

УДК 621.31

А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Кремзуков

## Многофункциональный энергосберегающий имитационный нагрузочный комплекс для систем электропитания космических аппаратов

Предложен многофункциональный энергосберегающий комплекс имитации нагрузок для отработки сеансного расписания нагрузок в автоматическом и ручном режимах, для формирования нагрузочных токов в динамическом и статическом режимах, а также для исследования быстродействия и надежности регуляторов систем электропитания автоматических космических аппаратов.

**Ключевые слова:** космический аппарат, система электропитания, автоматизированный испытательный комплекс, комплекс имитации нагрузки, ведомый инвертор, имитатор солнечной батареи, имитатор аккумуляторной батареи.

Одной из важных жизнеобеспечивающих систем космического аппарата (КА) является система электропитания (СЭП). Степень надежности СЭП должна быть максимальной, т.к. все служебные и полезные устройства КА нуждаются в бесперебойном и качественном электропитании.

Среднесуточная мощность СЭП современных автоматических КА достигает 10 кВт и более, при этом характер нагрузки может быть активным, реактивным и смешанным. Как отмечалось ранее [1, 2, 3], подключение реальных устройств – солнечных и аккумуляторных батарей, бортовой полезной и служебной нагрузок в полном объеме при проведении наземных испытаний ведет к длительному времени отработки и испытаний КА, затруднено из-за их дефицитности, стоимости и громоздкости.

Решением этой проблемы является создание специализированных имитирующих комплексов, обладающих вольт-амперными характеристиками реальных солнечной и аккумуляторной батарей [3]. Также необходим комплекс имитации нагрузок (КИН) для отработки сеансного расписания нагрузок в автоматическом и ручном режимах, для формирования нагрузочных токов в динамическом и статическом режимах, а также для исследования быстродействия и надежности регуляторов СЭП, измерения выходного полного сопротивления СЭП и оценки качества стабилизации выходного напряжения. КИН является испытательной системой, содержащей различные виды имитационных нагрузок: постоянная (активная) нагрузка, импульсная (скачкообразная), комплексная (активно-емкостная), переменная с синусоидальной формой тока. Кроме того, так как выходная мощность современных СЭП КА постоянно растет, то важной задачей при проведении длительных (несколько суток) наземных испытаний является реализация энергосберегающего режима, позволяющего направить ток, протекающий по выходным шинам СЭП в питающую трехфазную сеть, а не на активные ступени сопротивлений, как при традиционных наземных испытаниях СЭП КА, проводимых в настоящее время.

При согласовании первичного источника энергии (солнечной батареи) с аккумуляторной батареей и для обеспечения требуемого качества напряжения на нагрузке, в СЭП применяются импульсные преобразователи энергии, но независимо от конкретной структуры СЭП её можно представить обобщенной энергобалансной моделью. В ходе проектирования наземной испытательной площадки целесообразно за основу принять приведенную энергобалансную модель СЭП КА (рис. 1).

Энергобалансная модель содержит солнечную батарею (СБ), энергопреобразовательное оборудование (ЭПО), согласующе-рекуперативную часть (СРС), аккумуляторную батарею (АБ), нагрузку (Н). На схеме также обозначены: W1 – поток энергии, передаваемой от СБ непосредственно или через по-

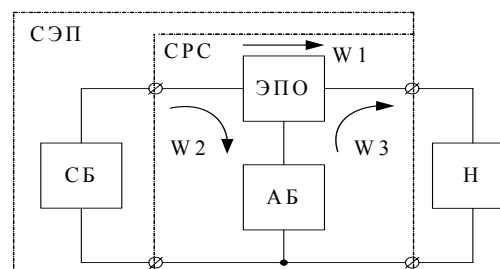


Рис. 1. Энергобалансная модель СЭП КА

следовательный регулятор-стабилизатор напряжения нагрузке;  $W_2$  – поток энергии от СБ к АБ;  $W_3$  – поток энергии от АБ к нагрузке. Энергобалансная модель отражает реальное взаимодействие основных устройств СЭП, распределение энергии между составными частями СЭП и нагрузкой, и является основой для построения автоматизированной системы функционального контроля (АСФК), общая схема которого представлена на рис. 2.

