

Е. А. МИЗРАХ, А. С. СИДОРОВ

## ОБ АБСОЛЮТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССОВ В ИМИТАТОРАХ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Рассмотрены условия абсолютной устойчивости процессов в имитаторах солнечных батарей. Показано, что абсолютная устойчивость процессов определяется соотношением адмитанса имитатора и адмитанса нагрузки.

*Ключевые слова:* имитатор солнечной батареи, абсолютная устойчивость процессов, нелинейные системы, адмитанс имитатора.

Имитаторы солнечных батарей (ИСБ) получили широкое распространение при наземных экспериментальной отработке и испытаниях энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов (КА). Имитаторы СБ с формированием вольт-амперных характеристик (ВАХ) по цепи обратной связи [1, 2] представляют собой сложные многоконтурные нелинейные динамические системы и характеризуются следующими особенностями, существенно влияющими на устойчивость процессов в имитаторах:

— внешняя характеристика ИСБ является нелинейной функцией, имитирующей ВАХ солнечной батареи;

— внешняя характеристика ИСБ искажается при имитации изменений освещенности, температуры и других факторов околоспутниковой среды, являющихся функциями времени, что требует анализа работы имитатора СБ как нестационарной нелинейной системы.

Вопросы обеспечения устойчивости работы ИСБ при широкодиапазонном регулировании ВАХ и нагрузки изучены недостаточно. Цель настоящей статьи — решение задачи абсолютной устойчивости процессов в имитаторах СБ как частного случая нестационарных нелинейных систем.

Для анализа абсолютной устойчивости процессов в имитаторах СБ, имеющих нелинейные нестационарные ВАХ  $I_{ИСБ}(U, t)$ , предложено применить критерий абсолютной устойчивости процессов в нелинейных САУ, разработанный Наумовым и Цыпкиным [3].

В работе [1] показано, что ИСБ наиболее рационально выполнять в виде стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению. Данную структуру можно разделить на две группы: ИСБ последовательного типа (рис. 1, а), ИСБ параллельного типа (рис. 1, б) [4].

ИСБ последовательного типа содержит стабилизатор тока, в котором источник питания (ИП), усилитель мощности (УМ) и нагрузка (Н) включены последовательно, а ИСБ парал-

лельного типа содержит стабилизатор тока, в котором ИП, УМ и Н включены параллельно. Стабилизаторы тока состоят из ИП, УМ, измерителя тока (ИТ) и усилителя-сумматора (УС). Источником питания ИСБ последовательного типа является источник напряжения, а ИСБ параллельного типа — источник тока. Усилитель мощности осуществляет регулирование тока нагрузки. Устройство функциональной обратной связи (УФОС) воспроизводит ВАХ (статическую характеристику) солнечной батареи  $I_{СБ}(U_H)$  и описывается выражением  $U_{эТ}(U_H) = K_{ИТ} I_{СБ}(U_H)$ , где коэффициент передачи измерителя тока  $K_{ИТ}$  — масштабный коэффициент. Усилитель-сумматор осуществляет сравнение эталонного напряжения  $U_{эТ}$  и напряжения  $U_{ИТ}$ , а также обеспечивает требуемый коэффициент передачи в контуре стабилизации тока.

