

УДК 621.314

А.С. Асочаков, А.А. Дружинин, И.М. Журавлев, А.А. Лопатин

## Алгоритмы управления многоканальным шунтовым стабилизатором напряжения с цифровой системой автоматического управления

Исследована работа многоканального шунтового преобразователя энергии солнечной батареи с дискретным многозонным регулированием в режиме стабилизации выходного напряжения. Рассмотрены алгоритмы смены зоны регулирования «реле» и «кольцо» для шунтового стабилизатора напряжения. Разработан макетный образец многоканального преобразователя, проведено экспериментальное исследование и анализ переходных процессов при работе шунтового стабилизатора при постоянной нагрузке, а также ее ступенчатом изменении для алгоритмов «реле» и «кольцо».

**Ключевые слова:** шунтовой импульсный стабилизатор, цифровая система управления, S3R, солнечная батарея.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-84-90

Основным источником первичного электропитания для энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) космического аппарата (КА) являются панели солнечной батареи (СБ). Поэтому, вне зависимости от выбранной структуры системы электропитания (СЭП) КА, регулятор мощности СБ является важнейшим узлом ЭПА. Несмотря на большое количество вариантов схемотехнических реализаций ЭПА, наибольшее распространение в СЭП КА на геостационарных орбитах для преобразования энергии СБ получили шунтовые импульсные стабилизаторы напряжения (ШС), что обусловлено минимальным количеством компонентов силовой части [1–12].

Совокупность высоких требований, предъявляемых к ШС СБ в части обеспечения надежности, точности стабилизации и быстродействию системы автоматического регулирования (САР), а также требований к минимизации тепловыделения силовой части привела к использованию многоканальной модуляции потока энергии [3–7, 13–15]. Реализация указанной модуляции происходит за счет разбиения регулятора мощности СБ на большое количество маломощных каналов ШС, коммутируемых на высокой частоте.

В современных работах, посвященных разработке ШС СБ для ЭПА КА, наибольшее распространение получил дискретный многозонный метод регулирования, в зарубежной литературе *sequence switching shunt regulator (S3R)*, подробно описанный как в отечественных, так и в зарубежных источниках [1–10].

Основными преимуществами S3R являются отсутствие сложных алгоритмов коммутации, простота масштабирования управления под произвольное количество каналов ШС, низкие требования к необходимому количеству датчиков и обратной связи по напряжению [5–9].

В настоящее время в ЭПА КА применяются аналоговые системы управления, внедрение цифровой системы регулирования имеет ряд преимуществ перед существующей системой на системном уровне построения СЭП КА. Так, цифровые системы регу-

лирования позволяют достичь стабильных характеристик регуляторов независимо от внешних воздействующих факторов в течение всего срока активного существования, создавать оптимальные с точки зрения переходных процессов законы регулирования, адаптировать законы управления под изменения характеристик первичных источников энергии и перестраивать регулятор при смене работающего преобразователя в составе СЭП при переходе КА с солнечного на теневой участок орбиты и обратно.

ШС, являясь неотъемлемой частью современной СЭП КА, также требует внедрения цифровой системы регулирования. Несмотря на то, что данному направлению посвящен ряд работ [1–10, 16, 17], практической реализации и особенностям работы многоканального ШС с цифровым управлением уделяется недостаточно внимания. В данной работе поставлена цель исследования алгоритмов реализации многозонного регулирования в многоканальном ШС по критерию качества переходных процессов при ступенчатом изменении тока нагрузки.

### Многоканальный шунтовой импульсный преобразователь энергии солнечной батареи

Многоканальный шунтовой преобразователь энергии солнечной батареи (рис. 1) работает в режиме стабилизация выходного напряжения. В данном преобразователе применен принцип управления по отклонению, реализованный с помощью дискретного многозонного способа регулирования напряжения, которое заключается в разбиении всего диапазона регулирования на зоны. Переход из одной зоны в другую реализуется изменением количества каналов секций СБ, подключенных к нагрузке, согласно сигналу регулятора контура напряжения (РКН), выполненного в виде ПИД-регулятора. Сигнал ошибки стабилизации обрабатывается РКН, выходной сигнал которого поступает на блок УПК, формирующий в виде кода набор сигналов управления для каналов ШС.

Схема канала ШС приведена на рис. 2, панель СБ представлена эквивалентной схемой в виде источника постоянного тока  $J$  величиной, равной току

короткого замыкания, и конденсатором  $C_{bs}$ , имитирующим паразитную выходную емкость солнечной панели. Транзистор VT работает в ключевом режиме, обеспечивая импульсное шунтирование СБ. Учитывая, что на входе источник тока дроссель  $L$  выполняет роль не накопительного, а токоограничивающего элемента схемы, снижая амплитуду тока разряда емкости СБ в момент коммутации транзистора VT.

