

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ С ДВУХКАСКАДНЫМ РЕГУЛИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ*

Предложен способ повышения качества имитаторов солнечных батарей с каскадным включением импульсного и непрерывного регулирующих элементов последовательного и параллельного типов.

Ключевые слова: солнечная батарея, имитатор, динамические свойства, нелинейное корректирующее устройство, моделирование.

При проектировании и испытаниях бортового электрооборудования космических аппаратов (КА) с целью проверки на работоспособность и устойчивость к воздействию по шинам питания электромагнитных помех допустимой амплитуды (ГОСТ Р 51317.4.11–2007) применяются устройства, которые с заданной погрешностью воспроизводят требуемые статические и динамические характеристики реальной солнечной батареи. Эти устройства называются имитаторами солнечных батарей (ИБС). Результаты и показатели наземных испытаний систем электропитания во многом определяются точностью воспроизведения ИБС статических (вольтамперная характеристика) и динамических (полное внутреннее сопротивление) характеристик реальной СБ. Поэтому работа, посвященная повышению качества имитаторов СБ, является актуальной.

Наиболее перспективными на сегодняшний день имитаторами СБ являются имитаторы [1], содержащие в своей структуре каскадно соединенные непрерывный и импульсный регулирующие элементы (рис. 1).

Непрерывный регулирующий элемент (НРЭ) в имитаторе СБ может быть включен с нагрузкой последовательно (рис. 1, а) или параллельно (рис. 1, б). НРЭ обеспечивает воспроизведение имитатором требуемых характеристик реальной СБ (вольтамперную характеристику, полное внутреннее сопротивление), а импульсный регулятор (ИРЭ) ограничивает мощность, рассеиваемую НРЭ за счет стабилизации напряжения на НРЭ в последовательной схеме и за счет стабилизации тока через НРЭ в параллельной схеме.

Имитатор, выполненный по такой топологии, объединяет достоинства имитаторов, содержащих только один регулирующий элемент. В случае НРЭ отмечается высокое быстродействие и точность воспроизведения динамических характеристик от имитатора, в случае ИРЭ – высокие КПД и массогабаритные характеристики.

Однако у имитаторов с каскадно соединенными НРЭ и ИРЭ имеется недостаток, проявляющийся при широкодиапазонной коммутации нагрузки, связанный с низким быстродействием импульсного регулятора.

Для последовательной схемы этот эффект наиболее ярко проявляется на ветви тока ВАХ СБ (от режима короткого замыкания до режима максимальной мощности) (рис. 2).

При изменении нагрузки от R_{H1} до R_{H2} напряжение на нагрузке, в соответствии с динамикой СБ, должно скачком

измениться от U_{H1} до U_{H2} , но так как ИРЭ имеет быстродействие значительно ниже, чем НРЭ, то напряжение на нагрузке скачком изменяется только до напряжения ИРЭ $U_{ИРЭ} = U_{H1} + U_{ст}$, а дальнейшее увеличение напряжения идет со скоростью, определяемой динамикой ИРЭ, что не соответствует переходному процессу в реальной СБ.

В имитаторах параллельного типа стабилизируется не напряжение на НРЭ, а ток, протекающий через него. В связи с этим в параллельной схеме влияние быстродействия ИРЭ ощутимо при движении рабочей точки по ветви напряжения (от режима холостого хода до режима максимальной мощности) (рис. 3).

При коммутации нагрузки от R_{H1} до R_{H2} происходит изменение тока нагрузки от I_{H1} до I_{H2} , но из-за низкого быстродействия ИРЭ скачком ток изменяется только до тока $I_{ИРЭ} = I_{H1} + I_{ст}$, а дальнейшее изменение происходит со скоростью импульсного регулятора.