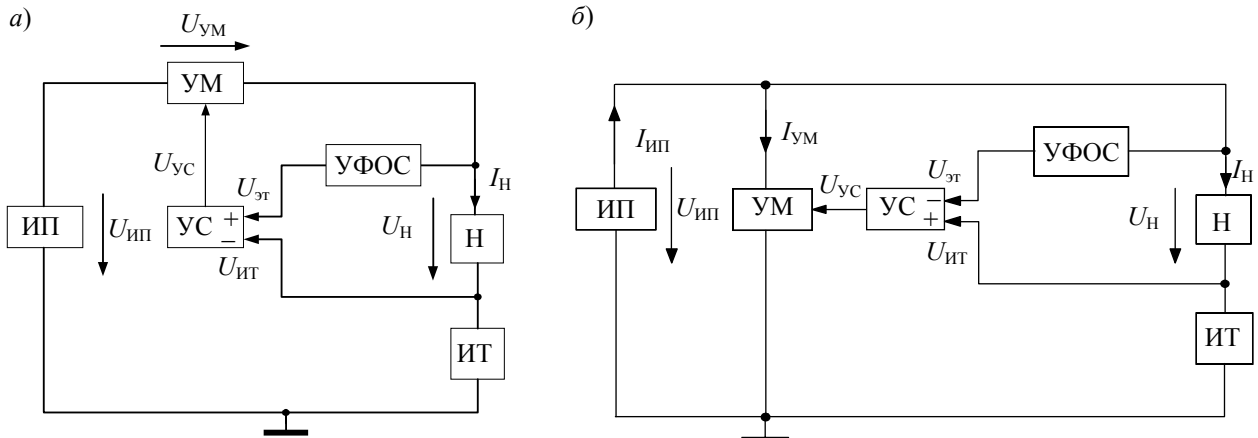


Рис. 1

В работе [5] показано, что малосигнальную модель УФОС можно представить в виде произведения дифференциального коэффициента передачи  $K_{ФОС}(U_{H0}) = \partial U_{эТ} / \partial U_H |_{U_H=U_{H0}} = K_{ИТ} \partial I_{ИСБ} / \partial U_H |_{U_H=U_{H0}}$ , зависящего от точки линеаризации  $U_{H0}$  на ВАХ ИСБ, и передаточной функции  $W_{ФОС}(s)$  с единичным коэффициентом передачи, постоянные времени которой не зависят от точки на ВАХ.

Согласно рис. 1, а система уравнений для приращений переменных имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{ИП} &= \Delta U_H + \Delta U_{ИТ} + \Delta U_{УМ} + \Delta U_{Z_{ИП}}; \\ \Delta U_{эТ} &= -K_{ФОС}(U_{H0}) W_{ФОС}(s) \Delta U_H; \\ \Delta U_{УС} &= W_{УС}(s) (\Delta U_{эТ} - \Delta U_{ИТ}); \\ \Delta I_H &= W_{УМ}(s) \Delta U_{УС} + Y_{УМ}(s) \Delta U_{УМ}; \\ \Delta U_{Z_{ИП}} &= Z_{ИП}(s) \Delta I_H; \\ \Delta U_{ИТ} &= K_{ИТ} \Delta I_H; \\ \Delta U_H &= Z_H(s) \Delta I_H, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $W_{УС}(s)$  — передаточная функция усилителя-сумматора;  $W_{УМ}(s)$  — передаточная функция усилителя мощности по управлению;  $Z_H(s)$  — импеданс нагрузки;  $Y_{УМ}(s)$  — полная выходная проводимость (адмитанс) усилителя мощности,  $Z_{ИП}(s)$  — импеданс источника питания.

Системе (1) соответствует функциональная схема ИСБ (рис. 2), в передаточной функции которого, согласно критерию Наумова — Цыпкина, необходимо выделить линейную часть (ЛЧ). Передаточная функция ЛЧ имеет вид

$$W_{посл}(s) = \frac{\Delta U_{ФОС}(s)}{\Delta U_{эТ}(s)} = \frac{W_{ФОС}(s) W_{УС}(s) W_{УМ}(s) Z_H(s)}{1 + W_{УС}(s) W_{УМ}(s) K_{ИТ} + Y_{УМ}(s) (K_{ИТ} + Z_{ИП}(s)) + Z_H(s) Y_{УМ}(s)}. \quad (1)$$



$$W_{н.посл}(s) = K_{ФОС \max} W_{посл}(s) = \frac{W_{УС}(s)W_{УМ}(s)Z_H(s)W_{ФОС}(s)K_{ФОС}(U_{х.х})}{1 + W_{УС}(s)W_{УМ}(s)K_{ИТ} + Y_{УМ}(s)(K_{ИТ} + Z_{ИП}(s)) + Z_H(s)Y_{УМ}(s)}, \quad (8)$$

при этом условие абсолютной устойчивости процессов принимает вид

$$\text{Re}(W_{н.посл}(j\omega)) \geq -1. \quad (9)$$

Выделяя из знаменателя уравнения (8) выражение  $1 + W_{УС}(s)W_{УМ}(s)K_{ИТ} + Y_{УМ}(s)(K_{ИТ} + Z_{ИП}(s))$  и учитывая формулы (6), (7), получаем для режима холостого хода связь нормированной передаточной функции с адмитансными характеристиками подсистем имитатора СБ и нагрузки:

$$W_{н.посл}(s) = \frac{Y_{ФОС}(s, U_{х.х})}{Y_{ст}(s) + Y_H(s)}. \quad (10)$$

Подставляя уравнение (10) в (9), получаем

$$\text{Re}\left(\frac{Y_{ФОС}(j\omega, U_{х.х})}{Y_{ст}(j\omega) + Y_H(j\omega)}\right) \geq -1. \quad (11)$$

Условие (11) показывает, что абсолютная устойчивость процессов в системе ИСБ—Н зависит от соотношения адмитанса имитатора и адмитанса нагрузки.

