



УДК 629.7

В. А. Лесневский, А. В. Румянцев

## ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОРАКЕТНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ИМИТАТОРА ТЯГОВОГО МОДУЛЯ

90

*Рассмотрен характер колебания разрядного тока стационарного плазменного двигателя. Определен максимальный уровень создаваемых кондуктивных помех во всех режимах работы электродинамического имитатора тягового модуля.*

*The noise nature of discharge current oscillations of the stationary plasma thruster has been revealed. The maximal level of generated low-frequency conducted interferences in all the modes of the electro-dynamic thrust module simulator operation has been determined.*

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

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

Одним из предназначений электродинамического имитатора тягового модуля (ЭДИТМ) является участие в наземных проверках электромагнитной совместимости с системой преобразования и управления (СПУ) и бортовых информационно-управляющих систем космического аппарата (КА).

Разрядный ток работающего стационарного плазменного двигателя (СПД) содержит переменную составляющую — колебания разрядного тока, которые могут навести в кабельной сети КА электромагнитные помехи, способные привести к сбоям в работе бортовых систем.

Задача проверки ЭМС должна решаться проведением огневых испытаний электрореактивной двигательной установки (ЭРДУ) в составе КА [1], что сопряжено с большими техническими трудностями и материальными затратами. ЭДИТМ, имитирующий разрядную цепь СПД, будучи подключенным к СПУ в наземном испытательном комплексе вместо СПД (в части разрядного промежутка), позволяет решить эту задачу со значительно меньшими затратами.

Возможности, заложенные в ЭДИТМ, дают возможность проводить проверки в широком диапазоне уровней разрядного тока и при различных значениях амплитуды его колебаний.

Функциональная схема ЭДИТМ в части имитации магнитной системы (МС) и разрядного промежутка приведена на рисунке 1.

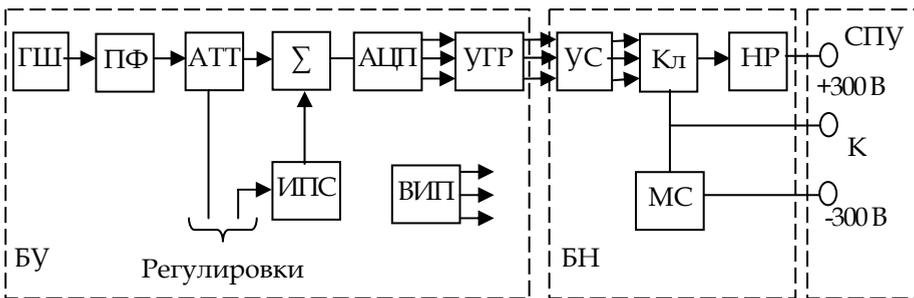


Рис. 1. Функциональная схема ЭДИТМ:

БУ – блок управления; ГШ – генератор шума; ПФ – полосовой фильтр для формирования необходимой частотной характеристики шумового сигнала; АТТ – аттенуатор;  $\Sigma$  – сумматор, суммирующий сигнал генератора шума и регулируемый уровень постоянной составляющей; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УГР – устройство гальванического разделения; ИПС – источник регулируемой постоянной составляющей; ВИП – вторичный источник питания; УС – усилитель выходного сигнала УГР; Кл – быстродействующие электронные ключи; НР – набор резисторов; МС – магнитная система двигателя; БН – блок нагрузок

ЭДИТМ включается в наземный испытательный комплекс так, чтобы БН, который имитирует разрядный промежуток СПД, обеспечивал протекание в анодных цепях СПУ тока, по величине и частотному спектру соответствующего разрядному току реального СПД. При этом БУ формирует сигналы управления блоком БН.

Разрядный ток СПД содержит постоянную и переменную составляющие. Типовая переменная составляющая (колебания разрядного тока) имеет нерегулярный шумовой характер с ярко выраженной центральной частотой спектра на частотах от 20 до 30 кГц при ширине полосы частот по уровню 0,7 от 2 до 12 кГц. Поэтому для формирования колебаний в БУ используется ГШ и полосовой фильтр, обеспечивающий частотный спектр.