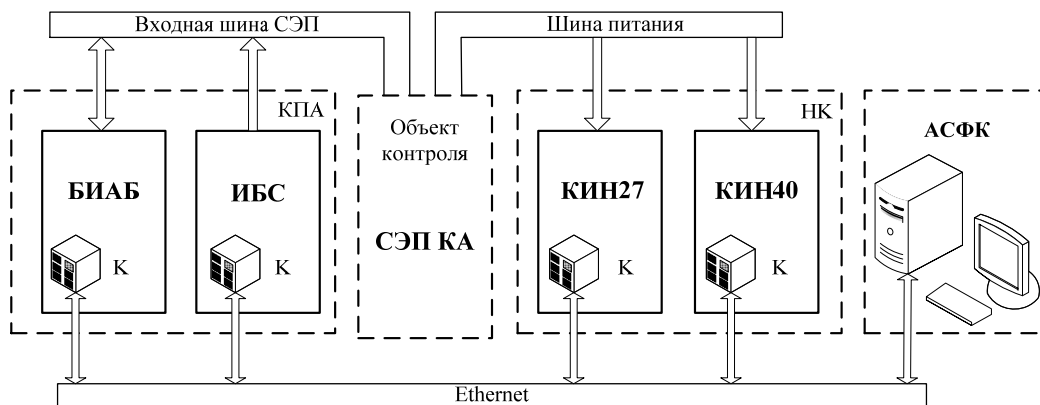


Рис. 2. Структурная схема автоматизированного испытательного комплекса

Автоматизированный испытательный комплекс (см. рис. 2) содержит имитаторы бортовых источников питания (БИАБ, ИБС), а также комплексы имитации нагрузок для различных шин питания (27 В, 40 В). Данные комплексы имитации нагрузок управляются дистанционно посредством Ethernet сети. С помощью программы АСФК можно задавать необходимый для отработки нагрузочный профиль (время–токовая характеристика), а также вести протокол испытаний нагрузочных токов. Следует отметить, что КИН в составе АСФК позволяет полностью автоматизировать процесс нагрузочных испытаний. Для обеспечения аппаратной и программной стыковки имитационных блоков с АСФК каждый КИН содержит контроллер промышленного образца на базе процессорной платы.

Согласно сформулированным требованиям к СЭП, полученным в результате анализа состава электрооборудования КА и энергообменных процессов в системе СЭП–нагрузка, сформулирован ряд основных требований предъявляемых при создании современных нагрузочных комплексов.

Комплекс имитации нагрузки должен содержать:

1. Блок имитации постоянных и плавно изменяющихся нагрузок, формирующий несколько (зависит от напряжения шины питания) ступеней постоянной нагрузки по  $5 \div 10$  А, а также плавно изменяющуюся нагрузку  $0 \div 15$  А с дискретностью 1 А (грубо) и 0,01 А (точно). Должен быть предусмотрен останов регулирования плавной нагрузки в любой точке диапазона по заданному уровню регулирования.

2. Блок имитации комплексной нагрузки (подключение параллельно шине питания емкости и активного сопротивления).

3. Блок разовой коммутации тока, обеспечивающий имитацию пускового тока двигательной нагрузки.

4. Блок имитации переменной нагрузки, обеспечивающий плавное увеличение или уменьшение размаха синусоидального тока нагрузки в диапазоне частот  $20$  Гц  $\div$   $150$  кГц с дискретностью изменения тока не больше 0,5 А и коэффициентом нелинейных искажений синусоидального тока нагрузки не более 5%.

5. Блок имитации скачкообразного (импульсного) изменения нагрузки.

6. Контроллер, обеспечивающий дистанционное управление от ПЭВМ всеми режимами и командами.

Таким образом, для проведения качественных наземно-технических испытаний современных СЭП КА необходимо использовать автоматизированные испытательные площадки, содержащие комплексы имитации нагрузки шины питания.

