

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМИТАТОРА БАТАРЕИ СОЛНЕЧНОЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Одной из особенностей имитаторов батареи солнечной, используемых в космической индустрии, являются их более высокие динамические характеристики в сравнении с имитаторами батарей солнечных, используемых в промышленности. В связи с этим несколько отличаются и подходы к проектированию как силовой части, так и системы управления. Представлен способ формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной, применяемого для испытания систем электропитания космических аппаратов. Суть предложенного способа заключается в представлении имитатора батареи солнечной как безынерционного источника тока благодаря подходу к построению силовой части с использованием обводного канала тока и системы управления, позволяющей синхронизировать его работу в зависимости от положения рабочей точки на вольт-амперной характеристике имитатора батареи солнечной. В статье описана структура силовой части и алгоритм работы системы управления, реализованные в среде Matlab/Simulink. Полученные результаты моделирования подтверждают эффективность предложенного способа формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной.

Ключевые слова: имитатор батареи солнечной, вольт-амперная характеристика, силовой модуль, топология, регулятор, стабилизация тока, ШИМ.

ВВЕДЕНИЕ

Перед отправкой космического аппарата (КА) в космос он должен пройти ряд испытаний, одним из которых является проверка системы электропитания (СЭП). Контрольно-испытательная аппаратура (КИП), осуществляющая проверку СЭП, состоит из ряда электротехнических комплексов: имитатора аккумуляторной батареи, имитатора батареи солнечной (ИБС), блока имитации нагрузки. Данные комплексы позволяют в полной мере осуществить наземную проверку СЭП КА. Задачей ИБС является имитация первичного источника тока – солнечной батареи (СБ) [1, 2].

К ИБС для СЭП КА предъявляются высокие требования к динамическим характеристикам, а именно возможности адекватно и с наименьшим временем запаздывания изменять значение тока и напряжения выхода соответственно изменению нагрузки. В связи с этим в качестве топологии силовой части, как правило, берется линейная топология [3, 4] построения силовых модулей или комбинированная [5, 6]. В системах управления данных ИБС в качестве способа формирования ВАХ приняты так называемый метод справочных таблиц, подробным образом описанный в литературе [7]. Недостаток такого подхода к построению ИБС заключается в низком КПД линейной топологии и относительно малой мощности ИБС. Значение мощности ограничивается конечным значением количества работающих параллельно линейных каналов тока. Увеличение данного количества каналов выше некоторого значения приводит к несогласованности между ними и, следовательно, потере устойчивости системы.

В качестве альтернативы описанному выше подходу существует подход к построению ИБС с использованием силовых модулей с импульсным принципом работы [8] и его дальнейшее развитие с использованием обводного канала тока в структуре ИБС.

МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

При воспроизведении характеристик СБ непосредственной задачей ИБС является формирование вольт-амперной характеристики (ВАХ) множества солнечных элементов (СЭ), составляющих СБ. На рис. 1 изображена типичная ВАХ СБ, которую должен формировать ИБС, а также нагрузочные характеристики. Условно ВАХ делится на три участка: участок тока, нелинейный участок и участок напряжения. Положение рабочей точки (А/В/С) ВАХ ИБС определяется нагрузкой ($R_1/R_2/R_3$).

В основе построения ИБС лежат аналитические модели солнечного элемента (СЭ). Эквивалентная схема СЭ одной из таких моделей, показанная на рис. 2, описывается уравнением (1).