Рассмотрим абсолютную устойчивость процессов в ИСБ параллельного типа. Согласно рис. 1, б система уравнений в этом случае имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_{ИП} &= Y_{ИП}(s)\Delta U_{УМ} + \Delta I_{УМ} + \Delta I_H; \\ \Delta U_{эт} &= -K_{ФОС}(U_{Н0})W_{ФОС}(s)\Delta U_H; \\ \Delta U_{УС} &= W_{УС}(s)(\Delta U_{ИТ} - \Delta U_{эт}); \\ \Delta I_{УМ} &= W_{УМ}(s)\Delta U_{УС} + Y_{УМ}(s)\Delta U_{УМ}; \\ \Delta U_{УМ} &= \Delta U_H + \Delta U_{ИТ}; \\ \Delta U_{ИТ} &= K_{ИТ}\Delta I_H, \\ \Delta U_H &= Z_H(s)\Delta I_H. \end{aligned} \right\}$$

Этой системе соответствует функциональная схема, представленная на рис. 3.

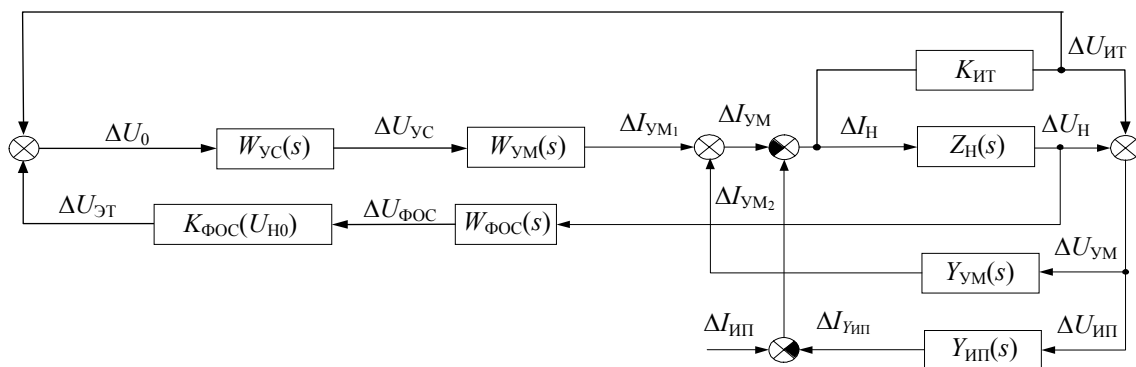


Рис. 3

Проведя аналогичные приведенным выше рассуждения для ИСБ параллельного типа, получим, что передаточная функция ЛЧ определяется как

$$W_{пар}(s) = \frac{W_{ФОС}(s)W_{УС}(s)W_{УМ}(s)Z_H(s)}{1 + W_{УС}(s)W_{УМ}(s)K_{ИТ} + K_{ИТ}(Y_{УМ}(s) + Y_{ИП}(s)) + Z_H(s)(Y_{УМ}(s) + Y_{ИП}(s))}. \quad (12)$$

Адмитанс ИСБ параллельного типа имеет следующий вид:

$$Y_{\text{пар}}(s, U_H) = \frac{\Delta I_H(s)}{\Delta U_H(s)} = \frac{Y_{\text{УМ}}(s) + K_{\text{ФОС}}(U_H)W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))}. \quad (13)$$

Разделив почленно в уравнении (13) числитель на знаменатель, представим адмитанс ИСБ параллельного типа в виде суммы трех слагаемых:

$$Y_{\text{пар}}(s, U_H) = Y_{\text{ст}}(s) + Y_{\text{ФОС}}(s, U_H) + Y_{\text{пр}}(s), \quad (14)$$

где

$$Y_{\text{ст}}(s) = \frac{Y_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))},$$

$$Y_{\text{ФОС}}(s, U_H) = \frac{K_{\text{ФОС}}(U_H)W_{\text{ФОС}}(s)W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))},$$