Проведение настройки и проверки работоспособности любой системы электропитания сопровождается подключением к СЭП КА нагрузки с целью имитации нагрузочных токов реальных СЭП. В подавляющем большинстве случаев в качестве такой нагрузки применяют систему последовательно-параллельного соединения резисторов. Основными достоинствами таких схем нагрузочных

устройств являются их надёжность и простота. Одним из главных недостатков является КПД, равный нулю. Практически вся энергия, потребляемая от исследуемого источника питания, превращается в тепло, не совершая при этом никакой полезной работы. Более того, нагрузочные устройства такого класса крайне затруднительно применять при мощностях СЭП более 1 кВт, потому что резко возрастают их стоимость и массогабаритные показатели. Поэтому в настоящее время перспективным способом построения нагрузочных устройств является энергосберегающая структура, обеспечивающая возможность передачи потребляемой энергии в промышленную сеть переменного тока посредством топологий зависимых инверторов.

При наземных испытаниях СЭП целесообразно применить энергосберегающий способ задания нагрузочных токов, обеспечивая при этом передачу энергии в силовую трёхфазную сеть. Передача энергии от источника постоянного напряжения в сеть переменного тока предполагает наличие в структуре КИН следующих устройств:

1. Внутренний канал стабилизации тока нагрузки  $I_n$ , чтобы СЭП «воспринимала» КИН как двухполюсник реального устройства полезной нагрузки.

2. Устройство повышения напряжения для согласования уровней напряжений шин питания (27, 40, 100 В) со значением напряжения сети.

Блок-схема канала передачи энергии в сеть энергосберегающего КИН представлена на рис. 3, где БПН – блок повышения напряжения; ФВЧ<sub>вх</sub>, ФВЧ<sub>вых</sub> – высокочастотные помехоподавляющие фильтры на входе и выходе БПН; ФВ, ФВИ – соответственно низкочастотные фильтр входа и фильтр ведомого инвертора; ВИ – ведомый трёхфазный инвертор.

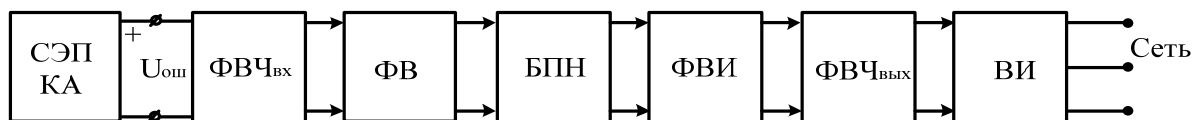


Рис. 3. Схема канала передачи энергии в сеть

Одним из основных требований при проектировании КИН для испытаний СЭП КА являются заданное время и форма фронтов нагрузочного тока. Вариантом возможного решения формирования фронтов заданной длительности и формы является блок-схема формирователя фронтов (ФФ), представленная на рис. 4.

На рис. 4 VT1–VTn – дифференциальные импульсные ключи; БУ – блок управления; БПН – блок повышения напряжения; ДТ – датчик тока. Задачей ФФ является наброс и сброс нагрузки на фиксированную величину совместно с каналом постоянной нагрузки. Для корректного функционирования ФФ разработаны алгоритмы наброса (сброса) тока в общей шине. При этом наброс тока по автономной или дистанционной команде (от внешней ЭВМ) выполняется включенными параллельно общей шине дифференциальными импульсными ключами VT1–VTn с фиксированной заданной нагрузкой.