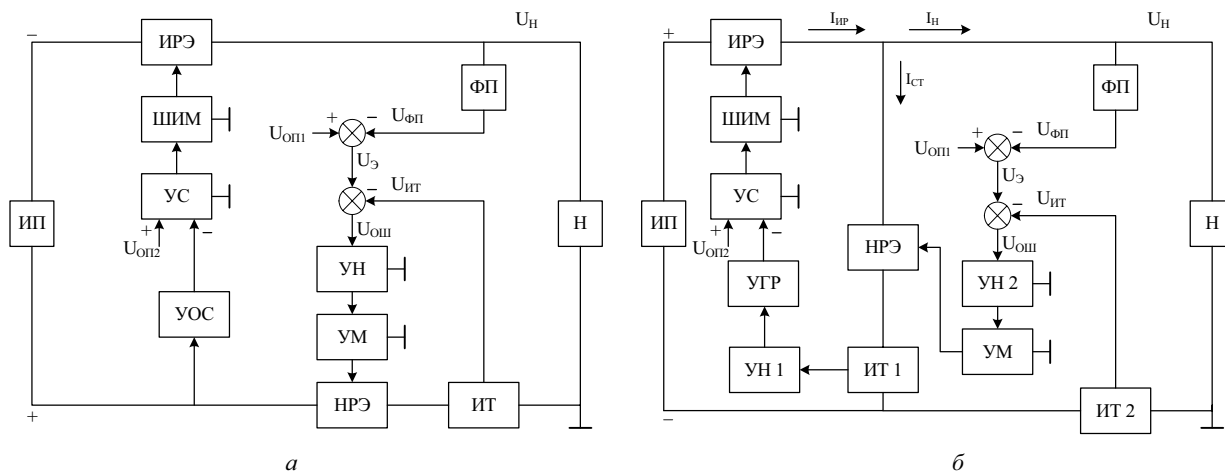
Для решения данной проблемы необходимо, чтобы при широкодиапазонной коммутации нагрузки НРЭ оставался в активном режиме. Этого можно добиться увеличением мощности рассеивания НРЭ. Но при этом необходимо увеличивать число параллельно включенных транзисторов, площадь радиаторов, длину соединительных проводов и т. п., что в конечном счете ведёт к ухудшению динамических характеристик НРЭ и увеличению его габаритов и массы.

В работе рассматривается метод повышения качества имитаторов СБ путём введения нелинейного корректирующего устройства (НКУ) в контур обратной связи импульсного регулирующего элемента. НКУ относится к динамическим КУ, так как эффект от его включения проявляется только во время переходных процессов, а в установившемся режиме (сопротивление нагрузки постоянно) оно не оказывает влияния на систему.

НКУ, введенное в контур обратной связи для импульсного регулятора, должно обеспечивать уменьшение среднего напряжения обратной связи ИРЭ при возникновении периодической коммутации нагрузки, что в свою очередь приведет к увеличению уровня стабилизируемого напряжения на НРЭ в имитаторах последовательного типа и тока через НРЭ в имитаторах параллельного типа, тем самым позволяя НРЭ оставаться в активном режиме при широкодиапазонной коммутации нагрузки.

Такое устройство может быть выполнено в виде RC-цепи, в которой сопротивление R зашунтировано диодом VD [2] (рис. 4).

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П530).



ИП – источник питания, ИРЭ – импульсный регулирующий элемент, НРЭ – непрерывный регулирующий элемент, Н – нагрузка, ИТ – измеритель тока, УМ – усилитель мощности, УН – усилитель напряжения, УОС – устройство обратной связи, УС – усилитель-сумматор, УГР – устройство гальванической развязки, ФП – функциональный преобразователь, ШИМ – широтно-импульсный модулятор

Рис. 1. Структурные схемы ИБС с двумя регулируемыми элементами: а – последовательного типа; б – параллельного типа

