

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2022 г. О. Г. Рекутов^{a,b,*}, А. Н. Пучков^b, В. А. Пчельников^b, О. В. Бубнов^b,
А. Г. Юдинцев^b, Ю. А. Кремзуков^b, В. М. Рулевский^a

^a *Томский университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)*
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 40

^b *НИИ автоматики и электромеханики ТУСУР*
Россия, 634034, Томск, ул. Белинского, 53

*e-mail: rekutov@nii.aem.tomsk.ru

Поступила в редакцию 04.10.2021 г.
После доработки 14.10.2021 г.
Принята к публикации 17.10.2021 г.

На основе анализа методов по измерению импеданса энергопреобразующей аппаратуры показан их общий принцип реализации. Предложен измерительный комплекс, реализующий данный принцип применительно к энергопреобразующей аппаратуре для испытания систем электроснабжения космических аппаратов. Комплекс позволяет измерять модуль импеданса в диапазоне частот 10 Гц–10 МГц при напряжении нагрузки до 105 В. При этом, максимальный ток (амплитуда) нагрузки в диапазоне частот до 70 кГц составляет не менее 12.5 А с допустимым снижением максимального значения в диапазоне частот от 70 до 100 кГц по линейному закону до 10 А, в диапазоне частот от 100 кГц до 10 МГц максимальное значение тока снижается с увеличением частоты, но не более 20 дБ/декада. Рассмотрено устройство частотно регулируемой нагрузки для снятия переходных процессов энергопреобразующей аппаратуры, используемой для испытания систем электроснабжения космических аппаратов. Данное устройство позволяет реализовывать специфичные режимы работы, такие как различные вариации взаимных переходов между номинальным режимом и режимами короткого замыкания и холостого хода.

DOI: 10.31857/S0032816222020069

Энергопреобразующая аппаратура (э.п.а.) для испытания систем электроснабжения космических аппаратов состоит из различного рода имитаторов их реального оборудования, предназначенных для воссоздания штатных условий работы в космосе при наземной отработке. В числе данного оборудования можно выделить: имитаторы солнечной батареи (и.б.с.), имитаторы аккумуляторной батареи, имитаторы нагрузки, зарядно-разрядные устройства, автоматизированные системы контроля и т.п. Для успешного выполнения своих задач э.п.а. по своим характеристикам должна быть приближена к реальным образцам и обладать всем необходимым функционалом. Для оценки ее качества измеряется модуль импеданса (м.и.) и снимаются осциллограммы переходных процессов. В качестве примера энергопреобразующей аппаратуры взят и.б.с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

Методы, позволяющие измерить импеданс э.п.а., можно поделить на методы, применяемые в э.п.а., работающей на переменном токе и постоянном токе [1–3]. Для измерения м.и. применимы методы относящиеся ко второй категории, в основе которых лежит общий принцип реализации. В данных методах предполагается подключение динамической нагрузки к выходу э.п.а. Получаемые под действием динамической нагрузки ток и напряжение, измеренные в определенных точках схемы, позволяют рассчитать м.и., причем достаточно знать только переменные составляющие напряжения ($U_{\text{вых пер}}$) и тока ($I_{\text{вых пер}}$):