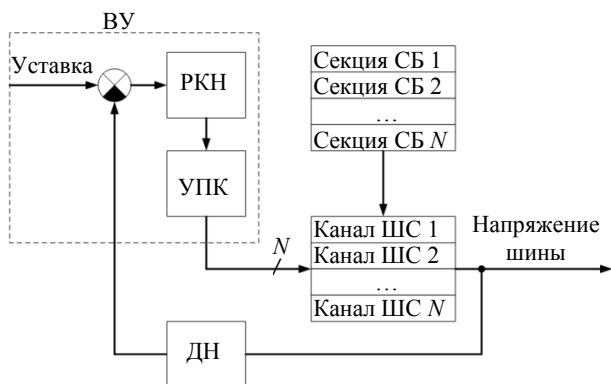


Рис. 1. Функциональная схема системы стабилизации выходного напряжения: ВУ – вычислительное устройство; РКН – регулятор контура напряжения; УПК – устройство подключения каналов; ДН – датчик напряжения

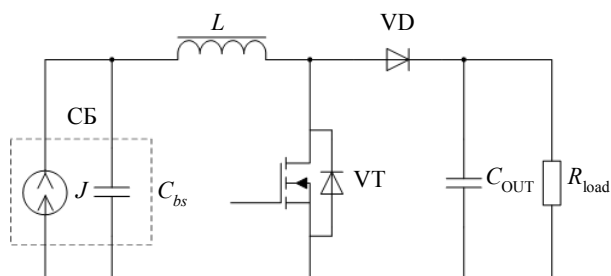


Рис. 2. Схема канала импульсного шунтового преобразователя энергии солнечной батареи

При разомкнутом транзисторе VT происходит передача энергии СБ в нагрузку и одновременный заряд её паразитной емкости, при этом ток через дроссель равен току секции СБ. Замыкание транзистора приводит к разряду паразитной емкости СБ, поэтому формируется импульс тока транзистора, равный сумме тока СБ и тока разряда паразитной емкости СБ:

$$I_{VT} = I_{СБ} + I_{СБ, C}$$

где  $I_{VT}$  – ток через транзистор,  $I_{СБ}$  – ток секции солнечной батареи  $J$ ,  $I_{СБ, C}$  – ток разряда паразитной емкости солнечной батареи  $C_{bs}$ .

Индуктивность дросселя  $L$  выбирается из условия ограничения амплитуды импульса тока при замыкании транзистора VT, при этом индуктивность дросселя может быть значительной, что приводит к росту его статических потерь.

Наличие процесса разряда емкости СБ при замыкании транзистора ужесточает требования не только к силовой части преобразователя, но и к системе регулирования, поскольку ограничивает минимальную длительность открытого состояния

транзистора. В случае размыкания транзисторного ключа до момента, когда разряд емкости СБ не закончился, происходит передача тока в выходной фильтр, в виде высокоамплитудного импульса, что создаст неприемлемую пульсацию напряжения на выходной стабилизируемой шине и увеличит коммутационные потери транзистора.

### Цифровая система стабилизации выходного напряжения. Алгоритмы реализации многозонного регулирования ШС

В сравнении с аналоговой реализацией системы управления цифровая реализация дискретных многозонных методов регулирования имеет ряд преимуществ:

- простота реализации ограничения минимальной длительности замкнутого состояния транзистора;
- возможность изменения количества каналов ШС без изменения значения  $dF$ , что позволяет сохранять динамические характеристики системы.

Алгоритм многозонного регулирования позволяет однозначно сопоставить любому выходному сигналу регулятора контура напряжения единственной зоны регулирования, формируемой комбинацией замкнутых и разомкнутых каналов ШС. Основными переменными для алгоритма подключения каналов являются период обновления сигнала регулятора  $T_{упр}$  и безразмерный коэффициент  $dF$ , численно равный диапазону работы одного канала ШС (единичная зона), при достижении верхней границы которого происходит замыкание шунтирующего транзистора и переход в следующую зону регулирования (рис. 3). При достижении нижней границы диапазона  $dF$  происходит размыкание шунтирующего транзистора и переход в предыдущую зону регулирования. Указанные переменные позволяют однозначно связать выходное значение регулятора системы автоматического регулирования с числом подключенных каналов ШС (и номером зоны управления) и реализовать систему стабилизации напряжения (см. рис. 1).