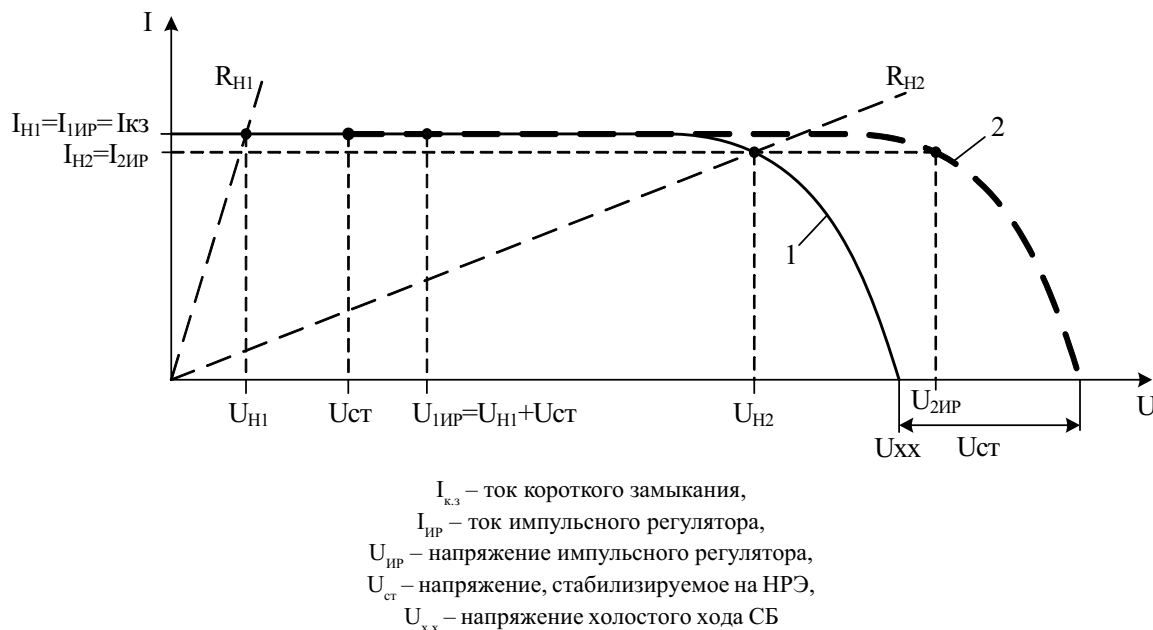


Рис. 2. Вольтамперные характеристики для последовательной схемы: 1 – ВАХ имитатора СБ; 2 – ВАХ импульсного регулятора

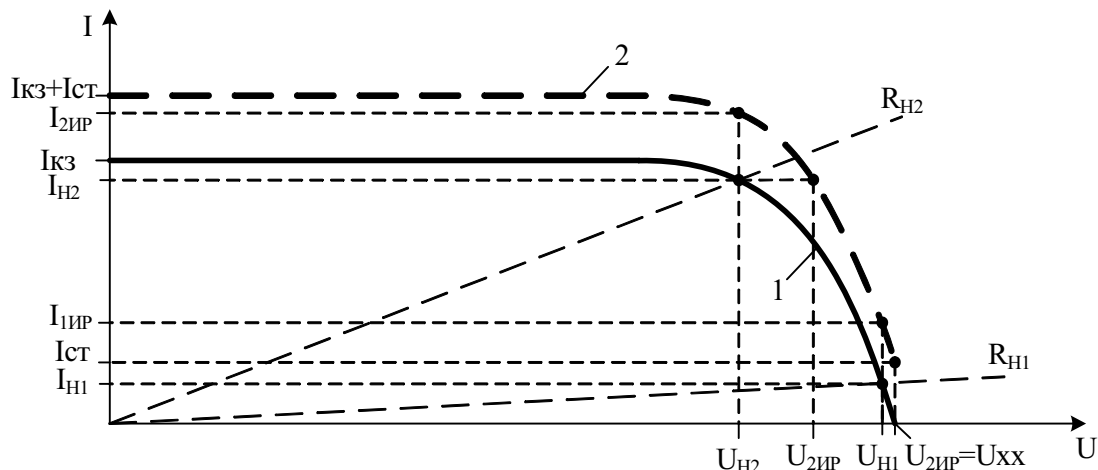


Рис. 3. Вольтамперные характеристики для параллельной схемы: 1 – ВАХ имитатора СБ; 2 – ВАХ импульсного регулятора

В установившемся режиме конденсатор C заряжен через резистор R практически до напряжения на непрерывном регулирующем элементе $U_{НРЭ}$. Напряжение на конденсаторе C служит напряжением обратной связи для импульсного регулирующего элемента. При ступенчатом увеличении тока нагрузки I_H напряжение на непрерывном РЭ возрастает и конденсатор заряжается в соответствии с выражением

$$U_{OC} = U_{НРЭ} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_3}}),$$

где $T_3 = RC$ – постоянная времени заряда конденсатора, определяющая скорость протекания процесса заряда.