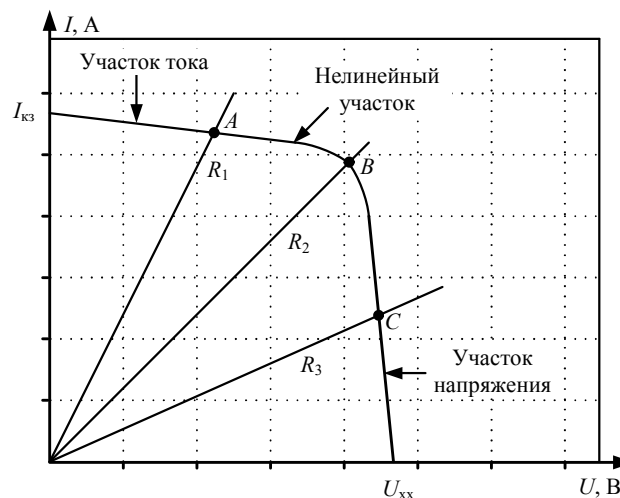


Рис. 1. ВАХ ИБС и нагрузочные характеристики

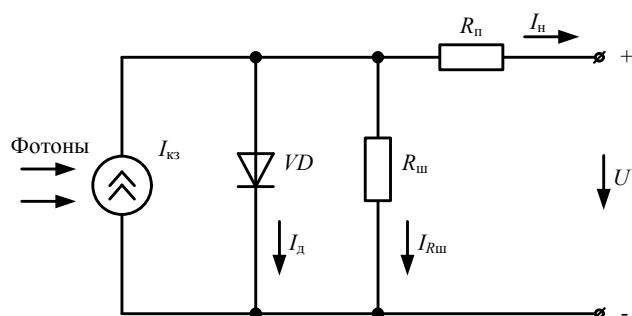


Рис. 2. Эквивалентная схема солнечного элемента

$$I_n = I_{kз} - I_s \left(e^{\frac{e(U + I_n R_n)}{A k T}} - 1 \right) - \frac{U + I_n R_n}{R_{ш}}, \quad (1)$$

где I_n – ток нагрузки солнечного элемента; $I_{kз}$ – фототок или ток короткого замыкания солнечного элемента; I_s – обратный ток насыщения диода; e – заряд электрона равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; U – напряжение на нагрузке солнечного элемента; k – постоянная Больцмана равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – рабочая температура в градусах Кельвина, R_n – последовательное сопротивление солнечного элемента; $R_{ш}$ – шунтирующее сопротивление; A – коэффициент (эмпирический параметр ВАХ), полученный при сравнении теоретических и экспериментальных кривых вольт-амперной характеристики.

Параметрами, определяющими форму ВАХ ИБС, являются: ток короткого замыкания (КЗ) $I_{kз}$; напряжение холостого хода (ХХ) $U_{хх}$; сопротивления $R_{ш}$ и R_n , которые определяют наклоны ВАХ соответственно на участках тока и напряжения.

Данная модель, взятая за основу, позволяет получить достаточно точные характеристики СЭ при относительной простоте реализации [9, 10].

