаратора.

С другой стороны, напряжение, пропорциональное току, отдаваемому каждым ИСН в общую нагрузку через резистор R8, подаётся на инвертирующий вход ОУ DA1. На неинвертирующий вход DA1 через резисторы R9 – R11 поступает напряжение, снимаемое с датчиков тока всех ИСН.

С выхода DA1 усиленный сигнал рассогласования через резистор R3 также подаётся на управляющий вход компаратора. Таким образом, напряжение на управляющем входе компаратора складывается из двух составляющих: напряжения, поступающего с выхода УПТ, и напряжения, поступающего с выхода суммирующего УОСТ. На синхронизирующий вход компаратора подаётся напряжение с выхода генератора пилообразного напряжения. В момент равенства мгновенных значений напряжений на входах компаратора на его выходе формируется сигнал выключения КРЭ, обеспечивающий необходимый коэффициент заполнения импульса ( $K_3$ ).

При равенстве токов нагрузки всех ИСН, входящих в СВЭП, сигнал рассогласования на выходе суммирующего УОСТ равен нулю, и схема управления обеспечивает заданное стабилизированное напряжение на выходе всей системы. При изменении тока нагрузки любого ИСН изменяется напряжение, подаваемое на инвертирующий вход суммирующего УОСТ своего стабилизатора и на неинвертирующий вход УОСТ всех стабилизаторов. Вследствие этого изменяется напряжение на управляющем входе компаратора, коэффициент заполнения импульсного напряжения и, следовательно, состояние КРЭ таким

образом, чтобы скомпенсировать возникшее изменение тока нагрузки. В результате токи всех ИСН возвращаются практически к первоначальному значению.

Например, при увеличении тока нагрузки первого ИСН одновременно увеличивается напряжение на инвертирующем входе УОСТ этого стабилизатора и на неинвертирующих входах УОСТ остальных ИСН, вследствие чего происходит уменьшение  $K_3$  первого канала и увеличение  $K_3$  остальных каналов.

При выходе из строя любого ИСН, например, из-за пробоя его КРЭ и отключения неисправного стабилизатора устройством защиты (предохранителем или контактором), благодаря применению ВУ и наличию перекрёстных связей входов УОСТ с ДТ всех стабилизаторов, происходит перераспределение тока нагрузки системы между оставшимися исправными ИСН, причём ток нагрузки делится практически поровну между ними, хотя при этом происходит незначительное снижение выходного напряжения.

Выведем основные расчётные соотношения для выходного напряжения описываемой системы при отсутствии и наличии выравнивающего устройства, а также выражения для токов нагрузки параллельно работающих каналов.

Анализ схем ИСН и СВЭП будем производить на основании следующих допущений, не вносящих существенных погрешностей в конечные результаты:

- внутреннее сопротивление ИСН не учитывается;
- соответствующие коэффициенты передачи делителей напряжения  $k_{д1}$ ,  $k_{д2}$  устанавливаются при настройке ИСН и СВЭП одинаковыми для всех каналов;
- соответствующие коэффициенты усиления УПТ ( $k_1$ ) и УОСТ ( $k_2$  и  $k_3$ ), напряжения опорных источников  $U_{оп}$  и сопротивления датчиков тока  $R_{дт}$  одинаковы во всех каналах.

Выходное напряжение ИСН и коэффициент заполнения импульсного напряжения определяются следующими выражениями:

$$U_H = K_3 U_{п}, \quad (1)$$

$$K_3 = t_H / T, \quad (2)$$

где  $U_{п}$  – напряжение питания СВЭП;  $t_H$  – длительность включенного состо-

яния КРЭ;  $T$  – период повторения импульсов.

Длительность импульсов напряжения определяется временем заряда конденсатора  $C1$  до значения управляющего напряжения  $U_y$  на входе компаратора:

$$t_H = C1 U_y / I_c, \quad (3)$$

где  $C1$  – ёмкость времязадающего конденсатора;  $I_c = E_c / R1$  – ток заряда времязадающего конденсатора;  $E_c$  – напряжение питания RC-цепи;  $R$  – сопротивление времязадающего резистора.