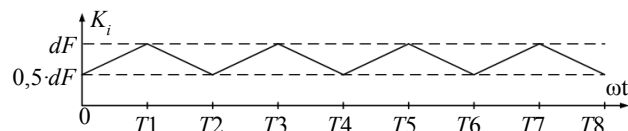


Рис. 3. Диаграмма работы преобразователя при коммутации одного канала

Существует физическое ограничение минимального времени обновления  $T_{упр}$ , связанное с превышением допустимого уровня тепловыделения канала ШС, а также качеством стабилизации выходного напряжения.

Недостатком рассматриваемого шунтового стабилизатора является принципиальное ограничение, накладываемое силовой частью преобразователя на максимальную частоту работы преобразователя  $F_{упр}$ , что приводит к снижению скорости реакции системы управления на изменение выходного напряжения из-за увеличения задержки регулирования на время длительностью как минимум в один

период обновления сигнала управления и, вследствие этого, к ухудшению качества переходных процессов.

Наиболее простым алгоритмом, повторяющим логику функционирования «аналоговой реализации» алгоритма S3R, является алгоритм «реле» (рис. 4, а). Диапазон работы регулятора контура напряжения составляет  $0 \dots N \cdot dF$  дискретных значений и разбит на  $N$  зон регулирования по числу задействованных каналов ШС. На каждый канал ШС приходится  $dF$  значений регулятора контура напряжения. С ростом тока нагрузки значение регулятора  $K_i$  уменьшается и происходит последовательный переход из зоны, в которой все каналы ШС замкнуты (выходное значение регулятора контура напряжения равно  $N \cdot dF$ ), в зону, в которой все каналы ШС разомкнуты (выходное значение регулятора контура напряжения равно 0). Каждое значение  $dF$  однозначно задает количество замкнутых  $M_i$  и разомкнутых каналов ШС. Порядок коммутации каналов ШС не меняется.

Пример реализации алгоритма «реле» для четырех каналов ШС приведен в табл. 1. Как видно из табл. 1, минимальная длительность между коммутациями канала ШС № 1 составляет не менее одного периода обновления сигнала регулятора.

Таблица 1  
Переключение каналов для алгоритма «реле»  
при коммутации одного канала ШС

Момент времени	Канал ШС № 1	Канал ШС № 2	Канал ШС № 3	Канал ШС № 4
0	р	з	з	з
$T_1$	з	з	з	з
$T_2$	р	з	з	з
$T_3$	з	з	з	з
$T_4$	р	з	з	з
$T_5$	з	з	з	з
$T_6$	р	з	з	з
$T_7$	з	з	з	з
$T_8$	р	з	з	з

Примечание: р – разомкнутый канал ШС;  
з – замкнутый канал ШС.

Для увеличения скорости реакции системы управления на изменение выходного напряжения, при увеличении  $F_{упр}$ , был разработан алгоритм подключения каналов ШС типа «кольцо» (рис. 4, б). Отличием алгоритма «кольцо» является то, что для каждого значения регулятора алгоритм подключения каналов определяет фиксированную комбинацию, количество замкнутых и разомкнутых каналов ШС. Комбинация же замкнутых/разомкнутых каналов определяется в момент изменения их количества.

Как видно из рис. 4, б, до момента первоначального изменения номера головного канала алгоритм «реле» и алгоритм «кольцо» идентичны, т.е. первый канал ШС коммутирует при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = dF$  (первая зона регулирования), второй канал ШС коммутирует при выходном значении регулято-

ра контура напряжения, равном  $K_i = 2 \cdot dF$  (вторая зона регулирования), и т.д.