$$Z_{\text{э.п.а.}} = \frac{U_{\text{вых пер}}}{I_{\text{вых пер}}}. \quad (1)$$

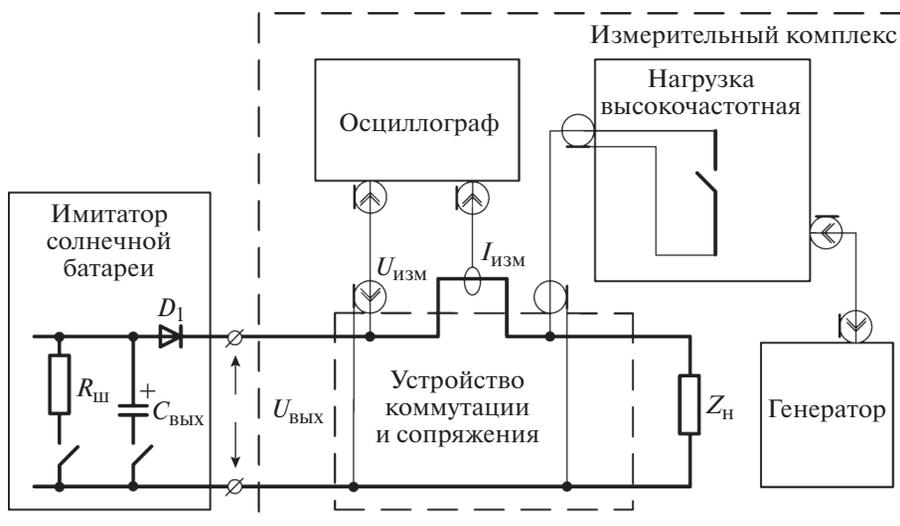


Рис. 1. Структурная схема комплекса измерения импеданса и.б.с.

На рис. 1 представлена структурная схема комплекса измерения модуля импеданса и.б.с. Выходной каскад и.б.с. содержит шунтирующее сопротивление $R_{ш}$, выходную емкость $C_{вых}$ и дифференциальное сопротивление выходного диода R_{D4} . Эти данные входят в формулу расчета импеданса для участка напряжения:

$$Z_i = R_{D4} - \frac{R_{ш} R_{D3}}{i2\pi f C_{вых} R_{ш} R_{D3} + R_{ш} - R_{D3}}. \quad (2)$$

Параллельно статической нагрузке $Z_{н}$ к и.б.с. подключен измерительный комплекс высокочастотной нагрузки через устройство коммутации и сопряжения, с которого на осциллограф выводятся измерительные сигналы $U_{изм}$ и $I_{изм}$. Генера-

тором задается частота синусоидальной высокочастотной нагрузки. Статическая нагрузка $Z_{н}$ определяет положение рабочей точки (А) на вольт-амперной характеристике (в.а.х.) и.б.с. (рис. 2) [4], вблизи которой с учетом небольшого отклонения положения, вызванного работой высокочастотной нагрузки, происходит измерение м.и. Возможность использования различных нагрузок $Z_{н}$ позволяет адаптировать комплекс для измерения м.и. энергопреобразующей аппаратуры различной мощности.

В таблице 1 приведены основные параметры блоков измерительной схемы.

На рис. 3 для примера показаны осциллограммы выходных тока и напряжения для одного из положений рабочей точки на участке напряжения

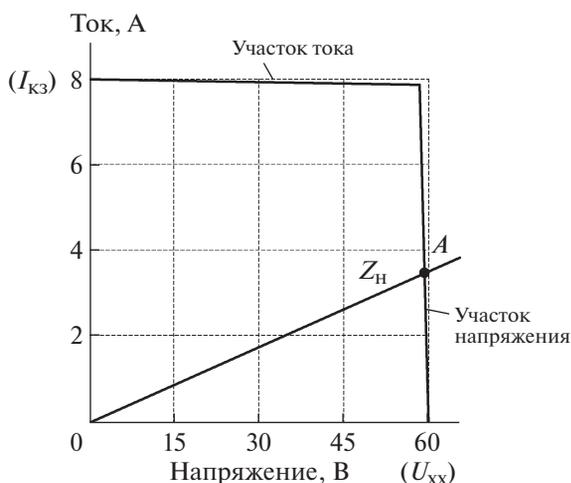


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика и.б.с. и нагрузочная характеристика.

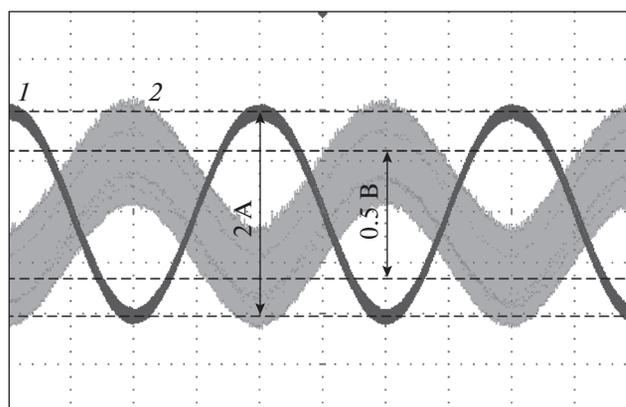


Рис. 3. Осциллограммы для рабочей точки на участке напряжения в.а.х.: 1 – переменная составляющая тока выхода и.б.с. (масштаб 0.5 А/деление); 2 – переменная составляющая напряжения выхода и.б.с. (масштаб – 0.2 В/деление).