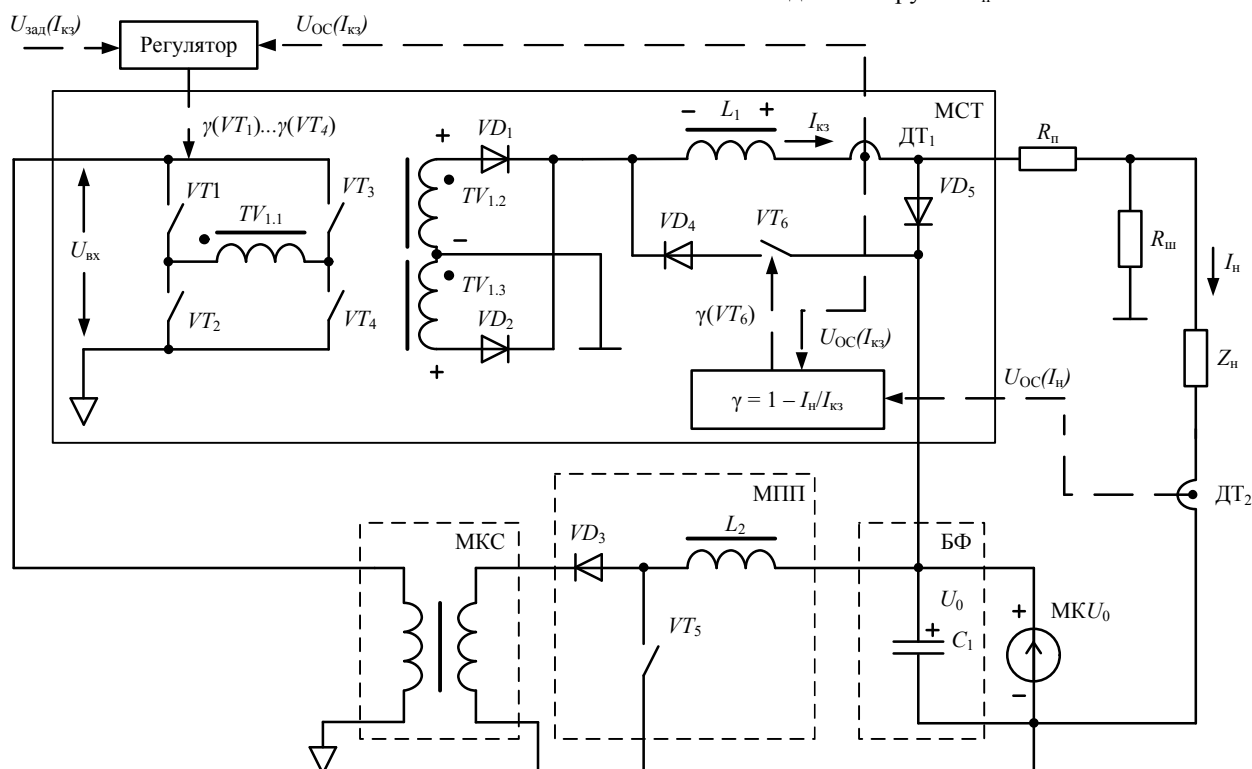


Рис. 3. Структурная схема ИБС № 1

Согласно эквивалентной схеме СЭ ниже будут представлены несколько способов формирования ВАХ СБ и соответствующие им варианты построения ИБС, которые представляют собой безынерционные источники тока, благодаря тому, что ток короткого замыкания ($I_{kз}$) в дросселе выходного фильтра поддерживается постоянно независимо от положения рабочей точки на ВАХ. Для достижения этого условия используются обводные контуры, которые вступают в работу в соответствии с определенными алгоритмами. Для упрощения анализа приведенные схемы ИБС не предполагают воспроизведение нелинейного участка.

На рис. 3 изображена структурная схема ИБС №1, состоящая из следующих частей:

- модуля стабилизатора тока (МСТ), выполненного по топологии мостового инвертора с понижающим трансформатором, двухполупериодным выпрямителем со средней точкой и обводным каналом;
- источника напряжения – MKU_0 , исполненного по аналогичной топологии МСТ, за исключением обводного канала;
- блока фильтров (БФ), состоящего из нескольких электролитических конденсаторов;
- модуля повышающего преобразователя (МПП), выполненного по топологии повышающего преобразователя;
- модуля конвертора сброса (МКС), выполненного по топологии мостового инвертора с повышающим трансформатором и двухполупериодным выпрямителем со средней точкой;
- резисторов R_n и $R_{ш}$ предназначенных для имитации соответствующих сопротивлений СБ. Величины сопротивлений резисторов R_n и $R_{ш}$ влияют на наклоны ВАХ соответственно на участках напряжения и тока;
- импеданса нагрузки Z_n .

МСТ с помощью ШИМ-преобразования осуществляет стабилизацию тока $I_{кз}$ дросселя L_1 независимо от тока I_n нагрузки. Выход МСТ через отсекающий диод нагружен на конденсаторы БФ с напряжением U_0 , определяющим напряжение ХХ ИБС, а также подключен к нагрузке канала ИБС. При уменьшении сопротивления нагрузки от ХХ до КЗ напряжение на нагрузке будет определяться суммой напряжения U_0 и падением напряжения на отсекающем диоде VD_5 . С дальнейшим уменьшением сопротивления отсекающий диод запирается и ток нагрузки I_n определяется током $I_{кз}$. Стабилизацию напряжения U_0 осуществляют преобразователи MKU_0 и МПП, реализуя заряд и разряд конденсаторов фильтра U_0 и тем самым симметричный отклик системы при сбросе–набросе нагрузки. Выходное напряжение МПП еще раз повышается блоком МКС до уровня $U_{вх}$ и рекуперирован на вход ИБС.

Обводной канал МСТ, состоящий из последовательно включенных транзистора VT_6 и диода VD_4 , позволяет снизить установочную мощность MKU_0 , МПП и МКС. Это достигается за счет своевременного отпирания транзистора VT_6 на интервале паузы управления мостового инвертора МСТ, при этом относительная длительность отпирания регулируется по закону

$$\gamma(VT_6) = 1 - \frac{I_n}{I_{кз}}, \quad (2)$$

где $\gamma(VT_6)$ – коэффициент заполнения ШИМ ключа VT_6 обводного канала; I_n – ток нагрузки, $I_{кз}$ – ток короткого замыкания.

В момент открытого состояния VT_6 ток $I_{кз}$ замыкается по «нулевому» контуру: $L_1(+)$ – ДТ₁ – VD_5 – VT_6 – VD_4 – $L_1(-)$, что препятствует избыточному сбросу энергии, накопленной в дросселе L_1 , в фильтр U_0 .

При положении рабочей точки на участке тока ВАХ, когда стабилизируемый ток $I_{кз}$ полностью потребляется нагрузкой, путь прохождения тока определяется контуром:

$$TV_{1,2} / TV_{1,3} (+) - L_1 - ДТ_1 - R_n - Z_n - U_0 - TV_{1,2} / TV_{1,3} (-).$$

Для стабилизации тока МСТ используется стандартный ПИД-регулятор.

Структурная схема управления работой ключа VT_6 обводного канала МСТ изображена на рис. 4.