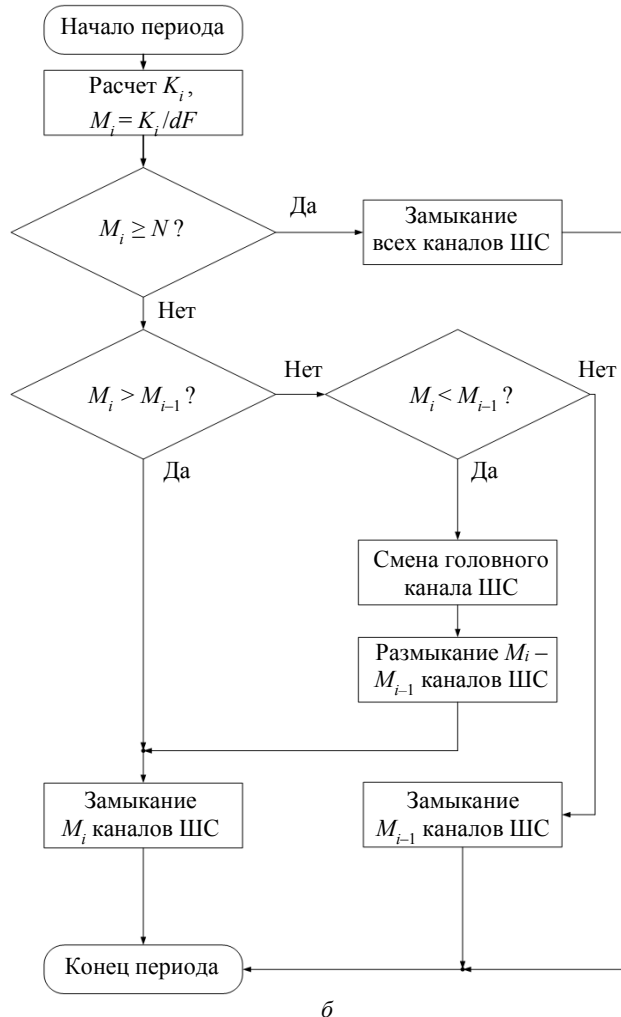
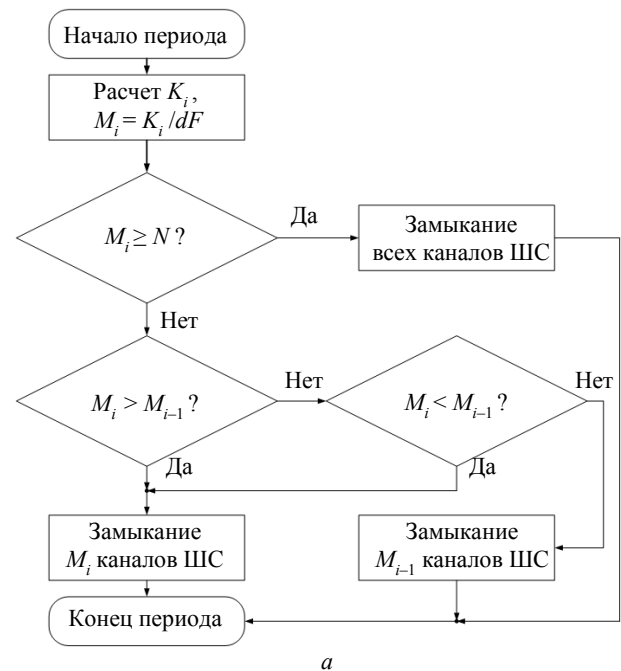


Рис. 4. Алгоритм смены зоны регулирования «реле» – а;  
б – алгоритм смены зоны регулирования «кольцо»;  
 $i$  – текущий период работы

После изменения номера головного канала (канал, который переходит в замкнутое состояние в первой зоне регулирования) с первого на второй, происходит изменение порядка коммутации каналов ШС. Теперь первым замыкается второй канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = dF$  (первая зона регулирования), вторым коммутирует третий канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 2 \cdot dF$  (вторая зона регулирования), третьим коммутирует четвертый канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 3 \cdot dF$  (третья зона регулирования), и т.д.

При повторном изменении порядкового номера, головным каналом становится третий канал. Соответственно, первым замыкается третий канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = dF$  (первая зона регулирования), вторым коммутирует четвертый канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 2 \cdot dF$  (вторая зона регулирования), третьим коммутирует пятый канал ШС при выходном значении регулятора контура напряжения, равном  $K_i = 3 \cdot dF$  (третья зона регулирования), и т.д.

Пример реализации алгоритма «кольцо» для четырех каналов ШС при коммутации одного канала ШС приведен в табл. 2.

Таблица 2  
Переключение каналов для алгоритма «кольцо» при коммутации одного канала ШС

Момент времени	Канал ШС № 1	Канал ШС № 2	Канал ШС № 3	Канал ШС № 4
0	р	з	з	з
T1	з	з	з	з
T2	з	р	з	з
T3	з	з	з	з
T4	з	з	р	з
T5	з	з	з	з
T6	з	з	з	р
T7	з	з	з	з
T8	р	з	з	з

Примечание: р – разомкнутый канал ШС;  
з – замкнутый канал ШС.

Как видно из табл. 2, коммутация одного и того же канала ШС происходит как минимум через  $2^{N-1}$  периода частоты работы силовой части. Преимуществом данного алгоритма является возможность повышения частоты работы преобразователя в  $2^{N-1}$  раза при сохранении тепловыделения элементов канала ШС на уровне алгоритма «реле» и амплитуды высокочастотных пульсаций на выходной шине на уровне ШС, работающего на основе алгоритма «реле».