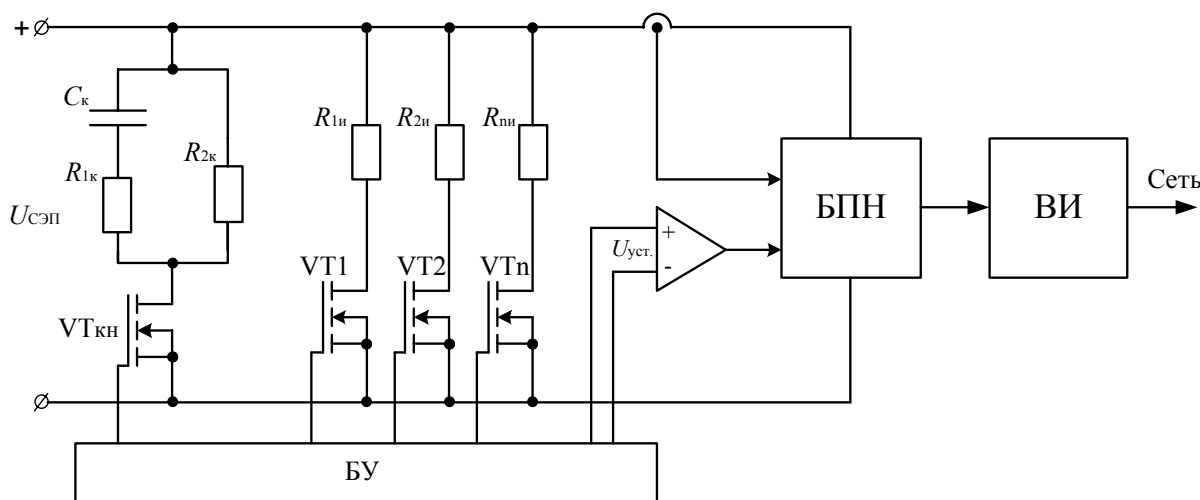


Рис. 4. Блок-схема системы формирования фронтов и подключения комплексной нагрузки

Форма импульса тока наброса дифференцирующего ключа характеризуется крутым передним фронтом и пилообразным спадающим задним фронтом (рис. 5), длительность которого превышает постоянную времени входного регулятора постоянного тока.

Применение отрицательной обратной связи по току (ДТ) позволяет входному регулятору постоянного тока после крутого фронта наброса удерживать ток постоянным и равным заданной сумме величины постоянной нагрузки и скачка тока наброса. При сбросе, наоборот, следует предварительное плавное пилообразное отпирание дифференциальных ключей до величины фиксированного тока (рис. 6).

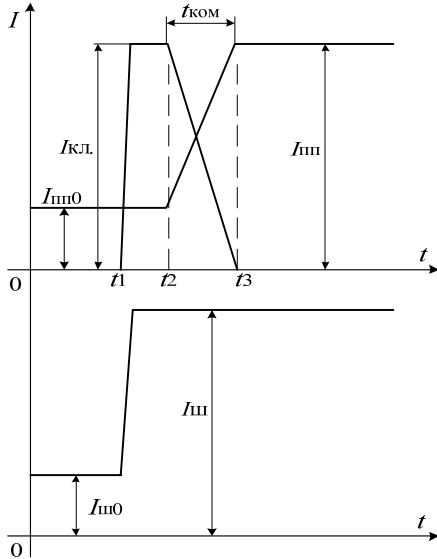


Рис. 5. Диаграмма, поясняющая способ формирования переднего фронта тока наброса

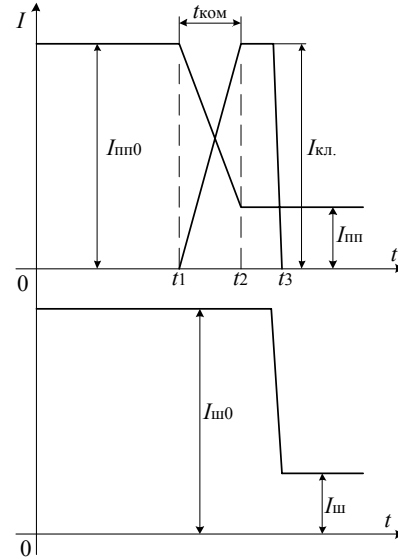


Рис. 6. Диаграмма, поясняющая способ формирования заднего фронта тока сброса

Для получения аналитических выражений необходимо составить математическое описание системы основного канала, для этого разработана математическая модель, опираясь на блок-схему и схемы каждого из блоков в отдельности.

При разработке модели приняты следующие допущения:

1. СЭП – это идеальный источник напряжения, т.е. внутреннее сопротивление равно нулю ( $R_{вн} = 0$ ).
2. Решение системы дифференциальных уравнений проведено не более чем для третьей гармоники, поэтому параметры блоков фильтров радиопомех не учитываются.
3. Значениями индуктивностей и сопротивлений межблочных соединений пренебрегаем, но учитываем параметры кабелей, соединяющих КИН с СЭП КА и силовой трехфазной сетью.
4. Полупроводниковые элементы рассматриваются как идеализированные ключи.
5. Трехфазная силовая цепь есть идеальный потребитель передаваемой мощности.