Из соотношений (1) – (3) получаем:

$$U_H = U_{п} / E_c (R1 C1 / T) U_y. \quad (4)$$

Из соотношения (4) видно, что если заряд времязадающего конденсатора производится напряжением источника питания, т.е.  $E_c = U_{п}$ , то напряжение на нагрузке  $U_H$  не зависит от изменения  $U_y$ :

$$U_H = (R1 C1 / T) U_y. \quad (5)$$

Если ИСН работает автономно, напряжение на управляющем входе компаратора равно

$$U_y = k_1 (U_{оп} - k_{д1} U_H), \quad (6)$$

где  $k_1$  – коэффициент усиления УПТ;  $k_{д1}$  – коэффициент передачи делителя выходного напряжения;  $U_{оп}$  – напряжение опорного источника стабилизатора.

Подставляя (6) в соотношение (5), получаем формулу для расчёта выходного напряжения автономного ИСН:

$$U_{но} = \frac{k_1 U_{оп}}{k_{д1} k_1 + T / R1 C1}. \quad (7)$$

Из (7) может быть получено выражение для расчёта значения  $k_{д1}$ , которое необходимо установить при настройке ИСН для получения на его выходе напряжения  $U_{но}$ :

$$k_{д1} = U_{оп} / U_{но} - T / R1 C1 k_1.$$

Как упоминалось выше, при работе ИСН в составе ИВЭП управляющее напряжение на входе компаратора складывается из двух составляющих – напряжения на выходе УПТ  $U_1$ , определяемого выражением (6), и напряжения на выходе УОСТ – при всех исправных каналах  $U_2$  и при выходе из строя одного или нескольких каналов  $U_2'$ :

$$U_y = U_1 + U_2; \quad (8)$$

$$U_y' = U_1 + U_2'; \quad (9)$$

$$U_2 = k_{д2} k_2 R_{дт} \sum_{j=1}^n I_j - k_3 R_{дт} \frac{I_k}{k=1,2,\dots,n} = k_{д2} k_2 R_{дт} I_H - k_3 R_{дт} \frac{I_k}{k=1,2,\dots,n}; \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n I_j = I_H / n; \quad (11)$$

$$U_2' = k_{д2} k_2 R_{дт} \sum_{j=1}^{n-m} I_j' - k_3 R_{дт} \frac{I_k'}{k=1,2,\dots,n-m} = k_{д2} k_2 R_{дт} I_H - k_3 R_{дт} \frac{I_k'}{k=1,2,\dots,n-m}; \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^{n-m} I_j' = I_H / (n-m), \quad (13)$$

где  $k_2, k_3$  – коэффициенты усиления УОСТ по неинвертирующему и инвертирующему входам;  $k_{д2}$  – коэффициент передачи делителя напряжения выравнивающего устройства;

$R_{дт} = R13$  – сопротивление резисторного датчика тока;  $n$  – число параллельно включенных ИСН в системе электропитания;  $m$  – число неисправных каналов в системе;  $I_n$  – суммарный ток нагрузки СВЭП;  $I_j, I_k$  и  $I'_j, I'_k$  – токи нагрузки  $j$ -го и  $k$ -го ИСН при всех исправных каналах и при выходе из строя одного или  $m$  каналов.

После подстановки (6), (8) и (9) в выражение (5) и необходимых преобразований получим формулы для расчёта выходного напряжения СВЭП:

при всех исправных каналах:

$$U_n = \frac{k_1 U_{оп} + U_2}{k_{д1} k_1 + T / R1C1}; \quad (14)$$

при выходе из строя одного или  $m$  каналов:

$$U'_n = \frac{k_1 U_{оп} + U'_2}{k_{д1} k_1 + T / R1C1}. \quad (15)$$

Используя выражения (10) и (11) и приравняв  $U_2$  к нулю, найдём соотношение для расчёта необходимого значения коэффициента  $k_{д2}$  для обеспечения равенства токов нагрузки всех каналов при исправной СВЭП. После преобразований получим:

$$k_{д2} = k_3 / k_2 n; \quad (16)$$

$$I_j = I_k = I_n / n. \quad (17)$$

Это означает, что при всех исправных параллельно работающих каналах и их правильной настройке ток нагрузки между ними распределяется равномерно.