На выходе аналогового сумматора DA_1 формируется напряжение U_1 , описываемое уравнением (3).

$$U_1 = U_{OC}(I_{кз}) - U_{OC}(I_n), \quad (3)$$

где $U_{OC}(I_{кз})$ – сигнал ОС тока КЗ; $U_{OC}(I_n)$ – сигнал ОС тока нагрузки.

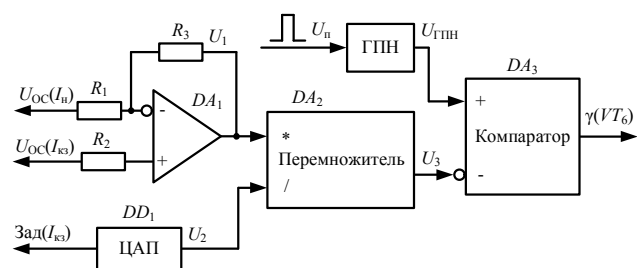


Рис. 4. Структурная схема управления работой ключа обводного канала МСТ

Цифроаналоговый преобразователь ЦАП преобразует цифровой сигнал задания тока КЗ в напряжение U_2 , описываемое уравнением (4).

$$U_2 = U_{зад}(I_{кз}), \quad (4)$$

где $U_{зад}(I_{кз})$ – сигнал задания тока КЗ.

На выходе перемножителя DA_2 формируется напряжение U_3 , описываемое уравнением (5).

$$U_3 = \frac{U_{OC}(I_{кз}) - U_{OC}(I_n)}{U_{зад}(I_{кз})}, \quad (5)$$

Блок генератора пилообразного напряжения (ГПН) образует напряжение $U_{ГПН}$ пилообразной формы, синхронизированное с временем начала паузы работы ключей $VT_1 \dots VT_4$ мостового инвертора МСТ.

Компаратор DA_3 в результате сравнения напряжений $U_{ГПН}$ и U_3 формирует коэффициент заполнения $\gamma(VT_6)$ ключа обводного канала VT_6 МСТ, пропорциональный величине $(1 - I_{кз})/I_n$ на интервале паузы ключей $VT_1 \dots VT_4$ мостового инвертора.

Недостатком данного способа является относительная сложность схемы управления работой обводного ключа, что выражается в трудоемком процессе настройки данного узла.

На рис. 5 изображена структурная схема ИБС №2, с упрощенной топологией построения в сравнении с ИБС №1 за счет устранения разрядных (МПП, МКС) и зарядного (MKU_0) блоков с сохранением высокого КПД. Составными частями ИБС №2 являются:

- источники напряжений U_0 и $U_{доб}$, выполненные по топологии мостового инвертора с понижающим трансформатором и двухполупериодным выпрямителем со средней точкой;
- МСТ, выполненного по топологии понижающего преобразователя;
- резисторы R_n и $R_{ш}$ аналогичные по предназначению для схемы ИБС №1;
- отсекающий диод VD_3 вместе с R_n , VT_2 и VD_1 , образующего обводной канал;
- импеданса нагрузки Z_n .

Источники напряжений U_0 и $U_{доб}$ служат для формирования напряжения $U_{хх}$. Модуль стабилизации тока (МСТ), выполненный по топологии понижающего преобразователя, стабилизирует ток $I_{кз}$.

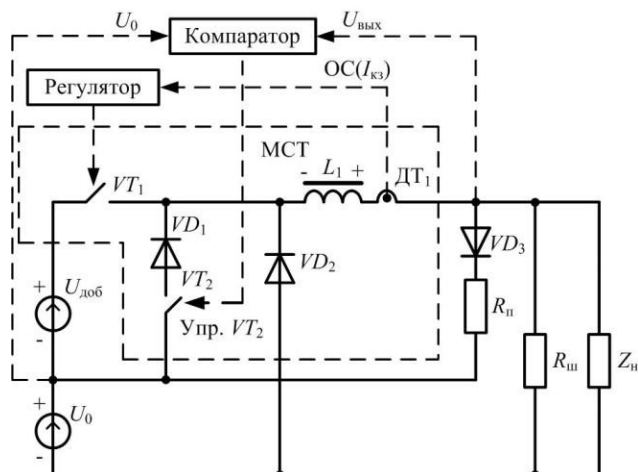


Рис. 5. Структурная схема ИБС №2

Аналогично ИБС № 1 способ формирования ВАХ ИБС № 2 основан на использовании обводных каналов, которые образуются при открытии ключа VT_2 во время работы ИБС на участке напряжения. Управление ключом VT_2 осуществляется компаратором из условия сравнения двух сигналов напряжений $U_{\text{вых}}$ и U_0 . Когда $U_{\text{вых}} > U_0$ (режим работы на участке напряжения), ключ обводного канала открыт, в противном случае – закрыт.