Таблица 1. Основные параметры блоков схемы измерения импеданса

Наименование	Основные параметры
Имитатор солнечной батареи	Напряжение холостого хода $U_{xx} = 60$ В, ток короткого замыкания $I_{кз} = 8$ А; шунтирующее сопротивление $1/R_{ш} = 0$ или $1/R_{ш} = 15$ мА/В; $C_{вых} = 0.31 - 3.61$ мкФ
Высокочастотная нагрузка	Напряжение нагрузки 0–105 В, максимальный ток нагрузки (размах) 0–12.5 А в диапазоне 10 Гц–70 кГц, линейное снижение до 10 А в диапазоне 70–100 кГц; снижение с наклоном не более 20 дБ/декада в диапазоне 100 кГц–10 МГц
Нагрузка Z_H	Набор резисторов с малой индуктивностью типа UALN
Осциллограф LeCroy HDO4024AR	Полоса пропускания 200 МГц; частота дискретизации 2.5 ГГц
Система измерения тока, включающая в себя щуп для измерения тока (Tektronix TCP312A) и усилитель измеренного сигнала тока (Tektronix TCSA300)	Полоса пропускания 100 МГц; максимальный ток 30 А
Генератор GW INSTEK GFG-3015	Синусоидальный сигнал; частотный диапазон 10 мГц–100 МГц; выходной уровень 0.01–10 В

в.а.х. для значения частоты синусоидальной нагрузки, равной 500 Гц. В соответствии формуле (1) м.и. равен 0.25 Ом.

На рис. 4 представлены расчетный и измеренные модули импеданса и.б.с. для положения рабочей точки на участке напряжения при разных значениях $C_{вых}$ в логарифмическом масштабе частоты.

Расчетное значение модуля импеданса и.б.с. при большей величине $C_{вых}$ увеличивается относительно аналогичного значения модуля импеданса при меньшей величине $C_{вых}$, что так же закономерно следует из формулы (2). Данные измерений дают более точное представление о модуле импеданса и.б.с. благодаря тому, что учитываются фактические значения активных и реактивных составляющих импеданса и распределенные параметры. Последние образуют параллельные контуры, являющиеся причиной резонансов, проявляющих себя в диапазоне частот 0.1–2 МГц, где можно наблюдать волнообразное увеличение м.и. Кривые измеренных модулей импедансов и.б.с. практически одинаковы, что обусловлено фактическими параметрами резонансных контуров.

Стоит отметить, что описанный комплекс также может быть использован для исследования реакции регуляторов э.п.а. систем электроснабжения космических аппаратов, хотя и не обладает всем необходимым функционалом для полноты исследования.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

Для оценки качества стабилизации выходных параметров э.п.а. необходимо снять переходный процесс стабилизируемой величины при возму-

щающем воздействии, вызванном изменением нагрузки. Э.п.а. систем электроснабжения космических аппаратов работает в специфичных режимах, характеризуемых резкой сменой нагрузки. Так для и.б.с., взятого в качестве примера, возможны вариации взаимных переходов как из режимов работы короткого замыкания или холостого хода к номинальному, так и между этими режимами. При этом пиковые значения мощности могут достигать нескольких единиц киловатт при величинах тока и напряжения в десятки и даже сотни единиц ампер и вольт. Известные способы, предназначенные для снятия переходных процессов э.п.а., в полной мере не позволяют отработать упомянутые выше режимы работы. В работе [1] описан способ получения переходного процесса, основанный на устройстве комбинированного применения, предназначенного также