Рассмотрим распределение токов в системе при выходе из строя одного или нескольких каналов. Анализ выражения (15) показывает, что выходное напряжение СВЭП  $U'_n$ , формируемое разными каналами, имеет одинаковое значение. Учитывая принятые допущения об идентичности параметров и элементов ИСН, входящих в СВЭП, можно сделать вывод, что  $U'_2$  для всех каналов имеет одинаковое значение, т.е.  $U'_{2j} = U'_{2k}$ . Следовательно, и при отказе  $m$  каналов ток нагрузки СВЭП распределяется равномерно между оставшимися исправными каналами:

$$I'_j = I'_k = I_n / (n - m). \quad (18)$$

Оценку изменения выходного напряжения СВЭП при выходе из строя одного или нескольких каналов проведём на конкретных примерах.

## ПРИМЕРЫ РАСЧЁТА

**Исходные данные:**  $U_{но} = 12,00$  В;  $I_{нmax} = 8$  А;  $I_{нраб} = 6$  А;  $n = 4$ ;  $U_{п} = 19...25$  В;  $U_{оп} = 8,5$  В;  $T = 2 \times 10^{-4}$  с;  $R1 = 10^5$  Ом;  $C1 = 2 \times 10^{-8}$  Ф;  $T/R1C1 = 0,1$ .

**Выбираем:**  $k1 = 200$ ;  $k2 = 3$ ;  $R_{дт} = 0,2$  Ом.

1. Для получения заданного значения  $U_n = 12,00$  В по формуле (7) рассчитываем необходимое значение  $k_{д1} = 8,5/12 - 0,1/200 = 0,708$ ;

2. По формуле (16) находим  $k_{д2} = 10/3 \times 4 = 0,833$ ;

3. По формулам (13), (12) находим ток нагрузки исправных каналов и напряжение на выходе УОСТ при отказе одного или двух каналов.

При  $n = 4, m = 1$

$$I'_j = 6 / 3 = 2 \text{ А};$$

$$U'_2 = 0,833 \times 3 \times 0,2 \times 6 - 10 \times 0,2 \times 2 = -1 \text{ В};$$

при  $n = 4, m = 2$

$$I''_j = 6 / 2 = 3 \text{ А};$$

$$U''_2 = 0,833 \times 3 \times 0,2 \times 6 - 10 \times 0,2 \times 2 = -3 \text{ В}.$$

4. По формуле (15) находим выходное напряжение СВЭП при отказе одного и двух каналов.

При  $n = 4, m = 1$

$$U'_n = \frac{200 \times 8,5 - 1}{0,708 \times 200 + 0,1} = 11,99 \text{ В};$$

$$\Delta U'_n = U_{но} - U'_n = 12,00 - 11,99 = 0,003 \text{ В}, \text{ или } 0,003\%;$$

при  $n = 4, m = 2$

$$U''_n = \frac{200 \times 8,5 - 3}{0,708 \times 200 + 0,1} = 11,97 \text{ В};$$

$$\Delta U_{н2} = U_{но} - U''_n = 12,00 - 11,97 = 0,03 \text{ В} \text{ или } 0,25\%.$$

Приведённый расчёт показывает, что при отказе даже двух каналов выходное напряжение СВЭП уменьшается не более чем на 0,25%.

## СИСТЕМА ВТОРИЧНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ТОКА НАГРУЗКИ КАЖДОГО КАНАЛА

Как показано в [6], параллельная работа стабилизирующих ИВЭП и распределение тока нагрузки между ними возможны без дополнительных выравнивающих устройств и без дополнительных связей между ними. Это обеспечивается электрической схемой стабилизирующих

источников питания, входящих в систему электропитания, и определённым алгоритмом их совместной работы.

При небольшом токе нагрузки СВЭП все каналы работают в режиме стабилизации напряжения. При дальнейшем увеличении тока нагрузки источники питания поочередно переходят в режим стабилизации тока, а стабилизация выходного напряжения системы обеспечивается за счёт остальных каналов, по-прежнему работающих в режиме стабилизации напряжения.