При работе на участке напряжения ток $I_{\text{кз}}$ в ИБС разветвляется по следующим контурам с учетом состояния ключа VT_1 :

ключ VT_1 открыт: $U_{\text{доб}}(+)-VT_1-L_1-\text{ДТ}_1-Z_{\text{н}}-U_0-U_{\text{доб}}(-)$;

$U_{\text{доб}}(+)-VT_1-L_1-\text{ДТ}_1-VD_4-VD_3-U_{\text{доб}}(-)$.

При закрытом ключе VT_1 ток течет в «нулевом» контуре:

$L_1(+)-\text{ДТ}_1-VD_4-VD_3-VT_2-VD_1-L_1(-)$;

и через нагрузку: $L_1(+)-\text{ДТ}_1-Z_{\text{н}}-VD_2-L_1(-)$.

Использование «нулевого» контура позволяет добиться минимального спада тока (энергия рассеивается только на активном сопротивлении элементов контура) в индуктивности L_1 , когда не происходит сброса энергии на источник напряжения U_0 .

При работе на участке тока ВАХ путь прохождения тока будет определяться следующими контурами:

ключ VT_1 открыт: $U_{\text{доб}}(+)-VT_1-L_1-\text{ДТ}_1-Z_{\text{н}}-U_0-U_{\text{доб}}(-)$;

ключ VT_1 закрыт: $L_1(+)-\text{ДТ}_1-Z_{\text{н}}-VD_2-L_1(-)$.

Использование обводного канала необходимо для предотвращения недопустимого повышения напряжения на модуле стабилизации напряжения U_0 выше номинального в режиме работы ИБС на участке напряжения.

Недостаток данного способа заключается в присутствии ошибок, связанных с нечетким критерием перехода с участка тока на участок напряжения, когда разница уровней напряжений $U_{\text{вых}}$ и U_0 не превышает уровень гистерезиса компаратора, отвечающего за открытое состояние ключа VT_2 . В результате чего энергия индуктивности L_1 приводит к увеличению

уровня напряжения U_0 выше заданного и, как следствие, неадекватному увеличению уровня выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ ИБС [11].

В описанных выше способах построения ВАХ используются дополнительные схемы управления работой обводного канала, из-за чего достаточно сложно обеспечить монотонность ВАХ. На рис. 6 представлена модель ИБС № 3 в среде Matlab/Simulink со способом формирования ВАХ, используя только регулятор.

МСТ (выполненный по топологии понижающего преобразователя) работает в двух диапазонах входного напряжения, образуемых соответственно уровнями U_0 и $(U_0 + U_{\text{доб}})$ при переходе рабочей точки с участка тока на участок напряжения ВАХ. Переход на разные уровни входного напряжения осуществляется благодаря использованию двух транзисторных ключей VT_1 и VT_2 , работающих под управлением регулятора МСТ, модель которого изображена на рис. 7.

Переключение диапазонов осуществляется в зависимости от величины коэффициентов заполнения ключей VT_1 и VT_2 МСТ согласно алгоритму, представленному на диаграммах (рис. 8). Для этого в структуре регулятора реализованы два пилообразных сигнала (П1 и П2), сдвинутые по фазе на 180 эл. градусов, представляющие собой опорные сигналы для входов 1 компараторов 1 и 2. На входы сравнения 2 данных компараторов заведен сигнал ошибки блока ПИД-регулятора, полученного путем сравнения заданного тока и тока короткого замыкания. В результате сравнения данных сигналов компараторами формируются соответственно сигналы K_1 и K_2 .

Время открытого состояния транзисторного ключа VT_2 определяется по логике ИЛИ при сравнении сигналов K_1 и K_2 и пропорционально их сумме. Время открытого состояния транзисторного ключа VT_1 определяется по логике и при сравнении сигналов K_1 и K_2 и формируется при их совпадении. В результате, когда ИБС работает на участке тока ВАХ, ключ VT_1 закрыт и ко входу МСТ приложено напряжение U_0 через диод VD_1 .