По разработанным схемам замещения составлены системы дифференциальных уравнений, описывающие зависимости входных токов от параметров схемы нагрузочного устройства, и найдены решения в аналитическом виде для токов основного канала и вышеперечисленных блоков нагрузок, позволяющие проводить проектирование системы и составлять инженерные расчётные выражения (1)–(3):

$$I_{вхВИ} = \frac{U_{вхВИ(1)}^2}{\omega^2 L_{ФВИ}^2 T} \left(1 + (\overline{K\Gamma})^2\right) - \frac{2U_{вхВИ(1)}U_{СФАИ(1)}}{\omega^2 L_{ФВИ}^2 T} \left(1 + (\overline{K\Gamma})^2\right) + \frac{U_{СФАИ(1)}^2}{\omega^2 L_{ФВИ}^2 T}; \quad (1)$$

$$U_{СФВИ} = \frac{I_{вхВИ(1)}^2}{\omega^2 C_{ФВИ}^2 T} - \frac{2I_{вхВИ(1)}I_{вхФВИ(1)}}{\omega^2 C_{ФВИ}^2 T} - \frac{I_{вхФВИ(1)}^2}{\omega^2 C_{ФВИ}^2 T}; \quad (2)$$

$$i_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{U_{\text{СЭП}} - \left( R_k + \sum_{n=1}^k R_n \right)^2 \sum_{n=1}^k \Psi_{n0}^2 \cdot \frac{I_{n(1)}^2}{\omega}}{\left( L_k + \sum_{n=1}^k L_n \right)^2 \sum_{n=1}^k \Psi_{n0}^2}}. \quad (3)$$

С помощью полученных расчётных выражений построены диаграммы токов (рис. 7), показывающие адекватность математических моделей. Сравнение графических зависимостей токов, полученных численным методом и с помощью аналитических выражений, показывает их хорошую сходимость (погрешность  $\pm 10\%$ ), что позволяет рекомендовать полученные аналитические выражения для практического использования.

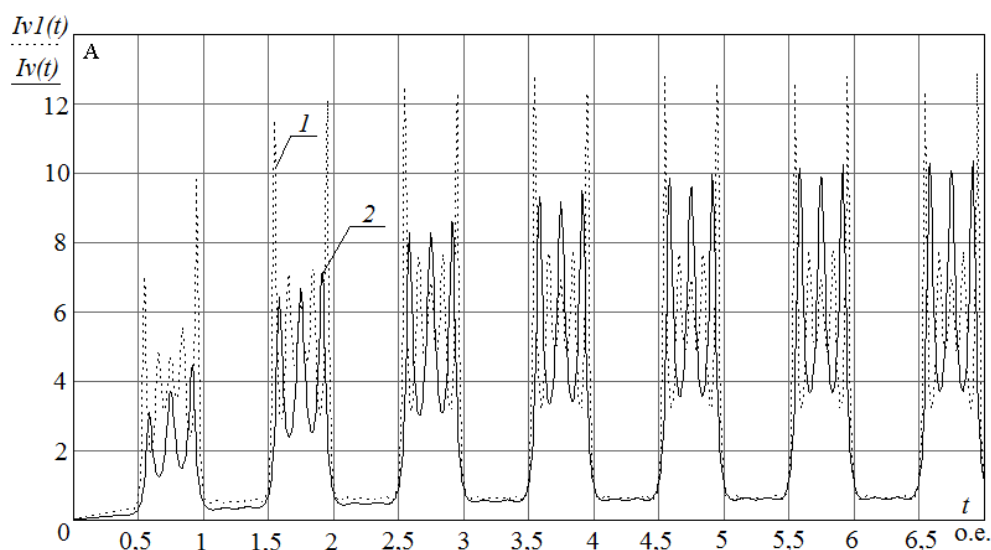


Рис. 7. Диаграммы токов импульсной нагрузки для шины 27 В:  
1 – численное решение, 2 – аналитическое решение

На рис. 8 представлена разработанная схема опытного образца комплекса имитации нагрузки. Данная схема содержит модули, при помощи которых имитируются практически все виды нагрузок. Система управляется блоком БУ, который предусматривает задание автоматических режимов испытаний, обеспечивает диагностику состояния всех силовых модулей и состояние трехфазной сети на соответствие параметрам ГОСТа, ненорму частоты, уровень напряжения. Для обеспечения аварийного отключения от СЭП КА и от сети предусмотрены модули «коммутатор» и «устройство ввода» (УВ). С целью фильтрации низких частот использованы модули БФВх-01, БФВх-02, для фильтрации высоких частот, появляющихся в результате работы ВЧ модулей МПП и МКС, использован блок БФРП.