**Результаты эксперимента**

В ходе исследования был разработан макетный образец многоканального преобразователя энергии СБ. Макетный образец включает в себя четыре канала ШС, работающих от четырех отдельных каналов имитатора СБ. В качестве силовых транзисторов применены IRFP4868, выходной диод MBR20100,

резистор SQP 27 Ом мощностью 10 Вт, дроссель индуктивностью 47 мкГн, выполненный на двойном магнитопроводе МП60 КП19х11х4,8. Схема рабочего места испытания макета приведена на рис. 5.

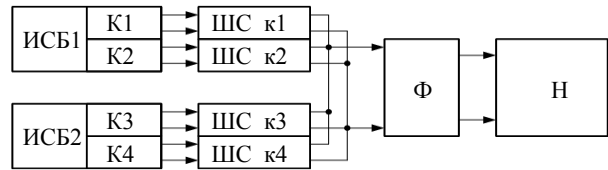
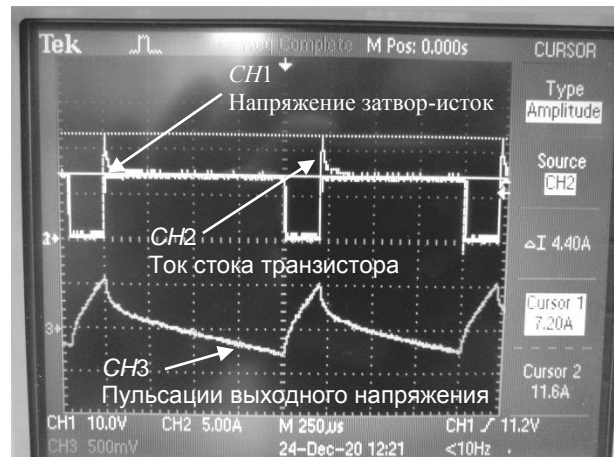


Рис. 5. Рабочее место испытаний многоканального преобразователя энергии СБ: ИСБ – имитатор солнечной батареи; Agilent E4360A с двумя модулями E4362A (120 В, 5 А); ШС\_к1, ... ШС\_к4 – каналы шунтового стабилизатора; Ф – выходной емкостной фильтр, 2100 мкФ; Н – электронная нагрузка N3300А

ИСБ были включены в режиме имитации экспоненциальной формы ВАХ. Задание ВАХ проводилось по четырем точкам со следующими значениями:

- напряжение холостого хода (ХХ) 110 В;
- напряжение в точке максимальной мощности (ММ) 104 В;
- ток КЗ, 5 А;
- ток в точке ММ 4,5 А.

Осциллограммы, демонстрирующие амплитуду импульса тока при коммутации транзистора VT с паразитной емкостью БС, приведены на рис. 6.



а



б

Рис. 6. Амплитуда импульса тока транзистора с паразитной емкостью БС, равной 400 нФ

Как видно на осциллограммах, приведенных на рис. 6, длительность импульса тока ограничена, после чего ток через транзистор становится равным величине тока короткого замыкания (КЗ) СБ. При размыкании транзисторного ключа до момента, когда разряд емкости СБ не закончился, происходит передача тока в выходной фильтр в виде высокоамплитудного импульса, что создаст неприемлемую пульсацию напряжения на выходной стабилизируемой шине. Экспериментально установлено (рис. 6, б), что для секции СБ с параметрами

- напряжение холостого хода (XX), 110 В;
- напряжение в точке максимальной мощности (ММ) 104 В;
- ток КЗ 7,4 А;
- ток в точке ММ 6,6 А.

и выходной паразитной емкостью равной 400 нФ, при индуктивности дросселя  $L$ , равной 44 мкГн, длительность импульса тока составляет не более 80 мкс. Из этого следует, что для исключения коммутации транзистора во время импульса тока, снижения коммутационных потерь и уменьшения амплитуды высокочастотных импульсов на выходной шине максимальная частота работы силовой части должна быть не более 6,25 кГц.

Таким образом, формируется ограничение на минимальную длительность открытого состояния транзистора для обеспечения требуемого качества стабилизации выходного напряжения и низкого тепловыделения.

Осциллограммы работы преобразователя в режиме стабилизации 100 В выходного напряжения при постоянном токе нагрузки 2 А, ступенчатом изменении тока нагрузки до 12 А и различных алгоритмах смены зон регулирования приведены на рис. 7, 8. Измерения были проведены с помощью встроенной функции «Cursors» осциллографа TPS2024B. Из осциллограмм, приведенных на рис. 7, видно, что длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности тока нагрузки составляет 5 мс, а размах пульсации выходного напряжения – 2,64 В.