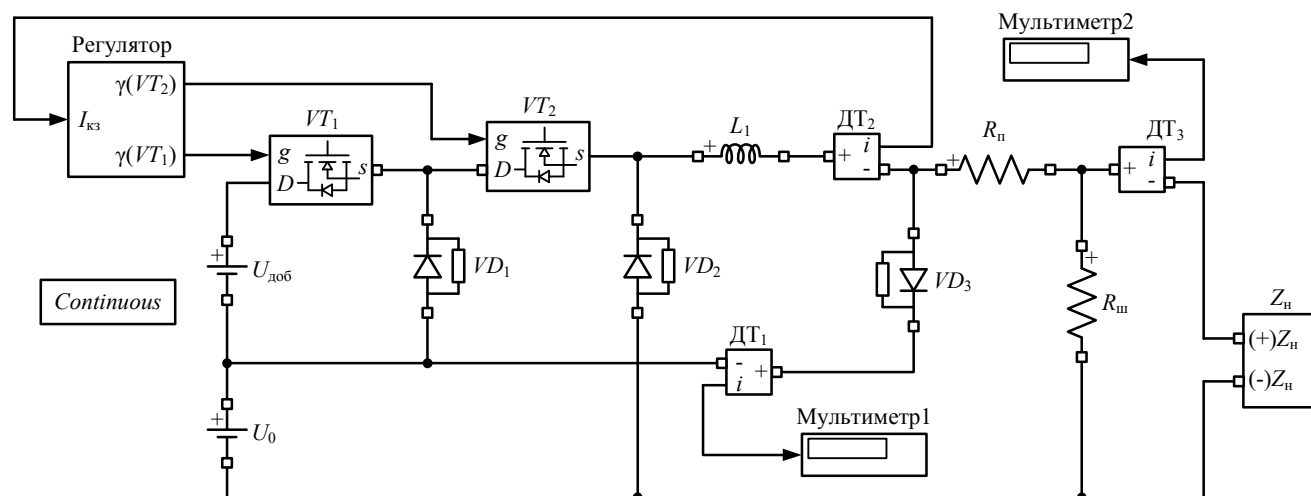


Рис. 6. Модель ИБС № 3

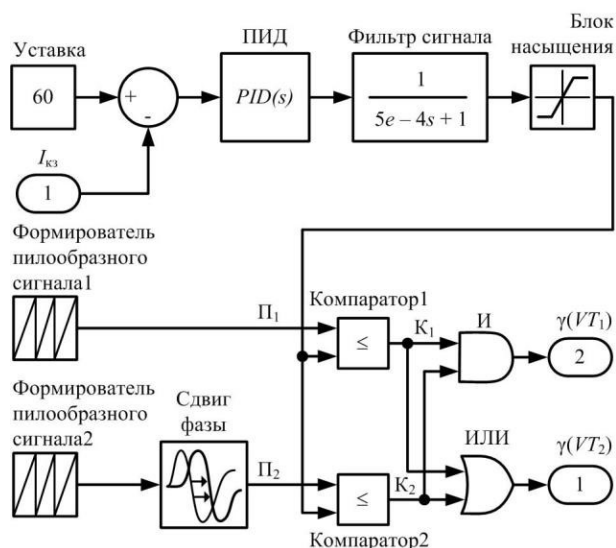


Рис. 7. Модель регулятора МСТ

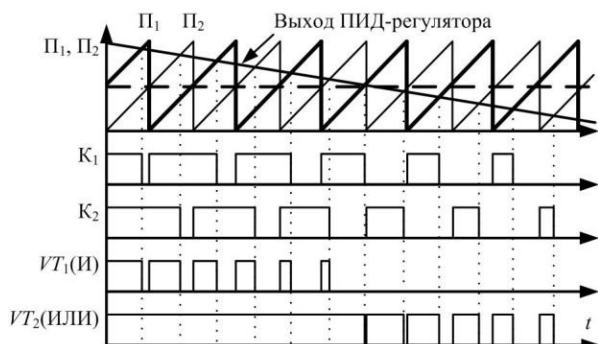


Рис. 8. Диаграммы формирования коэффициентов заполнения ключей VT1 и VT2 МСТ

Формирование ВАХ происходит при работе ключа VT_2 . Когда ошибка регулирования достигает значения, при котором коэффициент заполнения ключа VT_2 становится равным 1, начинает открываться ключ VT_1 и в работу вступает источник напряжения $U_{доб}$, повышая уровень входного напряжения МСТ до значения $(U_0 + U_{доб})$ для компенсации потери напряжения на активном сопротивлении элементов ИБС. С этого момента ИБС переходит на участок напряжения, ключ VT_2 открыт постоянно, формирование ВАХ происходит при работе ключа VT_1 . В момент времени, когда ключ VT_1 закрыт, для тока образуется контур обводного канала: $L_1(+)$ – ДТ₂ – VD₃ – ДТ₁ – VD₁ – VT_2 – $L_1(-)$. Это приводит к уменьшению скорости спада тока в индуктивности L_1 , при этом вся избыточная энергия индуктивности (не идущая в нагрузку) возвращается в этом контуре.

На рис. 9 изображен блок нагрузки (БН) Z_n с функцией потенциометра, благодаря чему можно менять положение рабочей точки ИБС и наблюдать с помощью мультиметров 1 и 2, как токи разветвляются по контурам в зависимости от положения рабочей точки на различных участках ВАХ.