При перегрузке системы по току все стабилизирующие источники переходят в режим стабилизации тока и через время, определяемое конденсатором временной задержки, предусмотренным в каждом источнике, ключевые регулирующие элементы всех ИВЭП закрываются, схема «опрокидывается», и выходное напряжение и ток нагрузки системы становятся равными нулю.

Структурная схема СВЭП приведена на рисунке 3. В неё входят  $N$  стабилизирующих ИВЭП, работающих параллельно на общую нагрузку. Их питание осуществляется от одного или нескольких первичных источников питания.

Стабилизирующие ИВЭП могут быть любого типа и выполнены по любым схемам. Это могут быть преобразователи напряжения, импульсные или непрерывные стабилизаторы напряжения. Однако обязательным условием их применения является работа аналоговой части схемы управления по приведённому алгоритму.

Функциональная схема стабилизирующего ИВЭП указанного типа приведена на рисунке 4. В него входят силовой ключевой регулирующий узел (КРУ), включенный между входными и выходными выводами ИВЭП; резисторный датчик тока нагрузки (ДТ), включенный в плюсовую шину; ШИМ; задающий генератор (ЗГ); схема управления и защиты (СУЗ); выходной конденсатор  $C_{вых}$  и дополнительный источник питания (ДИП).

Первый вход СУЗ подключен к выходным выводам ИВЭП, второй вход – к ДТ, а выход соединён с управляющим входом ШИМ. Синхронизирующий вход ШИМ подключен к выходу ЗГ, а выход ШИМ связан

с управляющим входом КРУ. Питание СУЗ и других узлов управления ИВЭП осуществляется от ДИП. КРУ, ШИМ и ЗГ могут быть выполнены по любым схемам.

Развёрнутая схема управления и защиты приведена на рисунке 5. Она состоит из дифференциального усилителя постоянного тока (УПТ), источника опорного напряжения (ИОН), резисторных делителей напряжения (ДН) и схемы защиты от перегрузок по току и коротких замыканий (СЗТ).

Неинвертирующий вход УПТ DA2 подключен к средней точке первого ДН R14, включенного между положительным выводом ИОН на стабилитроне VD3 и общей шиной ИВЭП; инвертирующий вход DA2 и отрицательный вывод ИОН подключены к плюсовому выводу ИВЭП. Выход DA2 через резистор R6 подключен к управляющему входу ШИМ. Между инвертирующим входом DA2 и его выходом включены резистор обратной связи R11 и корректирующий конденсатор C2.

Схема защиты по току (СЗТ) собрана на ОУ DA1, инвертирующий вход которого через резистор R3 подключен к ДТ (резистору R4), а через разделительный диод VD2 – к средней точке времязадающей цепи R8C1. Вспомогательный делитель напряжения R9R10 включен между положительным выводом ИОН на стабилитроне VD3 и общей шиной ИВЭП. Неинвертирующий вход DA1 соединён со средней точкой переменного резистора R7, подключенного к выводам стабилитрона VD3. Этот резистор обеспечивает опорное напряжение в схеме защиты и служит для установки её тока срабатывания. Выход DA1 через шунтирующий диод VD1 также подключен к управляющему входу ШИМ. Диод VD1 осуществляет блокирование сигнала, поступающего на управляющий вход ШИМ с выхода УПТ при перегрузке ИВЭП по току.

Описанный ИВЭП в автономном режиме работает следующим образом. Выходное напряжение  $U_H$  поступает на вход схемы управления, суммируется с напряжением ИОН и подаётся на ДН1. Часть этого напряжения с нижнего плеча ДН – переменного резистора R14 – подаётся на неинвертирующий вход DA2, осуществляющий его сравнение с опорным напряжением стабилитрона VD3. Усилен-

ный сигнал рассогласования с выхода УПТ подаётся на управляющий вход ШИМ, на второй вход которого поступают синхронизирующие импульсы с выхода ЗГ.