На опытных образцах комплексов имитации нагрузок проведены экспериментальные исследования и получены осциллограммы токов основного канала нагрузки и всех вспомогательных нагрузочных модулей.

Разработанная энергосберегающая структура комплекса имитации нагрузок для различных шин, 27, 40, 100 В СЭП КА, позволяет получить экономию электроэнергии в пределах 60–70% от его мощности.

Модуль формирователя фронтов тока обеспечивает заданное время переходного процесса при сбросе-набросе нагрузочного тока ( $\approx 10$  мкс) при любой величине имитируемого тока на основной шине.

Устройство импульсной нагрузки позволяет создавать имитацию нагрузочных токов в импульсном режиме с возможностью цифровой регулировки длительности фронта, а устройство гармонической нагрузки обеспечивает возможность проводить испытания СЭП КА в широком диапазоне частот (20 Гц – 150 кГц).

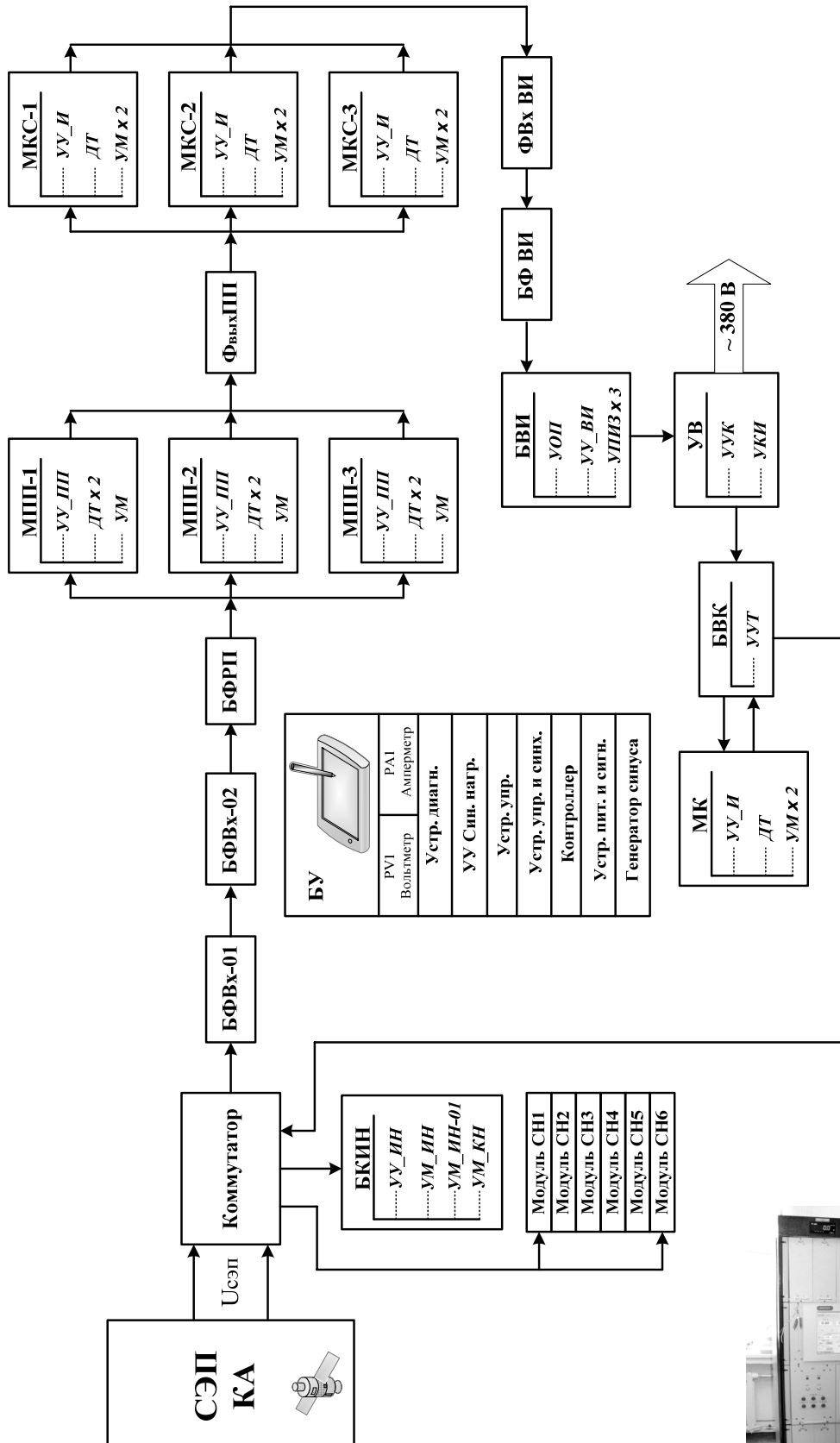


Рис. 8. Блок схема комплекса имитации нагрузок

Рис. 9. Блок имитации нагрузки на шину питания СЭП 100 В, БИН-100



Анализ осциллограмм токов показывает, что расхождение между экспериментальными и расчётными осциллограммами токов составляет 5–7%, что говорит об адекватности математического описания и математических моделей нагрузочных комплексов.

Общий вид опытных образцов блоков имитации нагрузок представлен на рис. 9 [4, 5].

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (мероприятия 1.1, 1.2.1, 1.2.2).

#### *Литература*

1. Юдинцев А.Г. Нагрузочные устройства для испытаний систем электропитания космических аппаратов / А.Г. Юдинцев, Ю.Н. Дементьев, О.В. Бубнов // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 307, №6. – С. 126–130.
2. Кремзуков Ю.А. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / Ю.А. Кремзуков, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, М.Н. Цветков // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 2. – С. 274–280.