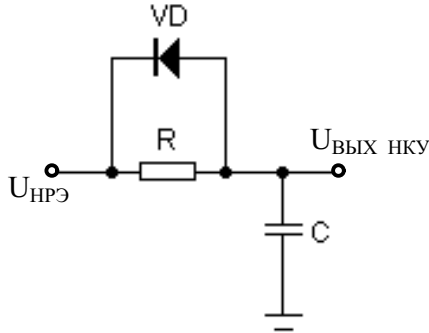


Рис. 4. Электрическая схема нелинейного корректирующего устройства

Это увеличение напряжения на конденсаторе импульсный РЭ стремится уменьшить до величины $U_{ОП2}$, тем самым уменьшая напряжение на непрерывном регулирующем элементе $U_{НРЭ}$.

При сбросе нагрузки напряжение на непрерывном регулирующем элементе резко уменьшается и конденсатор разряжается через диод VD до величины напряжения $U_{НРЭ}$. Постоянная времени разряда

$$T_p = R_d C,$$

где R_d – дифференциальное сопротивление открытого диода.

Поскольку выполняется условие $R_d \ll R$, то и постоянная времени разряда T_p много меньше постоянной заряда конденсатора T_3 . Вследствие этого среднее напряжение на конденсаторе уменьшается при периодической коммутации нагрузки, что приводит к увеличению среднего напряжения на НРЭ и увеличению диапазона коммутации нагрузки, при котором НРЭ остается в активном режиме.

Таким образом, введение НКУ улучшает динамические свойства ИБС, следовательно, повышается качество имитаторов.

Для проведения вычислительного эксперимента в пакете MicroCAP 7.1 были разработаны модели имитаторов СБ [3] последовательного (рис. 5) и параллельного (рис. 6) типов.

В модели последовательного типа используются PSpice модели элементов: операционные усилители AD8066 (X1, X2), биполярные транзисторы BD677A (Q2), 2SC3284 (Q3), диоды MBR12060CT (D2, D3).

В соответствии с методикой [4] были рассчитаны корректирующие устройства для имитаторов последовательного и параллельного типов, обеспечивающие устойчивость имитатора и воспроизведение требуемого адмитанса СБ.

Модель параллельного типа содержит PSpice модели элементов: операционные усилители AD8066 (X1, X3-X5), полевые транзисторы IRF740 (Q1-Q3), диоды HFA80NC40CSL_IR (D1, D5), 1N4733 (D4), буферный усилитель BUF634 (X2).

В процессе моделирования имитатора СБ последовательного и параллельного типов получены переходные процессы при коммутации нагрузки:

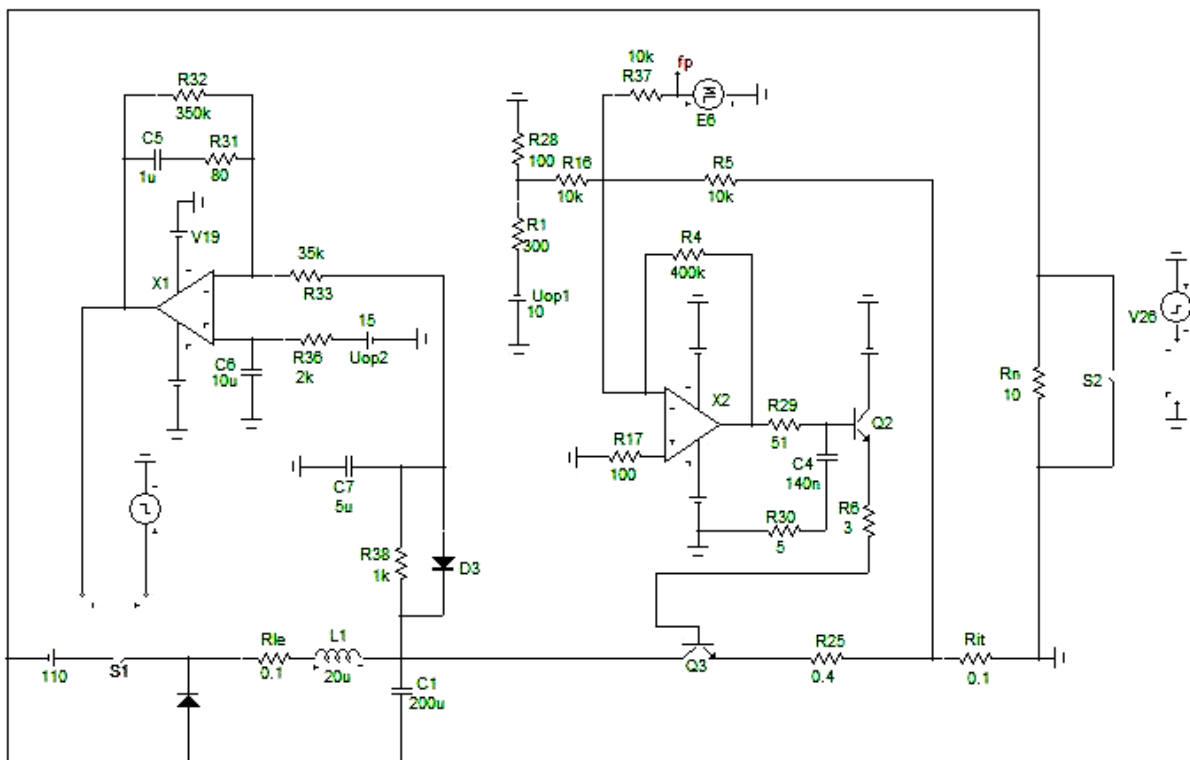


Рис. 5. Схема моделирования имитатора СБ последовательного типа в пакете MicroCAP 7.1

- на токовой ветви ВАХ в последовательной схеме без нелинейного корректирующего устройства (рис. 7);
- на токовой ветви ВАХ в последовательной схеме с нелинейным корректирующим устройством (рис. 8);
- на ветви напряжения ВАХ в параллельной схеме без нелинейного корректирующего устройства (рис. 9);
- на ветви напряжения ВАХ в параллельной схеме с нелинейным корректирующим устройством (рис. 10).

В ИБС последовательного типа без НКУ при периодической коммутации нагрузки наблюдаются просадки до нуля напряжения на НРЭ (рис. 7, в). В этот момент времени уменьшается скорость нарастания напряжения U_H на нагрузке (рис. 7, б) и тока через нагрузку (рис. 7, а). Этот эффект объясняется низким быстродействием ИРЭ: когда напряжение на НРЭ падает до нуля, он переходит в режим насыщения и дальнейший рост напряжения нагрузки определяется динамикой ИРЭ.

После введения НКУ в ИБС последовательного типа, падения напряжения на НРЭ до нуля не наблюдается (рис. 8, в). Соответственно изменение напряжения на нагрузке определяется только быстродействием НРЭ (рис. 8, а, б), которое хорошо согласуется с динамикой реальной СБ.

В ИБС параллельного типа без НКУ при периодической коммутации нагрузки также заметно влияние низкого быстродействия ИРЭ. Ток НРЭ, стабилизируемый им, при переходе рабочей точки из короткого замыкания в точку максимальной мощности падает до нуля (рис. 9, в), что также приводит к изменению скорости нарастания тока через НРЭ (рис. 9, б) и просадкам напряжения на нагрузке (рис. 9, а).

Введение НКУ в имитатор параллельного типа также привело к улучшению динамических характеристик ИБС (рис. 10). НРЭ не выходит из активного режима работы (рис. 10, в), обеспечивая требуемое быстродействие при широкодиапазонных изменениях нагрузки (рис. 10, а, б).

