



В. А. Лесневский, А. В. Румянцев, В. В. Соколов

## ИМИТАТОР ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО МОДУЛЯ

*Изучен вариант построения имитатора динамических и статических нагрузок стационарного плазменного двигателя СПД. Приведена структурная схема моделируемого имитатора с описанием предварительного назначения его основных функциональных блоков. Также рассмотрены методические вопросы оценки точности воспроизведения динамических характеристик имитатором СПД.*

*A variant of designing simulator of SPT electro-dynamic and static forces is considered. The structural diagram of the simulator, which is being modeled, including the description of the preliminary purpose of its functional units is presented. The methodical issues of evaluation of accuracy of dynamic characteristics reproduction by the SPT simulator are also considered.*

**Ключевые слова:** электродинамический имитатор тягового модуля, стационарный плазменный двигатель.

**Key words:** electro-dynamic simulator of a thrust module, stationary plasma thruster.

Сегодня все более широкое применение получают электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) для управления космическими аппаратами (КА).

ЭРДУ представляет собой достаточно сложную функциональную систему, состоящую из СПД, модуля газораспределения (МГР), системы хранения и подачи рабочего тела (СХП), системы преобразования и управления (СПУ). СПУ обеспечивает: требуемые режимы электропитания элементов ЭРДУ; прием и исполнение поступающих команд управления от бортового цифрового вычислительного комплекса (БЦВК) КА; формирование и передачу телеметрической информации в систему телеметрического контроля.

В тяговом модуле конструктивно объединены СПД и МГР. СПД могут функционировать только в условиях глубокого вакуума. Для испытаний двигателей используются специальные стенды, оснащенные мощной откачной системой. Кроме того, такие испытания энергоемки и связаны с большими материальными затратами. Разработчики СПУ не располагают такими стендами, что затрудняет проверку функционирования, настройку и испытания оборудования. Резистивные (статические) имитаторы нагрузки не моделируют реальную работу двигателя, который является генератором широкого спектра колебаний. Кроме того, они не позволяют создавать различные аварийные ситуации, которые могут возникнуть при эксплуатации. Поэтому возникла необходимость в разработке электродинамического имитатора (ЭДИТМ), воспроизводящего функционирование СПД и ЭРДУ в целом на различных режимах работы. Чтобы обеспечить высокую достоверность полученных данных при проведении работ с ЭДИТМ, к изделиям такого типа предъявляются достаточно жесткие требования по статической и динамической точности.

Динамические характеристики частотных характеристик полного сопротивления модуля ЭДИТМ. можно рассмотреть на примере нагрузки системы питания [2]. Структурная схема ЭДИТМ Электропитание блоков от встроенного источника работающего от сетевого

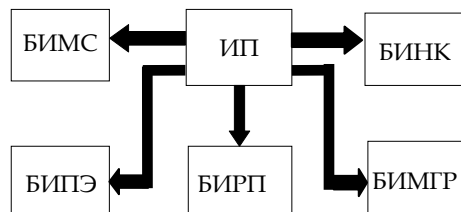


Рис. 1. Структурная схема ЭДИТМ

ки задаются в виде внутреннего аналога имитатора электропитания КА [1; ЭДИТМ осуществляется питания (ИП), напряжения 220 В.

Блок имитации разрядного промежутка воспроизводит как постоянную составляющую, так и колебания разрядного тока СПД. Шумовой характер и частотный спектр колебаний разрядного тока воспроизводятся с помощью генератора шума (ГШ) и соответствуют значениям, характерным при реальной работе двигателя.

На рисунке 2 приведена реальная осциллограмма колебаний анодного тока СПД-70, а на рисунке 3 – имитируемые электродинамическим имитатором ЭДИТМ, по которым видно, что имитируемые БИРП по шумовому характеру и частотному спектру колебания разрядного тока близки к колебаниям реального разрядного тока СПД-70.