3. Юдинцев А.Г. Многофункциональный энергосберегающий имитационный нагрузочный комплекс для систем электропитания космических аппаратов / А.Г. Юдинцев, Ю.Н. Дементьев // Матер. междунар. науч.-техн. конф. «Электротехнические комплексы и системы» (Комсомольск-на-Амуре). – 2010. – С. 142–146.
4. Пат. 50317 РФ. Комплекс имитации нагрузки для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / Мишин В.Н. (РФ), Бубнов О.В. (РФ), Пчельников В.А. (РФ), Юдинцев А.Г. (РФ), Дементьев Ю.Н. (РФ). – 2005. Бюл. №36.
5. Пат. 75755 РФ. Имитатор нагрузок для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / Мишин В.Н. (РФ), Бубнов О.В. (РФ), Пчельников В.А. (РФ), Юдинцев А.Г. (РФ), Иванов В.Л. (РФ), Патрахина О.В. (РФ). – 2008. Бюл. №23.

---

#### **Юдинцев Антон Геннадьевич**

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИИ АЭМ ТУСУРа

Тел.: +7(3822) 56-00-59

Эл. почта: antpoly@mail.ru

#### **Рулевский Виктор Михайлович**

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник НИИ АЭМ ТУСУРа

Тел.: +7(3822) 56-00-59

Эл. почта: rulevsky@mail.ru

#### **Шиняков Юрий Александрович**

Д-р.техн. наук, директор НИИ космических технологий ТУСУРа

Тел.: +7(3822) 90-01-62

Эл. почта: shua@main.tusur.ru

#### **Кремзуков Юрий Александрович**

Науч. сотрудник НИИ АЭМ ТУСУРа

Тел.: +7(3822) 56-00-59

Эл. почта: kremzukov@nii.aem.tomsk.ru

Yudintsev A.G., Rulevskiy V.M., Shinyakov Yu.A., Kremzukov Yu.A.

#### **Automated control system of power-conditioning equipment for spacecraft power systems**

The paper describes the automated system for control, monitoring and testing of power-conditioning equipment for spacecraft power systems using solar and accumulator batteries simulators. The using of the system allows to expand the research area and to adjust power supply systems, to reduce test time and to increase reliability of the spacecraft.

**Keywords:** Automated control system, power system, spacecraft, solar battery simulator, accumulator battery simulator.