С выхода ШИМ управляющие импульсы необходимой длительности поступают на управляющий вход КРУ, который обеспечивает выходное напряжение стабилизирующего ИВЭП на заданном уровне.

Если ток нагрузки ИВЭП меньше заданного максимального значения, напряжение на ДТ, т.е. на инвертирующем входе DA1, меньше опорного напряжения, подаваемого на его неинвертирующий вход. Спротивления резисторов R9 и R10 выбираются так, чтобы при номинальном выходном напряжении ИВЭП напряжение на аноде разделительного диода VD2 было ниже, чем напряжение на его катоде. Поэтому в этом режиме диод VD2 заперт и не влияет на состояние DA1. Вследствие этого DA1 находится в первом устойчивом состоянии, напряжение на его выходе имеет положительное значение относительно плюсового вывода ИВЭП, шунтирующий диод VD1 закрыт напряжением обратной полярности, и DA1 не влияет на работу стабилизатора. Конденсатор временной задержки C1 заряжен до определённого напряжения.

При увеличении тока нагрузки ИВЭП напряжение на ДТ увеличивает-

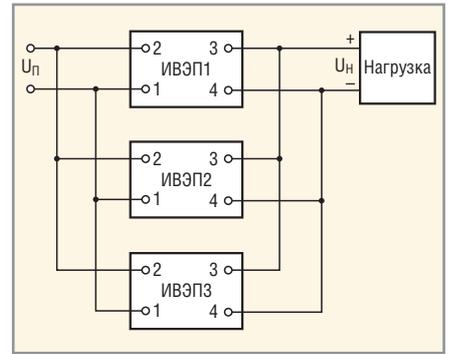


Рис. 3. Система вторичного электропитания с ограничением тока нагрузки каждого канала

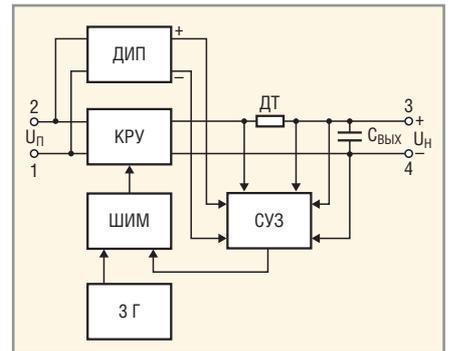
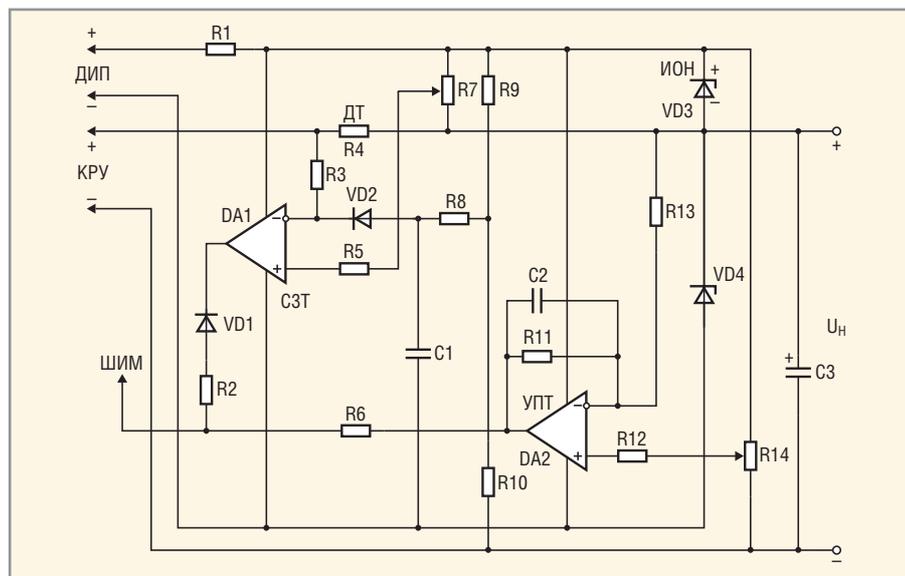