а  $Y_{\text{пр}}(s)$  — адмитанс источника питания, приведенный к выходу ИСБ:

$$Y_{\text{пр}}(s) = \frac{Y_{\text{ИП}}(s)}{1 + W_{\text{УС}}(s)W_{\text{УМ}}(s)K_{\text{ИТ}} + K_{\text{ИТ}}(Y_{\text{УМ}}(s) + Y_{\text{ИП}}(s))}.$$

Нормированная передаточная функция для ИСБ параллельного типа имеет следующий вид:

$$W_{\text{н.пар}}(s) = K_{\text{ФОС}} \max W_{\text{пар}}(s) = \frac{Y_{\text{ФОС}}(s, U_{\text{x.x}})}{Y_{\text{ст}}(s) + Y_{\text{пр}}(s) + Y_H(s)}. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (15) в (9), получаем

$$\operatorname{Re} \left( \frac{Y_{\text{ФОС}}(j\omega, U_{\text{x.x}})}{Y_{\text{ст}}(j\omega) + Y_{\text{ИП}}(j\omega) + Y_H(j\omega)} \right) \geq -1. \quad (16)$$

Условие (16) аналогично условию (11), т.е. независимо от структуры ИСБ абсолютная устойчивость в системе ИСБ—Н определяется соотношением адмитанса имитатора и адмитанса нагрузки.

Для сравнения запишем условие абсолютной устойчивости процессов в системе солнечная батарея—нагрузка:

$$\operatorname{Re} \left( \frac{Y_{\text{д}}(U_{\text{x.x}})}{Y_C(j\omega) + Y_H(j\omega)} \right) \geq -1, \quad (17)$$

где приняты следующие параметры СБ [6]:  $Y_{\text{д}}(U) = \partial I_{\text{СБ}}(U) / \partial U$  — дифференциальная проводимость,  $Y_C(s) = C_{\text{СБ}}s$  — емкостная проводимость,  $C_{\text{СБ}}$  — емкость СБ.

Сравнивая уравнения (11) и (17), получаем условия соответствия адмитансов ИСБ последовательного типа и СБ:

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{ФОС}}(j\omega, U_{\text{x.x}}) &= Y_{\text{д}}(U_{\text{x.x}}), \\ Y_{\text{ст}}(j\omega) &= Y_C(j\omega). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Сравнивая уравнения (16) и (17), получаем условия соответствия адмитансов ИСБ параллельного типа и СБ:

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{ФОС}}(j\omega, U_{\text{x.x}}) &= Y_{\text{д}}(U_{\text{x.x}}), \\ Y_{\text{ст}}(j\omega) + Y_{\text{ИП}}(j\omega) &= Y_C(j\omega). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Полученные условия (18) и (19) позволяют сформулировать требования к адмитансам подсистем имитаторов солнечных батарей исходя из условий эквивалентности абсолютной устойчивости процессов в системах ИСБ—Н и СБ—Н.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мизрах Е. А. О выборе структуры имитатора первичного источника электроэнергии космического аппарата // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнёва / Под ред. Г. П. Белякова. Красноярск, 2002. Вып. 3.
2. Lloyd S. H., Smith G. A., Infield D. G. Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator // Proc. of the 8th Intern. Conf. on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, UK, Sept. 2000. P. 120—123.
3. Наумов Б. Н. Теория нелинейных автоматических систем. Частотные методы. М.: Наука, 1972. 544 с.
4. Мизрах Е. А., Сидоров А. С. Исследование имитатора солнечных батарей с параллельным непрерывным усилителем мощности // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнёва / Под ред. Г. П. Белякова. Красноярск, 2007. Вып. 4(17). С. 4—8.
5. Мизрах Е. А., Петунин В. М., Сидоров А. С. Проектирование быстродействующего устройства функциональной обратной связи для имитаторов солнечных батарей // Там же. 2010. Прил. к вып. 31.
6. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.

*Сведения об авторах***Енис Аврумович Мизрах**

— канд. техн. наук, профессор; Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра систем автоматического управления, Красноярск; E-mail: enis-home@mail.ru

**Александр Сергеевич Сидоров**

— Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М. Ф. Решетнёва, кафедра систем автоматического управления, Красноярск; ст. преподаватель; E-mail: aladdin\_sane@mail.ru

Рекомендована СибГАУ

Поступила в редакцию  
19.11.10 г.