Согласно табл. 2, применение алгоритма «кольцо» позволяет повысить частоту работы преобразователя в  $2^{N-1}$  раза, при сохранении тепловыделения элементов канала ШС на уровне алгоритма «реле». С учетом особенностей алгоритма работы «кольцо», а также количества каналов  $N = 4$  частота работы преобразователя была выбрана 20 кГц (эквивалент работы канала ШС с алгоритмом смены зон «реле» на частоте 5 кГц).

Из осциллограмм, приведенных на рис. 8, видно, что длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности тока нагрузки составила 1,2 мс, а размах пульсации выходного напряжения – до 1,16 В. Таким образом, применяя алгоритм «кольцо» при эквивалентной частоте работы преобразователя ШС, по сравнению с алгоритмом «реле», удалось улучшить характеристики переходного процесса более чем в два раза.

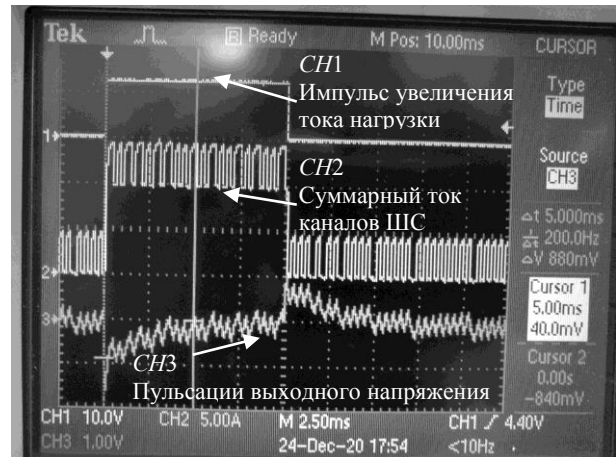


Рис. 7. Длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности нагрузки на 1 кВт и алгоритме смены зоны регулирования «реле» с частотой 5 кГц

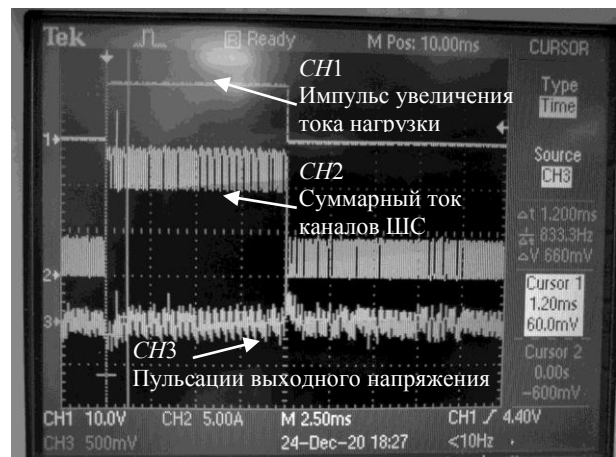


Рис. 8. Длительность переходного процесса при ступенчатом изменении мощности нагрузки на 1 кВт и алгоритме смены зоны регулирования «кольцо» с частотой 20 кГц

Характер переходных процессов при ступенчатом изменении мощности нагрузки независимо от алгоритма управления и частоты работы преобразователя сохраняет аperiодический вид.

#### Заключение

В ходе исследования была рассмотрена работа многоканального шунтового преобразователя энергии солнечной батареи, функционирующего в режиме стабилизации выходного напряжения. Был проанализирован алгоритм смены зоны регулирования S3R (алгоритм «реле»), выделены его преимущества и недостатки и предложен его модернизированный вариант – алгоритмы смены зоны регулирования «кольцо».

Как показали результаты экспериментального исследования, результатом внедрения алгоритма «кольцо» стало снижение амплитуды и времени перерегулирования переходного процесса более чем в 4 раза при уменьшении тепловыделения преобразователя ШС за счет снижения эквивалентной частоты работы.

Таким образом, применение алгоритма смены зоны регулирования «кольцо» позволяет снизить массу энергопреобразующей аппаратуры за счет

минимизации выходного фильтра и теплоотводящей конструкции.