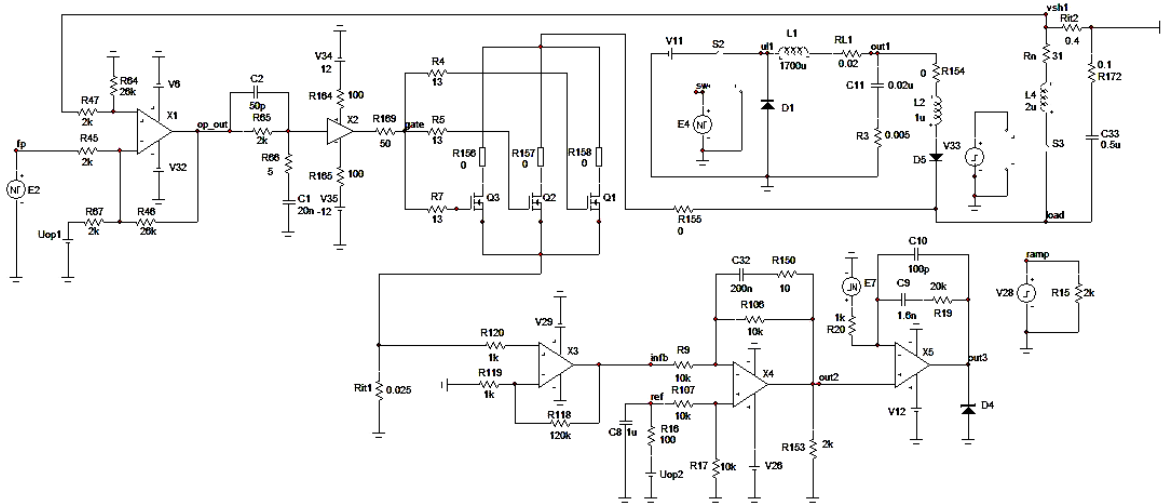


Рис. 6. Схема моделирования имитатора СБ параллельного типа в пакете MicroCAP 7.1

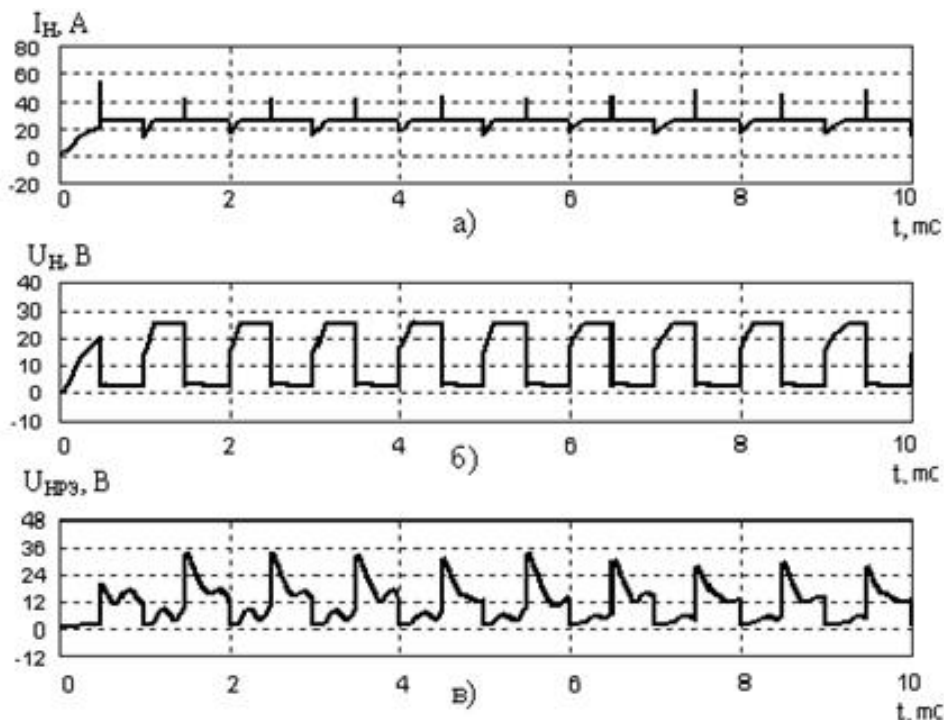


Рис. 7. Переходные процессы в ИБС последовательного типа без нелинейного корректирующего устройства: а – ток через нагрузку; б – напряжение на нагрузке; в – напряжение на НРЭ

По результатам моделирования ИБС последовательного и параллельного типов можно сделать следующие выводы: введение предложенного нелинейного корректирующего устройства в цепь обратной связи импульсного регулятора приводит к повышению качества имитаторов СБ за счет улучшения динамических свойств имитатора; рассматриваемое корректирующее устройство оказывает влияние на работу ИБС только при периодической коммутации нагрузки.

Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Моделирование имитатора солнечных батарей с каскадным включением импульсного и непрерывного усилителей мощности // Вестник СибГАУ. Вып. 1(14), 2007. С. 4–8.
2. Хлыпало Е. И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах. Л. : Энергоиздат, 1982.