Рис. 4. Функциональная схема стабилизирующего ИВЭП

КРУ – ключевой регулирующий узел; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ЗГ – задающий генератор; СУЗ – схема управления и защиты; ДТ – резистивный датчик тока; ДИП – дополнительный источник питания

ся, напряжение на выходе DA1 понижается, и шунтирующий диод VD1 открывается. Результирующее напряжение на управляющем входе ШИМ по-



**Рис. 5. Схема управления и защиты стабилизирующего ИВЭП**

УПТ – усилитель постоянного тока; СЗТ – схема защиты по току; ИОН – источник опорного напряжения; ДТ – резистивный датчик тока

нижается, ширина импульсов на выходе ШИМ и на управляющем входе КРУ соответствующим образом изменяется, и при определённом токе нагрузки стабилизирующий ИВЭП переходит в режим стабилизации тока. Если источник питания при этом работает автономно, его выходное напряжение снижается.

При работе  $N$  стабилизирующих ИВЭП постоянного тока параллельно на общую нагрузку выходное напряжение системы электропитания и, следовательно, выходное напряжение одного или нескольких источников питания, работающих в режиме стабилизации тока, поддерживается на номинальном уровне за счёт других стабилизирующих ИВЭП. При переходе всех источников питания в режим стабилизации тока выходное напряжение системы электропитания  $U_n$  понижается. При этом напряжение на вспомогательном делителе R9R10 и в его средней точке, т.е. на цепочке, состоящей из разделительного диода VD2 и резистора R8, относительно плюсового вывода ИВЭП повышается, конденсатор C1 начинает заряжаться, напряжение на аноде VD2 повышается, и он открывается. Напряжение на инвертирующем входе DA1 повышается, тогда как напряжение на его неинвертирующем входе остаётся постоянным. Вследствие этого DA1 через время, определяемое времязадающей RC-цепочкой, переходит во второе устойчивое состояние, при котором напряжение на его выходе имеет минимальное отрица-

тельное значение; шунтирующий диод VD1 открывается, напряжение на управляющем входе ШИМ понижается, и ширина управляющих импульсов на его выходе уменьшается; КРУ запирается, выходное напряжение ИВЭП уменьшается, и схема «опрокидывается».

В этом режиме напряжение на инвертирующем входе ОУ DA1 выше, чем напряжение на его неинвертирующем входе, и он находится во втором устойчивом состоянии, при котором напряжение на его выходе минимально и отрицательно по отношению к напряжению на плюсовом выводе ИВЭП. КРУ полностью закрыт, выходное напряжение и ток нагрузки ИВЭП равны нулю.

Конденсатор временной задержки C1 служит также для предотвращения «опрокидывания» схемы при включении ИВЭП и его кратковременных перегрузках по току.

Описанный алгоритм работы каждого стабилизирующего ИВЭП постоянного тока обеспечивает следующий алгоритм работы СВЭП.

При токе нагрузки системы, меньшем заданного максимального значения любого ИВЭП, этот ток распределяется произвольно между всеми источниками питания, которые работают в режиме стабилизации напряжения. В частном случае весь ток нагрузки может обеспечиваться одним стабилизирующим ИВЭП.

При увеличении тока нагрузки наиболее нагруженного ИВЭП выше заданного максимального значения он

переходит в режим стабилизации тока, а остальные источники питания продолжают работать в режиме стабилизации напряжения. При дальнейшем увеличении тока нагрузки следующий ИВЭП переходит в режим стабилизации тока, а остальные работают в режиме стабилизации напряжения, и т.д.

При токе нагрузки выше предельно допустимого тока всей системы, все ИВЭП переходят в режим стабилизации тока, выходное напряжение системы понижается, и все стабилизирующие ИВЭП «опрокидываются». Выходное напряжение и ток нагрузки СВЭП становятся равными нулю. Для возврата системы в исходное рабочее состояние необходимо отключить все ИВЭП от питающей сети, найти и устранить неисправность, а затем повторно включить их.