Измерительная часть БН позволяет построить ВАХ ИБС (рис. 10). Для ее отображения необходимо ввести в командной строке среды Matlab команду: `plot(v, i)`. Полученная монотонная ВАХ ИБС говорит об эффективности работы схемы регулятора.

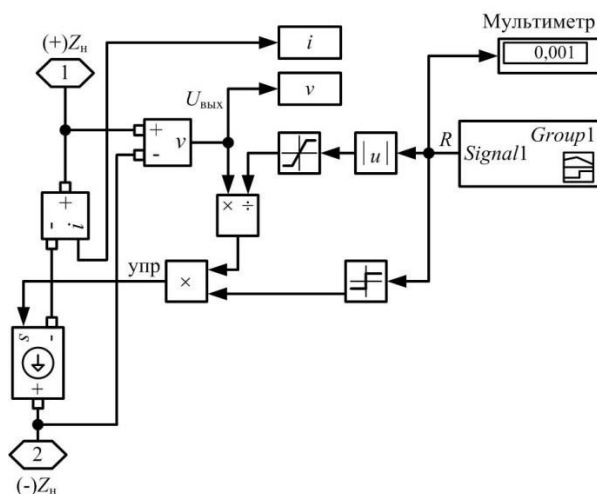
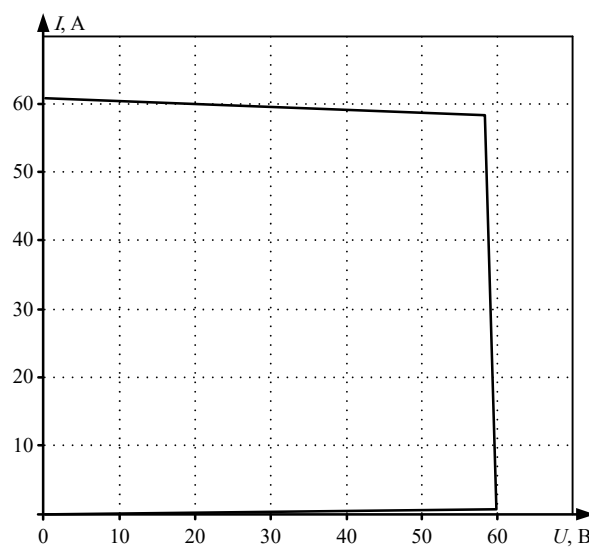
Рис. 9. Блок нагрузки Z_n 

Рис. 10. ВАХ ИБС № 3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Топология построения силовой части описанных ИБС с использованием обводного контура позволяет представлять их как безынерционные источники тока, благодаря чему значительно улучшаются динамические характеристики имитаторов.

Предложенный способ формирования ВАХ ИБС №3 дает возможность добиваться более качественной имитации СБ при значительно меньших трудозатратах в процессе настройки. Использование ПЛИС в качестве аппаратного решения для реализации логики регулятора требует лишь настройки коэффициентов блока ПИД-регулятора и не требует настройки схемы, обеспечивающей работу обводного контура.

Рассатриваемый подход по формированию ВАХ ИБС может применяться для имитации СБ во всем диапазоне существующих мощностей в ближайшей перспективе до 30 кВт.

Статья написана в рамках выполнения работы FEWM-2020-0043 «Изучение фундаментальных проблем создания и теоретические исследования систем ресурсосберегающей интеллектуальной силовой электроники с использованием технологий интернет-вещей и радиофотоники на основе компонентной базы собственной разработки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гушин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учебное издание. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
2. Keysight Technologies. Решение проблем имитации солнечных батарей. Помощь в выборе оптимального источника питания для наземных испытаний спутников. URL: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problemimitacii-solnechnyh-batarey.html> (дата обращения: 23.02.2020).
3. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang, Yu Gu. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs // IEEE Trans. 2018. Vol. MTT-65, no. 6, pp. 4691–4701.
4. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Zhiyun Bao, Xinjun Liu. High dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage // IEEE Trans. 2018. Vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.
5. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave tracking output voltage approach // IEEE Trans. 2018. Vol. MTT-33, no. 5, pp. 4102–4114.
6. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator // IEEE Trans. 2018. Vol. MTT-33, no. 8, pp. 7178–7192.
7. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator // IEEE Trans. – 2009. –2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (дата обращения: 24.12.2019).
8. Кремзуков Ю.А. Исследование динамических характеристик имитатора солнечной батареи ИБС-300/25 // Известия Томского политехнического университета. 2008. №4. С. 131–135.
9. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов: монография / Ю.А. Кремзуков, В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин. Томск: Томский университет, 2014. С. 86.
10. Кремзуков Ю.А. Имитатор батареи солнечной для наземной отработки и испытаний систем электропитания космических аппаратов на основе импульсных преобразователей: дис... канд. техн. наук. 05.09.12 / Кремзуков Юрий Александрович. Томск, 2011.
11. Пат. 144248 Российская Федерация, МПК H 01 L 31/00. Электрический имитатор солнечной батареи / Мишин В.Н., Пчельников В.А., Бубнов О.В., Кремзуков Ю.А.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2014117895/28; заявл. 30.04.2014; опубл. 20.08.14.