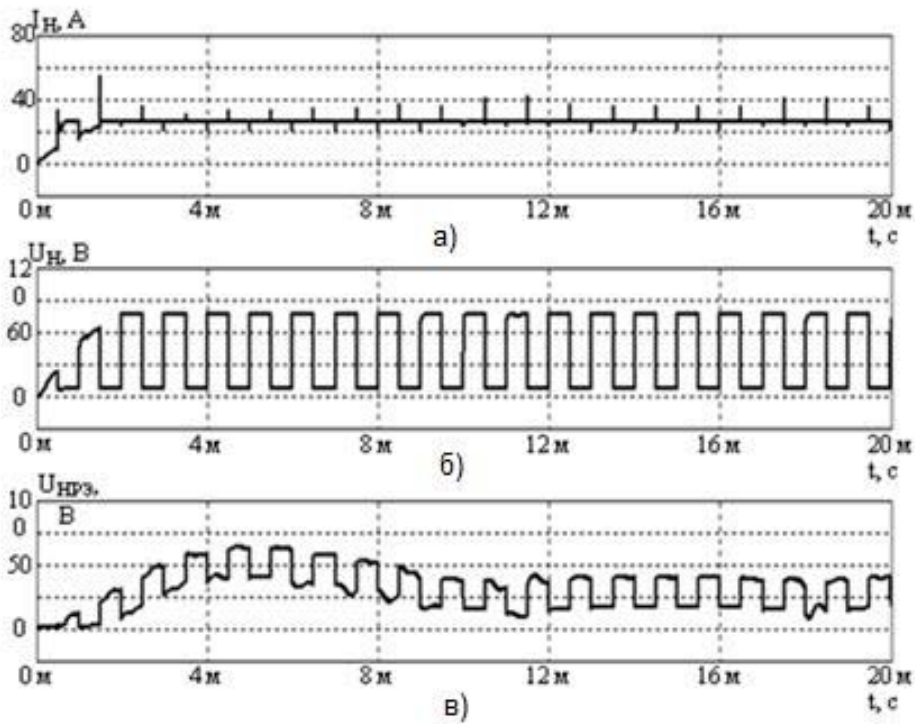


Рис. 8. Переходные процессы в ИБС последовательного типа с нелинейным корректирующим устройством: а – ток через нагрузку; б – напряжение на нагрузке; в – напряжение на ИРЭ