Для ступенчатого регулирования величины колебаний вручную или внешними командами используется аттенуатор АТТ. Величина постоянной составляющей регулируется вручную путем изменения выходного напряжения ИПС [2]. Сигналы постоянной и переменной составляющих смешиваются в сумматоре  $\Sigma$  и в аналого-цифровом преобразователе преобразуются в цифровой код.

Тактовая частота АЦП и используемое количество разрядов двоичного кода выбираются из соображения достаточной точности воспроизведения спектра колебаний и величины разрядного тока. Преобразованный в двоичный, код-сигнал поступает на устройство гальванической развязки УГР, обеспечивающее гальваническое разделение цепей управления и разрядных цепей БН и БАТМ и препятствует проникновению электромагнитных помех из БН в БУ и питающую сеть. Каждый разряд двоичного кода имеет свой элемент гальванической развязки.

ВИП преобразует напряжение питающей сети в напряжения, необходимые для функционирования БУ и БН.



В БН ослабленный цепями гальванической развязки сигнал поразрядно усиливается усилителями УС и подается на управление электронными ключами Кл. Каждый ключ подключает к выводам СПУ «+ 300 В» и «К» свою группу параллельно соединенных резисторов. Сопротивление групп по разрядам кода изменяется по закону:

$$R, 2R \dots 2^{n-1} \cdot R,$$

где  $n$  – число разрядов двоичного кода.

Изменяя код управления ключами, можно между выводами «+ 300 В» и «К» имитатора изменять проводимость «разрядного промежутка»:

$$\sigma = \frac{I}{R_{np}},$$

где  $R_{np}$  – сопротивление «промежутка».

Минимальный шаг относительного изменения проводимости при изменении кода

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{1}{2^n}.$$

В случае восьмиразрядного кода  $\sigma$  составит  $\approx 0,78\%$ , то есть проводимость «промежутка» может меняться от значения, определяемого утечками ключей, до  $\sigma = 1,98 / R \approx 2/R$  с шагом  $0,78\%$ .

Каждой кодовой комбинации на входах ключей соответствует, с одной стороны, определенное значение входного напряжения АЦП, с другой – проводимость «разрядного промежутка». Иными словами, каждому значению входного напряжения соответствует определенное значение проводимости «разрядного промежутка». «Минус» анодного напряжения из СПУ подается на ключи через катушки имитатора аналога магнитной системы СПД. При этом замыкается цепь протекания тока анодного источника: вывод «+300 В», НР, Кл, МС, вывод «-300 В». Поэтому проводимость имитатора разрядного промежутка в БН приведет к протеканию такого же тока в анодных цепях СПУ, как и анодный ток реального работающего СПД. Переменная составляющая входного напряжения АЦП приведет к колебаниям проводимости имитатора разрядного промежутка и к колебаниям тока в анодной цепи СПУ таким же, как при работе реального СПД.

Для исследования влияния паразитной емкости катушек МС в ЭДИТМ предусмотрен вывод корпуса магнитной системы, причем на нем присутствует потенциал, имитирующий плавающий потенциал работающего СПД.

Измерения кондуктивных помех проводились по схеме, приведенной на рисунке 2. Токи помех измерялись в плюсовом проводе питания от системы электроснабжения (СЭС).

Перечень режимов работы ЭДИТМ при проводимых испытаниях:

– режим 1 – соответствует работе ЭДИТМ на полную мощность без подключения аккумуляторных батарей;



- режим 2 – соответствует работе ЭДИТМ на полную мощность с подключением аккумуляторных батарей;
- режим КЗП (короткого замыкания).



Рис. 2. Схема измерения кондуктивных помех

При обработке результатов измерений значения уровней создаваемых помех вычислялись по формуле

$$I_{\text{пом}} = U + K ,$$

где  $I_{\text{пом}}$  – ток помех;  $U$  – показания анализатора спектра;  $K$  – коэффициент калибровки токосъёмников.