Поступила в редакцию 27 февраля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD OF FORMING A VOLT-AMPER CHARACTERISTIC OF A SOLAR ARRAY SIMULATOR FOR TESTING POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPACECRAFT

Oleg G. Rekutov

Researcher, Direct Current Conversion Department, Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR), Tomsk, Russia. E-mail: rekutov@niiiaem.tomsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7464-5707>

Anton G. Yudin

Ph.D. (Engineering), Director, the Research Institute of Automation and Electromechanics, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NII AEM TUSUR), Tomsk, Russia. E-mail: yag@niiiaem.tomsk.ru.

One of the features of solar array simulators used in the space industry is their higher dynamic characteristics compared to solar battery simulators used in the industry. In this regard, approaches to the design of both the power unit and the control system are somewhat different. A method for forming the volt-ampere characteristics of a solar array simulator used for testing power systems of spacecraft is presented. The essence of the proposed method is to present the solar array simulator as an inertialess current source, due to the approach of constructing the power part using the bypass current channel and a control system that allows you to synchronize its operation depending on the position of the operating point on the current-voltage characteristic of the solar array simulator. The article describes the structure of the power unit and the algorithm of the control system implemented in the Matlab / Simulink environment. The obtained simulation results confirm the effectiveness of the proposed method for the formation of the current-voltage characteristics of a solar array simulator.

Keywords: solar array simulator, current-voltage characteristic, power module, topology, regulator, current stabilization, PWM.

REFERENCES

1. Gushchin V.N. *Osnovy ustroystva kosmicheskikh apparatov: uchebnoye izdanie* [Basics of the device of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ. 2003, 272 p. (In Russian)
2. Keysight Technologies. Reshenie problem imitatsii solnechnykh batarei. Pomoshch v vybore optimalnogo istochnika pitaniya dlya nazemnykh ispytaniy sputnikov [Keysight Technologies. Solving the challenges of solar array simulation. Helping you select the optimal power solution for satellite ground testing]. Available at: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problemimitacii-solnechnyh-batarey.html> (accessed 23 February 2020). (In Russian)
3. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang, Yu Gu. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-65, no. 6, pp. 4691–4701.
4. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Zhiyun Bao, Xinjun Liu. High Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.
5. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng

- Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave track-ing output voltage approach, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 5, pp. 4102-4114.
6. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator, *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 8, pp. 7178-7192.
 7. Yuan Li, Taewon Lee, Fang, Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator, *IEEE Trans.* – 2009, 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition.
 8. Kremzukov Yu.A. The study of the dynamic characteristics of a solar array simulator SAS-300/25. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2008, no. 4, pp. 131–135. (in Russian)
 9. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchelnikov V.A., Bubnov O.V., Rulevskii V.M., Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A. *Proektirovanie modulnykh imitatorov solnechnykh batarei avtomatizirovannoi kontrolno-ispytatelnoi apparatury sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov* [Design of modular solar array simulators of the automated control test apparatus of electric power supply systems of automatic spacecrafts]. Tomsk, Tomsk University Publ., 2014, 86 p. (in Russian)
 10. Kremzukov Yu.A. *Imitator batarei solnechnoy dlya nazemnoy otrabotki i ispytaniy sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove impulsnykh preobrazovateley*. Kand. Diss. [Solar array simulator for ground testing of spacecraft power systems based on pulse converters. Ph.D. Diss.]. Tomsk, 2011.
 11. Mishin V.N., Pchelnikov V.A., Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A. *Elektricheskiy imitator solnechnoy batarei* [Electric solar array simulator]. Patent RF, no. 2014117895/28, 2014.

Рекутов О.Г., Юдинцев А.Г. Метод формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электропитания космических аппаратов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 2(47). С. 26-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-26-32)

Rekutov O.G., Yudinsev A.G. Method of Forming a Volt-Amper Characteristic of a Solar Array Simulator for Testing Power Supply Systems of Spacecraft. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 2(47), pp. 26-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-26-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-26-32)