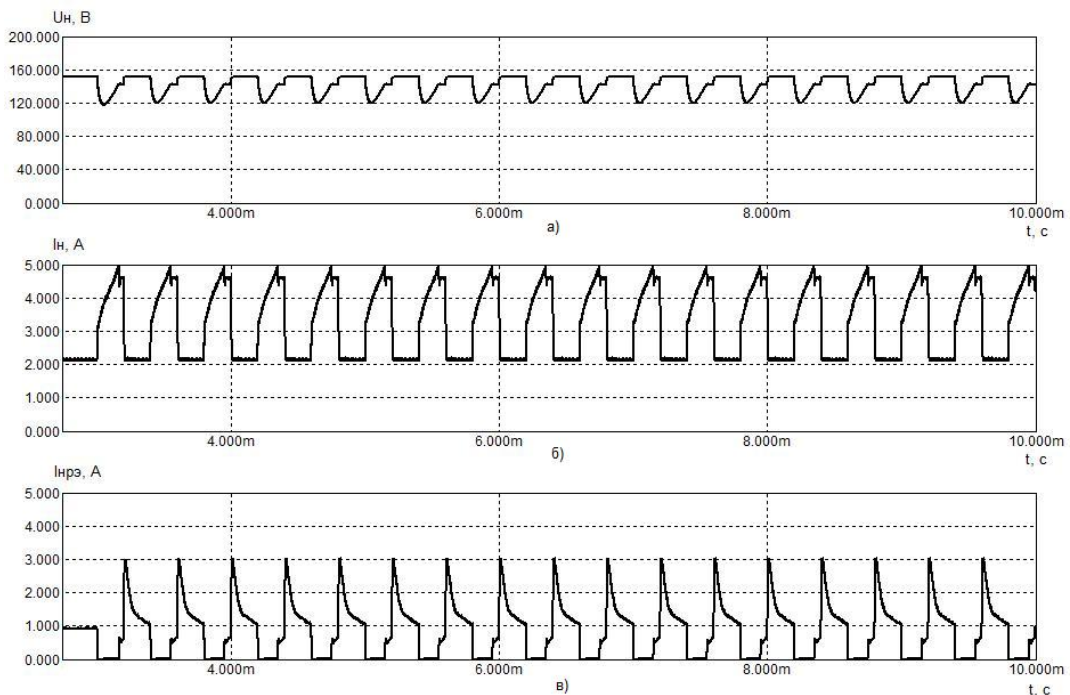


Рис. 9. Переходные процессы в ИБС параллельного типа без нелинейного корректирующего устройства: а – напряжение на нагрузке; б – ток через нагрузку; в – ток через ИРЭ

3. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. М. : Горячая линия – Телеком, 2003.

4. Мизрах Е. А., Сидоров А. С., Балакирев Р. В. О синтезе адмитансных частотных характеристик имитатора солнечной батареи // Вестник СибГАУ. Вып. 2(9). 2006. С. 24–28.

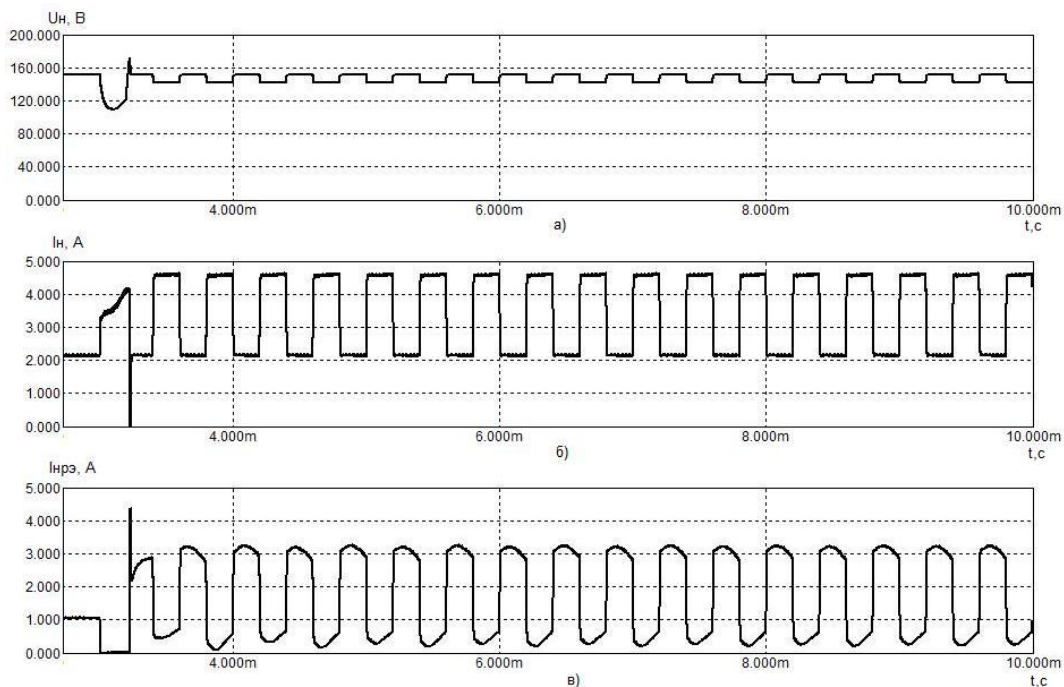


Рис. 10. Переходные процессы в ИБС параллельного типа с нелинейным корректирующим устройством: а – напряжение на нагрузке; б – ток через нагрузку; в – ток через НРЭ

S. B. Tkachev, E. A. Mizrakh

UPGRADING OF PHOTOVOLTAIC ARRAY SIMULATOR WITH TWO-CIRCUIT CONTROL ELEMENT

The author suggest a method for upgrading of serial and parallel photovoltaic array simulators with two-circuit control element.

Keywords: photovoltaic array, simulator, dynamic properties, spacecraft, nonlinear corrector, modeling.

© Ткачев С. Б., Мизрах Е. А., 2011