Увеличение амплитуды напряжений на частотах 1 кГц (90 дБмкВ), 150 кГц (100 дБмкВ), 1 МГц (98 дБмкВ) связано с изменением ширины полосы пропускания измерительного прибора – анализатора спектра.

Рост ширины полосы пропускания увеличивает показания анализатора спектра в соответствии с формулой:

$$U_2 = 20 \lg \left( \sqrt{\frac{\Delta f_2}{\Delta f_1}} \right) + U_1 ,$$

где  $U_2$  – уровень сигнала помех при  $\Delta f_2$ ;  $U_1$  – уровень сигнала помех при  $\Delta f_1$ ;  $\Delta f_2$  – новое значение ширины полосы пропускания;  $\Delta f_1$  – предыдущее значение ширины полосы пропускания.

На рисунке 3 приведен суммарный график построенных по результатам обработки измерений, максимального уровня создаваемых помех во всех режимах работы – кривая 1, требований к помехам, создаваемых оборудованием, – кривая 2, и требований к устойчивости оборудования – кривая 3.

Максимальный уровень создаваемых помех во всех режимах работы ЭДИТМ – кривая 1 – не превышает допустимый уровень требований к устойчивости оборудования – кривую 3. Амплитудно-частотная характеристика токов помех ЭДИТМ практически не меняется при различных режимах его работы.

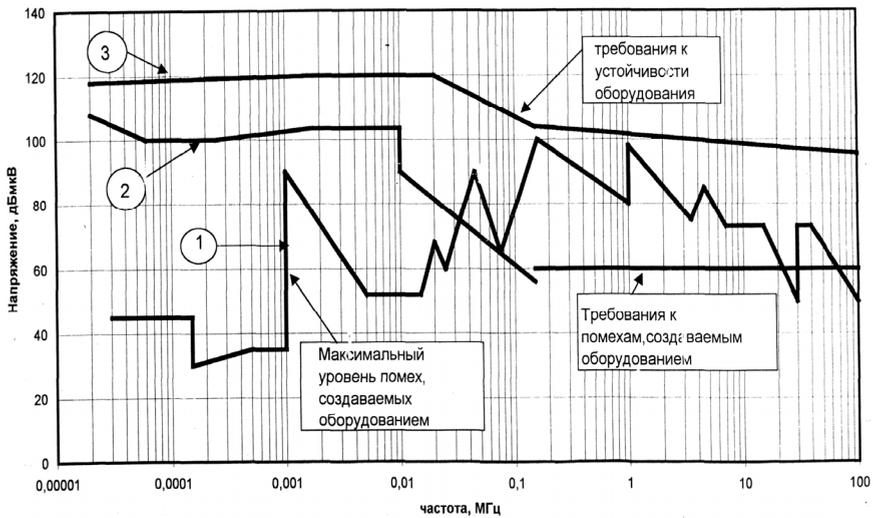


Рис. 3. Суммарные графики, построенные по результатам обработки измерений

По результатам испытаний установлено, что кондуктивные помехи исследуемых систем ЭРДУ не способны оказать существенного влияния на работу смежных систем КА «Экспресс-МД2».

#### Список литературы

1. Яковлев Е.А. Испытания космических электроракетных двигательных установок. М., 1981.
2. Лесневский В. А., Румянцев А. В., Соколов В. В. Имитатор электродинамических характеристик тягового модуля // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 10.

#### Об авторах

Владимир Александрович Лесневский – инженер-конструктор 2-й категории ОКБ «Факел», асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail : albert37@list.ru

Альберт Владимирович Румянцев – канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail : albert37@list.ru

#### About authors

Vladimir Lesnevskiy – engineer-designer, EDB «Fakel», PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail : albert37@list.ru

Albert Rumyantsev – PhD, professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail : albert37@list.ru