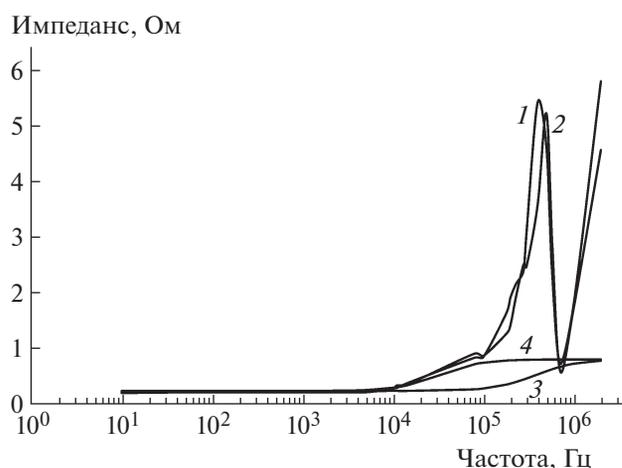


Рис. 4. Модули импедансов и.б.с. для участка напряжения: измеренные для $C_{вых} = 0.31$ мкФ (1) и 3.61 мкФ (2); расчетные для $C_{вых} = 0.31$ мкФ (3) и 3.61 мкФ (4).

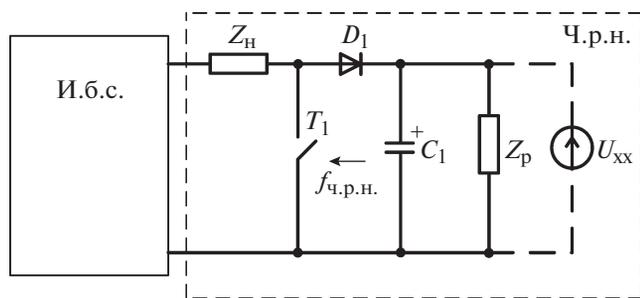


Рис. 5. Схема подключения частотно регулируемой нагрузки (ч.р.н.).

для определения внутреннего импеданса э.п.а. Аппаратная часть и топология силовой схемы, в основе которых лежит операционный усилитель, не позволяют добиться как удовлетворительной мощности нагрузки, так и отработки необходимых режимов.

Для реализации поставленной задачи необходимо использовать решения, в основе которых лежит работа транзисторов в ключевом режиме. В источниках [5, 6] предложенные решения в принципе могут быть использованы для получения необходимого изменения мощности на нагрузке, но не позволяют добиться отработки определенных режимов работы.

На рис. 5 представлена схема подключения частотно регулируемой нагрузки (ч.р.н.), в основе которой лежит работа транзистора T_1 в ключевом режиме с заданной частотой $f_{ч.р.н.}$. Предложенная схема позволяет отработать необходимые режимы работы и.б.с. с требуемой мощностью. По своей топологии схема в некоторых вариантах исполнения может представлять собой топологию повышающего преобразователя, если учесть, что импеданс нагрузки $Z_н$ может содержать индуктивность L , величина которой зависит от типа применяемой нагрузки. На индуктивности, вхо-

дящей в $Z_н$, при коммутации транзистора T_1 выделяется энергия:

$$E_L = \frac{LI^2}{2}, \quad (3)$$

где I – величина тока выхода и.б.с. Через диод D_1 происходит отвод данной энергии на емкость C_1 с последующим разрядом на нагрузку $Z_п$.

Варьируя величиной нагрузок $Z_н$ и $Z_п$ и вводя в схему источник напряжения U_{xx} , можно добиться перехода между требуемыми режимами работы.

Для того чтобы и.б.с. работал со сменой режимов, соответствующих короткому замыканию и номинальному, необходимо выбрать величину нагрузки $Z_н$, равную нулевому значению, а величина нагрузки $Z_п$ должна быть рассчитана в соответствии с номинальным значением тока и напряжения и.б.с. Режиму короткого замыкания будет соответствовать замкнутое состояние транзистора T_1 , а номинальному режиму – разомкнутое. При этом следует учитывать, что номинальный режим после закрытия транзистора T_1 установится через некоторое время, пропорциональное величине емкости C_1 .

Для того чтобы один из режимов работы и.б.с. соответствовал холостому ходу, в схему нужно ввести источник напряжения U_{xx} в соответствии с рис. 5. При этом уровень напряжения U_{xx} должен быть выше уровня напряжения выхода и.б.с. Очевидно, что в таком случае диод D_1 будет заперт, а ток выхода и.б.с. при разомкнутом состоянии транзистора T_1 будет равен нулю, что соответствует режиму холостого хода.