#### Литература

1. O'Sullivan D. The sequential switching shunt regulator (S3R) / D. O'Sullivan, A.H. Weinberg // ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar. – 1977. – P. 123–131.
2. Sequential Switching Shunt Regulator for Satellite Power Control System / A.M. Kamel, Amged S. El-Wakeel, Usama R. Abou Zayed // IOSR-JEEE. – 2017. – Vol. 12. – P. 78–83.
3. Intelligent Sequential Switching Shunt Regulation for Satellite Solar Arrays / Ahmed M. Kamel, Usama R. Abou-Zayed, Amged S. El-Wakeel, Walid A. Wahballah // IEEE Aerospace Conference. – 2018. – P. 1–10.
4. Comparison of Shunt Regulators Based on DC–DC Boost Topologies / Denis A. Kurochkin, Tatiana E. Shults, Andrey V. Geist, Dmitri A. Shtein // 20th International Conference On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices. – 2019. – P. 586–590.
5. A new Sequential Switching Shunt Regulator – Digital Shunt Regulator (S3R–DSR) for Solar Array Regulators / A. Garrigos, J.A. Carrasco, J. M. Blanes, E. Sanchis-Kilders // IEEE ISIE. – 2006. – P. 1064–1069.
6. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Наука, 1979. – 304 с.
7. Кобзев А.В. Модуляционные источники питания РЭА / А.В. Кобзев, Г.Я. Михальченко, Н.М. Музыченко. – Томск: Радио и связь, 1990. – 336 с.
8. Carlos L. Salinas. A hybrid sequential switching shunt regulator (HS3R) for satellites // International Journal of Information and Electronics Engineering. – 2013. – Vol. 3, No. 5 – P. 453–456.
9. Gianninoto G. A new, single diode, sequential switching shunt regulator. Scorzafava, D. Carlan // 11th European Space Power Conference. – 2017. – P. 1–8.
10. Modeling of the Section Capacitance to Interface with a S3R / A. Fernández, J.R. González // 11th European Space Power Conference. – 2017. – P. 10–18.
11. Garrigos A. Influence of the parasitic solar array capacitance in the sequential switching shunt series regulator // 13-th IEEE mediterranean electrotechnical conference. – 2006. – P. 1198–1201.
12. Comparative Study of SiC Transistors for Active Current Limitation in S3R / David Marroqui, Jorge Borrell, Roberto Gutierrez, Jose Manuel Blanes, Ausias Garrigos, Enrique Maset // Elektronika Ir Elektrotehnika. – 2017. – Vol. 23, No. 5. – P. 54–60.
13. Mourra O. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft / O. Mourra, A. Fernandez, F. Tonicello // Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2010. – P. 1313–1319.
14. DC/DC Boost Converter with Additional Inductance for the Space Power Supply System / A.V. Geist, A.V. Sidorov, D.V. Korobkov, A.G. Volkov // 19th International Conference of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. – 2018. – P. 6403–6408.
15. Delepaut C. S3R stability margins and design guidelines // ESPC. – 2008. – P. 54–60.
16. Sanchis-Kilders E. A power conditioning unit for high power GEO satellites based on the sequential switching shunt series regulator / Esteban Sanchis-Kilders, José A. Carrasco, José M. Blanes // IEEE Mediterranean MELECON. – 2006. – P. 1186–1189.

17. Tepsa T. Adjustable Shunt Regulator Based Control Systems / Tauno Tepsa, Teuvo Suntio // IEEE Power Electronics Letters. – 2003. – Vol. 1, No. 4. – P. 93–96.

#### Асочаков Арсений Степанович

Инженер-конструктор 3-й кат. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7-960-969-96-48  
Эл. почта: arseniy.asochakov@yandex.ru

#### Дружинин Александр Александрович

Инженер-конструктор 3-й кат. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7-913-832-81-95  
Эл. почта: Alex-Druzh@mail.ru

#### Журавлев Иван Михайлович

Инженер-конструктор 2-й кат. АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7-908-021-37-24  
Эл. почта: iv\_zhuravlev@mail.ru

#### Лопатин Александр Александрович

Канд. техн. наук, нач. сектора разработки силовой бортовой аппаратуры АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнёва  
Ленина ул., 52, г. Железнодорожск, Красноярский край, Россия, 662972  
Тел.: +7 (391-9) 73-67-03  
Эл. почта: lopatin@iss-reshetnev.ru

Asochakov A.S., Druzhinin A.A.,  
Zhuravlyov I.M., Lopatin A.A.

#### Control Algorithms for Multichannel Shunt Voltage Converter with Digital Control System

The operation of multichannel shunt solar array converter with discrete zone voltage regulation was investigated. The «relay» and «ring» switch algorithms for shunt voltage converter of solar array energy are considered. The prototype of multichannel shunt voltage converter has been developed, and the analytical waveforms by dynamic work mode of shunt voltage converter have been obtained.