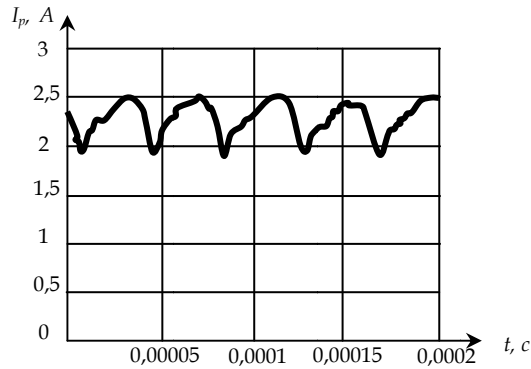


Рис. 2 Колебания анодного тока СПД-70

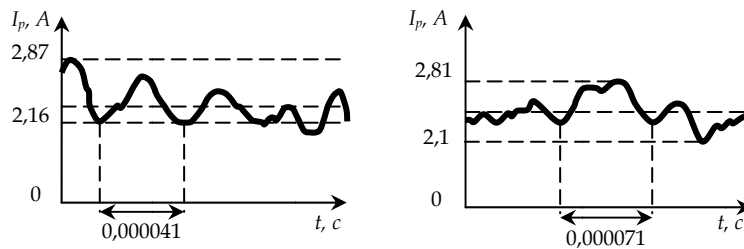


Рис. 3 Колебания анодного тока СПД-70, имитируемые ЭДИТМ

Величина колебаний тока может изменяться ступенчато в широком диапазоне. Если амплитуда токовых колебаний будет превышать величину постоянной составляющей тока, возможно самопроизвольное выключение БИРП, что соответствует имитации самопогасания разряда в СПД. В блоке для измерения фактического значения тока предусмотрен гальванически изолированный датчик.

Спецификой запуска двигателя являются кратковременные униполярные затухающие броски разрядного тока, амплитуда которых может в несколько раз превышать его номинальный уровень. Кроме того, запуск сопровождается скачкообразными изменениями потенциалов катод-корпус. Часто в СПД для электропитания катушек намагничивания не используют специальный источник тока, а магнитное поле создается за счет пропуска по ним разрядного тока. Индуктивность магнитной системы, включенной в разрядную цепь, оказывает существенное влияние на динамические характеристики двигателя. Блок имитатора магнитной системы (БИМС) имитирует импеданс магнитной системы СПД.

В состав СПД входят два плазменных катода-компенсатора, содержащих нагреватели для стартового разогрева. Блок имитатора нагревателей катодов-компенсаторов (БИНК) моделирует их сопротивление, которое увеличивается в несколько раз по мере разогрева. Предусмотрена возможность ручной подстройки сопротивления нагревателей.

В качестве имитируемого нагрузочного параметра рассмотрим возможную функциональную схему, которая представлена в виде двухконтурной системы автоматического регулирования на рисунке 4.

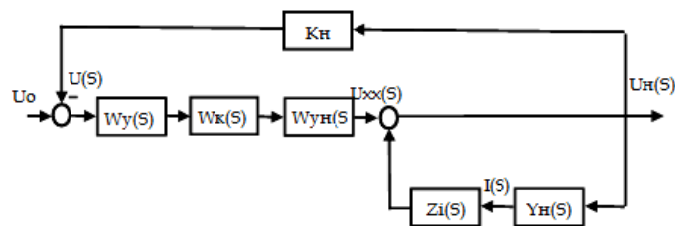


Рис. 4 Функциональная схема БИНК:

$W_y(s)$  – ПФ усилителя;  $W_k(s)$  – ПФ корректирующего устройства;

$W_{yn}(s)$  – ПФ усилителя напряжения;  $Z_i(s)$  – полное внутреннее сопротивление (импеданс) усилителя мощности;  $Y_n(s)$  – полная проводимость нагрузки;  $K_n$  – масштабный коэффициент обратной связи по напряжению



В соответствии с функциональной схемой выражение выходного импеданса  $Z_{\text{вых}}(S)$  электроклапанов и БИМС имеет вид

$$Z_{\text{вых}}(S) = \frac{\Delta U_n(S)}{\Delta I(S)} = \frac{Z_i(S)}{1 + W_y(S) \cdot W_k(S) \cdot W_{yn}(S) \cdot K_n}. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что для уменьшения  $Z_{\text{вых}}(S)$  необходимо уменьшать внутренний импеданс  $Z_i(S)$  усилителя мощности, увеличивать коэффициенты усиления и расширять полосу частот операционного усилителя, усилителя мощности и усилителя напряжения.

Для реализации  $W_k(S)$  в виде RC-цепи удобно применять метод логарифмических частотных характеристик. Таким образом,

$$\lg |W_k(j\omega)| = \lg |Z_i(j\omega)| - \lg |Z_{\text{вых}}(j\omega)| - \lg |W_{oy}(j\omega) \cdot W_{yn}(j\omega) \cdot K_n|.$$

Известно, что для устойчивых (минимально-фазовых) звеньев существует однозначная зависимость между модулем и аргументом. Поэтому для оценки точности воспроизведения импеданса рассмотрим только точность воспроизведения — импедансную частотную характеристику (ИЧХ). Достаточно полно оценить эту точность можно с помощью относительной ошибки следующего вида:

$$\frac{|Z_{\text{вых}}^2(S) - Z_T^2(S)|}{Z_T^2(S)} \leq \delta,$$

где  $Z_T(S)$  — требуемый импеданс,  $\delta$  — относительная погрешность воспроизведения импеданса. Для нормирования  $\delta$  необходимо установить связь между погрешностями воспроизведения ИЧХ и электрических переходных процессов при работе ЭДИТМ на активную нагрузку.