При выборе числа ИВЭП, входящих в систему электропитания, необходимо учитывать, что их максимальный ток нагрузки должен быть меньше, чем суммарный ток срабатывания защиты всех каналов, для того чтобы при эксплуатации системы в любой момент времени хотя бы один канал работал в режиме стабилизации напряжения. Для обеспечения «горячего» резерва общее число параллельно работающих каналов должно быть увеличено. Предельно допустимый ток нагрузки СВЭП равен сумме токов срабатывания защиты всех параллельно включенных ИВЭП.

Неравномерное в общем случае распределение тока нагрузки СВЭП между параллельно работающими каналами, обусловленное различием их внутреннего сопротивления, можно уменьшить включением последовательно с ключевым регулирующим элементом ИВЭП позистора соответствующего номинала и мощности. В этом случае при работе системы происходит больший нагрев элементов и увеличение сопротивления наиболее нагруженного источника питания и, следовательно, уменьшение его тока нагрузки. Как следствие, выравнивается ток между каналами.

Кроме указанных на рисунке 4 узлов и элементов, на входе каждого ИВЭП должно быть предусмотрено коммутирующее устройство (контактор или электромагнитное реле), осуществляющее его подключение и отключение от питающей сети в штатном и аварийном режимах, а также устройство за-

щиты от перегрузки по току при отказе силовых ключей.

Наличие коммутатора в каждом ИВЭП позволяет производить поочерёдное безаварийное подключение и отключение источников и избегать возникающих при этом пусковых сверхтоков, что важно при ограниченной мощности первичного источника питания. Отметим, что при выходе из строя одного ИВЭП и отключении его от питающей сети ток нагрузки системы автоматически распределяется между исправными каналами. При обеспечении поочерёдного включения и отключения каналов и наличии «горячего» резерва надёжность СВЭП существенно повышается.

После изготовления комплекта ИВЭП необходимо выполнить их индивидуальную проверку и настройку, установить номинальное выходное напряжение и ток срабатывания защиты. После сборки и включения всей системы электропитания распределение тока нагрузки между параллельно работающими каналами может быть скорректировано делителями выходного на-

пряжения источников питания при максимальном эксплуатационном токе нагрузки системы.

Описанное техническое решение было проверено экспериментально на системе электропитания, состоящей из четырёх параллельно соединённых ИВЭП, каждый из которых имеет следующие технические характеристики:

- номинальное выходное напряжение 28 В;
- максимальный ток нагрузки 20 А;
- нестабильность выходного напряжения не более  $\pm 0,5\%$ ;
- пульсации выходного напряжения (размах) не более 50 мВ;
- напряжение питающей сети ( $200 \pm 10$ ) В;
- частота питающей сети ( $400 \pm 20$ ) Гц;
- диапазон изменения тока нагрузки системы 10...60 А.

В результате испытаний было установлено, что СВЭП работает в полном соответствии с описанным алгоритмом и обеспечивает необходимые параметры стабилизированного напряжения во всём указанном диапазоне изменения тока нагрузки.

Подобная система электропитания успешно эксплуатируется в производстве и работает безотказно в течение 20 лет.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шуваев Ю.Н., Кадацкий А.Ф. Схемы управления многофазными импульсными стабилизаторами и преобразователями напряжения. Сб. ЭТВА. Радио и связь. 1984. Вып. 15. С. 83–89.
2. Поликарпов А.Г., Сергиенко Е.Ф. Об одном способе параллельного включения ключевых стабилизаторов напряжения. Сб. ЭТВА. Радио и связь. 1986. Вып. 17. С. 127–131.
3. Мелешкин В., Шупаева С. Параллельное соединение преобразователей постоянного тока. Современная электроника. 2010. № 7.
4. Шуваев Ю.Н. Стабилизированный источник питания. Авт. свид. № 1291951, G 05 F 1/59. Б.И. 1987. № 7.
5. Шуваев Ю.Н., Соловей Б.З. Компенсационно-параметрический импульсный стабилизатор напряжения. Сб. ЭТВА. Радио и связь. 1985. Вып. 16. С. 51–55.
6. Шуваев Ю.Н. Система вторичного электропитания. Авт. свид. № 1576898, G 05 F 1/59, Б.И. 1990. № 25.