**Keywords:** shunt voltage converter, digital control system, S3R, solar array.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2021-24-2-84-90

#### References

1. O'Sullivan D., Weinberg A. H. The sequential switching shunt regulator (S3R). *ESTEC Spacecraft Power Conditioning Seminar*, 1977, pp. 123–131.
2. Kamel A.M., El-Wakeel Amged S., AbouZayed Usama R. Sequential Switching Shunt Regulator for Satellite Power Control System. *IOSR-JEEE*, 2017, vol. 12, pp. 78–83.
3. Kamel Ahmed M., AbouZayed Usama R., El-Wakeel Amged S., Wahballah Walid A. Intelligent Sequential Switch-

ing Shunt Regulation for Satellite Solar Arrays. *IEEE Aerospace Conference*, 2018, pp. 1–10.

4. Kurochkin Denis A., Shults Tatiana E., Geist Andrey V., Shtein Dmitri A. Comparison of Shunt Regulators Based on DC–DC Boost Topologies. *20th International Conference On Micro/Nanotechnologies And Electron Devices*, 2019, pp. 586–590.

5. Garrigos A., Carrascal J. A., Blanes J. M., Sanchis-Kilders E. A new Sequential Switching Shunt Regulator – Digital Shunt Regulator (S3R–DSR) for Solar Array Regulators. *IEEE ISIE*, 2006, pp. 1064–1069.

6. Kobzev A.V. *Mnogozonnaya impulsnaya modulyaciya. Teoriya i primeneniye v sistemah preobrazovaniya parametrov elektricheskoy energii*. [Multi-zone pulse modulation. Theory and practice application in system of parameters converter]. Novosibirsk, Science, 1979. 304 p. (In Russ.).

7. Kobzev A.V., G.Y. Mihalchenko, N.M. Muzychenko *Modulyacionnye istochniki pitaniya REA* [Modulation power supplies for REE]. Tomsk, Radio and communications, 1990. 336 p. (in Russ.)

8. Carlos L. Salinas. A hybrid sequential switching shunt regulator (HS3R) for satellites. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2013, vol. 3, no. 5, pp. 453–456.

9. Gianninoto G., Scorzafava E., Cariani D. A new, single diode, sequential switching shunt regulator. *11th European Space Power Conference*, 2017, pp. 1–8.

10. Fernández A., González J.R. Modeling of the Section Capacitance to Interface with a S3R. *11th European Space Power Conference*, 2017, pp. 10–18.

11. Garrigos A. Influence of the parasitic solar array capacitance in the sequential switching shunt series regulator. *13th IEEE mediterranean electrotechnical conference*, 2006, pp. 1198–1201.

12. Marroqui David, Borrell Jorge, Gutierrez Roberto, Blanes Jose Manuel, Garrigos Ausias, Maset Enrique. Comparative Study of SiC Transistors for Active Current Limitation in S3R. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 54–60.

13. Buck Boost Regulator (B2R) for spacecraft / O. Mourra, A. Fernandez, F. Tonicello // Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, pp. 1313–1319.

14. Geist A.V., Sidorov A.V., Korobkov D.V., Volkov A.G. DC/DC Boost Converter with Additional Inductance for the Space Power Supply System. *19th International*

*Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, 2018, pp. 6403–6408.

15. Delepaut C. S3R stability margins and design guidelines. *ESPC*, 2008, pp. 54–60

16. A power conditioning unit for high power GEO satellites based on the sequential switching shunt series regulator. *IEEE Mediterranean MELECON*, 2006, pp. 1186–1189.

17. Tepsa T., Suntio T. Adjustable Shunt Regulator Based Control Systems. *IEEE Power Electronics Letters*, 2003, vol. 1, no. 4, p. 93–96.

---

#### **Arseny S. Asochakov**

Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7-960-969-96-48  
Email: arseniy.asochakov@yandex.ru

#### **Aleksandr A. Druzhinin**

Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7-913-832-81-95  
Email: Alex-Druzh@mail.ru

#### **Ivan M. Zhuravlyov**

Design Engineer, JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7-908-021-37-24  
Email: iv\_zhuravlev@mail.ru

#### **Aleksandr A. Lopatin**

Doctor of Science in Engineering, Head of Design Section Power Supply and Conversion Equipment  
JSK Academician M.F. Reshetnev Information Satellite System  
52, Lenin st., 662972, Zheleznogorsk,  
Krasnoyarsk region, Russia  
Phone: +7 (391-9) 73-67-03  
Email: lopatin@iss-reshetnev.ru