Зная вид нагрузки и вид полного внутреннего сопротивления, можно построить переходные процессы при требуемом и реальном значениях импеданса. Разность переходных процессов оценивается с помощью приведенной ошибки и квадратичной оценки.

Приведенная ошибка позволяет ограничивать разность между установившимися значениями переходных процессов и имеет вид

$$\frac{|U_T(\infty) - U_{\text{вых}}(\infty)|}{U_{xx}} = \delta_{npU},$$

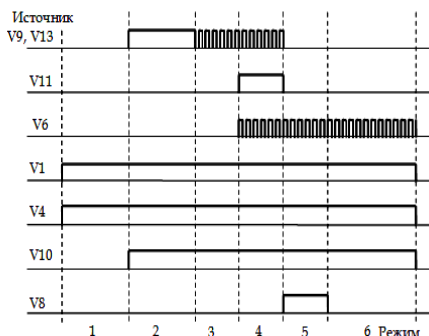
где  $U_T(\infty)$  и  $U_{\text{вых}}(\infty)$  — установившиеся значения переходных процессов при требуемом и реальном значениях импеданса;  $U_{xx}$  — требуемое напряжение холостого хода;  $\delta_{npU}$  — относительная приведенная ошибка по установившемуся напряжению.

МГР включает в себя электроклапаны и термодроссель, обеспечивающий регулирование расхода в магистрали подачи рабочего тела за счет изменения протекающего по нему тока. Блок имитатора модуля газораспределения (БИМГР) имитирует работу МГР, а именно:

- импеданса обмоток электроклапанов;
- инерционные свойства термодросселя;
- функциональную зависимость между током термодросселя и величиной разрядного тока.

Блок имитатора поджигного разряда (БИПЭ) воспроизводит поджигной промежуток плазменного катода-компенсатора. Он моделирует как предпробойное состояние, так и последующее развитие рабочего процесса.

Для работы БИПЭ необходимо выполнение следующих условий: наличие тока БИНК; напря-



жения на имитаторе клапанов МГР; наличие импульсов поджигного напряжения на БИПЭ. При невыполнении любого из этих условий имитация включения СПД не произойдет.

С помощью диаграмм [3] определено наибольшее перерегулирование в системе с 4 замкнутыми обратными связями.

Режимы работы ЭДИТМ обусловлены принципом действия СПД, который реализован алгоритмом работы источников напряжения (рис. 5).

Функции этих источников следующие: V9 замыкает (разрывает) цепь тока НК; V13 задает частоту и длительность

Рис. 5. Алгоритм работы модели при исследовании режимов работы СПД:

- 1 — холостой ход; 2 — накал катода;
- 3 — запуск; 4 — поддержание запуска;
- 5 — короткое замыкание;
- 6 — номинальный режим



поджигающих импульсов; V11 задает низкое сопротивление в режиме поддержания запуска; V6 задает режим работы термодросселя; V1 и V4 включают (выключают) каналы ограничения тока разряда и стабилизации напряжения анод-катод (А – К) соответственно; V10 включает стабилизатор тока НК; V8 задает перегрузку (КЗ) канала (А – К).



Рис. 6. Электродинамический имитатор

На рисунке 6 показан ЭДИТМ – эквивалент электрической нагрузки СПД-70 и МГР. Этот имитатор повышает удобство и достоверность тестирования бортовых систем электропитания под нагрузкой и проверки программного обеспечения. Планируется модернизация ЭДИТМ с целью расширения функциональных возможностей и более полного воспроизведения параметров и характеристик СПД.

#### Список литературы

1. Балакирев Р. В., Сидоров А.С. Об оценке динамической точности имитаторов источников электроэнергии космических аппаратов // Решетневские чтения: сб. науч. тр. СибГАУ им. М. Ф. Решетнева, 2005.
2. Мизрах Е. А., Пойманов Д.Н., Ткачев С.Б. О динамической точности имитаторов электрических характеристик систем электропитания космических аппаратов // Там же.
3. Казанцев Ю. Н., Михайлов М. В. Интегрированная модель каналов электропитания основных элементов стационарного плазменного двигателя // Известия Томского политехнического университета. 2006. №4, Т. 309.

#### Об авторах

Владимир Александрович Лесневский – асп., РГУ им. И. Канта.

Альберт Владимирович Румянцев – канд. физ.-мат. наук, доц., РГУ им. И. Канта, e-mail: albert37@list.ru.

Владимир Валентинович Соколов – гл. специалист, ОКБ «Факел».

#### Athours

Vladimir Lesnevskiy – PhD student, IKSUR.

Dr Albert Rumyantsev – assistant professor, IKSUR, e-mail: albert37@list.ru.

Vladimir Sokolov – chief expert, EDB “Fakel”.