На рис. 6 в качестве примера приведены осциллограммы переходных процессов регулятора и.б.с. и стабилизируемого тока – 8 А, полученные с помощью частотно регулируемой нагрузки.

В данном случае осциллограммы сняты при переходе и.б.с. из режимов работы холостого хода в режим короткого замыкания. С помощью сня-

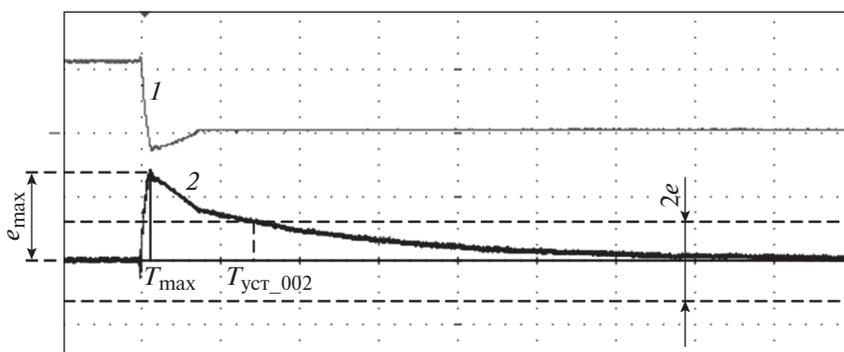


Рис. 6. Осциллограммы переходного процесса: 1 – регулятора и.б.с.; 2 – стабилизируемого тока. Масштаб по вертикали 250 мА/клетка, по горизонтали – 500 мкс/клетка.

тых осциллограмм можно оценить характер реакции регулятора и качество стабилизации тока.

По осциллограмме тока можно определить следующие критерии качества (с учетом масштабов: для времени 500 мкс/клетка, для тока – 250 мА/клетка):

- максимум ошибки регулирования (перерегулирование) $e_{\max} = 355$ мА;
- момент времени $T_{\max} = 60$ мкс, при котором ошибка достигает своего максимума;
- статическую ошибку $e_0 = 10$ мА;
- время установления $T_{\text{уст}_0.02} = 710$ мкс, при котором ошибка не превышает 2% от стабилизируемой величины [7].

ВЫВОДЫ

Представленный комплекс позволяет проводить измерения с достаточно высокой точностью, учитывая все нюансы распределенных параметров импеданса э.п.а. Проведенный анализ методов измерения модуля импедансов э.п.а. обосновывает используемый способ.

Для оценки качества переходных процессов энергопреобразующей аппаратуры для испытания систем электроснабжения космических аппаратов предложено устройство частотно регулируемой нагрузки. Данное устройство представляет модификацию решений, в основе которых лежит работа транзистора в ключевом режиме, адаптированную к энергопреобразующей аппаратуре электроснабжения космических аппара-

тов с учетом необходимой мощности и особенностей режимов работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90177.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Serrano-Finetti R.E., Pallas-Areny R.* // 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference (IMTC 2007). 2007. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IMTC.2007.379348>
2. Keysight Technologies. How can I measure output impedance of a DC power supply? <https://edadocs.software.keysight.com/kkbopen/how-can-i-measure-output-impedance-of-a-dc-power-supply-585473235.html>
3. *Panov Y., Jovanovic M.* // Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2005). 2005. V. 2. P. 1339. <https://doi.org/10.1109/APEC.2005.1453183>
4. *Рекутов О.Г., Рулевский В.М., Пчельников В.А., Иванов В.Л., Юдинцев А.Г.* // Практическая силовая электроника. 2021. № 2 (82). С. 12.
5. *Jim Williams.* Load transient response testing for voltage regulators: Practical considerations for testing and evaluating results. Linear Technology Corp., Milpitas, Calif., Application Note 104. Oct. 2006.
6. Testing a power supply for line and load transients. <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN3453.pdf>
7. *Денисенко В.В.* // Современные технологии автоматизации. 2008. № 1. С. 86.