

О. Н. ГАСПАРЯН, А. З. ЗАХАРЯН, В. А. ХАЧАТРЯН, А. С. КАЗАРЯН,
Г. Г. ЕГИАЗАРЯН

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕЦИЗИОННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕЛЕСКОПА СТАНЦИИ «АСТРОН»

Математическое моделирование на ЦВМ дало возможность провести на этапе эскизного проектирования достаточно полное исследование динамических и точностных характеристик автономной системы прецизионной стабилизации (СПС) положения изображения звезд, наблюдаемых с помощью станции «Астрон» в режимах автосопровождения и офсетного гидирования. При этом учитывались как основные структурные особенности СПС, в частности, взаимные связи в измерительной части, имеющие место при офсетном способе гидирования и приводящие к возмущающему воздействию на отдельные (отдельные) каналы СПС неуправляемого движения телескопа вокруг оптической оси, так и наиболее существенные нелинейности указанных отдельных каналов.

В режиме автосопровождения СПС распадается на два изолированных идентичных канала, блок-схема математической модели которых показана на рис. 1. В процессе разработки был проведен подробный анализ факторов, играющих ту или иную роль в динамическом поведении СПС. Это позволило выделить доминирующие факторы и сделать ряд предположений и допущений, в значительной мере упрощающих, с сохранением основных динамических свойств, математическую модель отдельных каналов, а также сокращающих машинное время, требуемое для моделирования.

Блок-схема астродатчика (АД) на рис. 1 принята в виде последовательного соединения безынерционной нелинейности типа усилителя

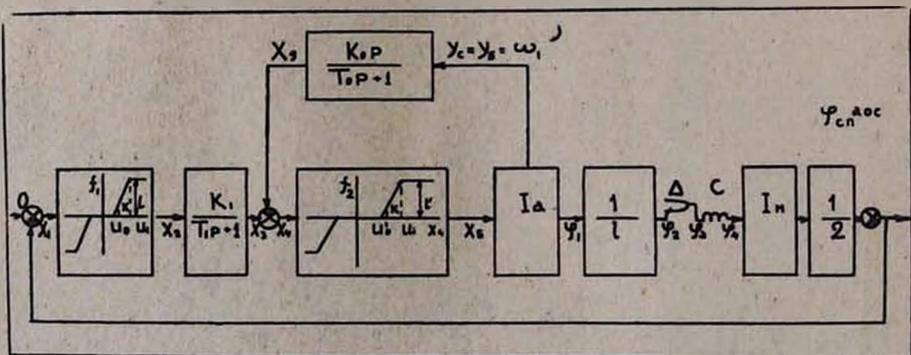


Рис. 1. Блок-схема математической модели отдельного канала СПС

с зонами насыщения и нечувствительности, где величина зоны нечувствительности равна расчетному значению $\Delta_{\text{АД}} = 0,1''$ ошибки АД, и динамического звена, описываемого линейным дифференциальным уравнением первого порядка.

Статическая характеристика усилителя мощности (УМ) также представлена нелинейным звеном с насыщением и зоной нечувствительности $\mu_0^1 = 0,16\text{в}$, где величина последней равна приведенному ко входу УМ падению напряжения на щеточно-коллекторном переходе исполнительного двигателя ДПР-62.

С точки зрения динамической модели наиболее сложными элементами отдельных каналов СПС являются исполнительные двигатели и механические передачи (МП). Составление полной и строгой математической модели МП потребовало бы представления их в виде много-массовых систем с распределенными упругостями, зазорами и моментами трения, что, в свою очередь, привело бы к чрезмерной громоздкости модели СПС и резкому увеличению объема вычислений на ЦВМ. Поэтому в качестве модели МП отдельных каналов была принята двух-массовая система при следующих допущениях, позволяющих с достаточной для целей моделирования точностью учесть основные динамические особенности поведения МП в процессе работы СПС: 1) Момент инерции МП сосредоточен в одном элементе и приведен к валу двигателя. 2) Сухое трение ($M_{\text{тр}} = 60$ гсм) и трение покоя ($M_0 = 80$ гсм) приложены на валу двигателя. Кроме того, на этом же валу и на валу нагрузки имеются моменты вязкого трения, линейно зависящего от угловой скорости вращения. 3) Упругости и люфты имеют сосредоточенный характер и приведены к выходному валу МП. 4) В момент входа МП в зацепление (из зоны люфта) считается, что происходят усреднения угловых скоростей нагрузки и вала двигателя, как при абсолютно жесткой МП (с учетом коэффициента потерь $R = 0,8$), т. е. пренебрегаются все динамические явления, связанные с упругим ударом. 5) Влияние кинематических и циклических погрешностей реализации отдельных колес МП учитывается путем добавления к выходу МП гармонических составляющих вида $\delta F_{\Sigma k} \sin(c_k \varphi_2 + \psi_{\Sigma k})$ и $\delta F_k \sin(z_k c_k \varphi_2 + \psi_k)$, где амплитуды $\delta F_{\Sigma k}$ и δF_k соответственно равны регламентированным по ГОСТ допускам на точность изготовления отдельных колес и их зубьев; φ_2 — угол поворота выхода идеальной МП (без люфта и упругости); c_k — коэффициенты пропорциональности, равные отношению угловых скоростей вращения k -х колес и выходного вала МП; z_k — число зубьев k -х колес; $\psi_{\Sigma k}$ и ψ_k — случайные начальные фазы (при моделировании последним придавались произвольные значения).

Блок-схема программы моделирования, соответствующая модели исполнительного двигателя с МП представлена на рис. 2, где φ_1, ω_1 — угол поворота и угловая скорость вала двигателя; u — напряжение на входе двигателя; L и r — индуктивность и активное сопротивление цепи якоря; i — передаточное число МП; I_n — момент инерции нагрузки; I_d — момент инерции ротора двигателя с учетом приведенного момента инерции МП; $\beta_2 = \beta = 1,25 \cdot 10^7$ гсм/с и $\beta_1 = 0$ — коэффициенты вязкого трения на валах нагрузки и двигателя; C_e и C_m — коэффициенты противоэдс и по моменту двигателя; M_d и $M_{\text{упр}}$ — движущий и упругий моменты; φ_4 и ω_4 — угол поворота и угловая скорость нагрузки без учета кинематических и циклических погрешностей МП; $\Delta = 0,03''$ — величина люфта; $C = 8 \cdot 10^8$ гсм — коэффициент жесткости МП; Δ_1 и Δ_2 — малые величины, вводимые в программу для определения моментов времени прохождения угловой скорости ω_1 вала двигателя и угла скручивания выходного вала МП через нули.

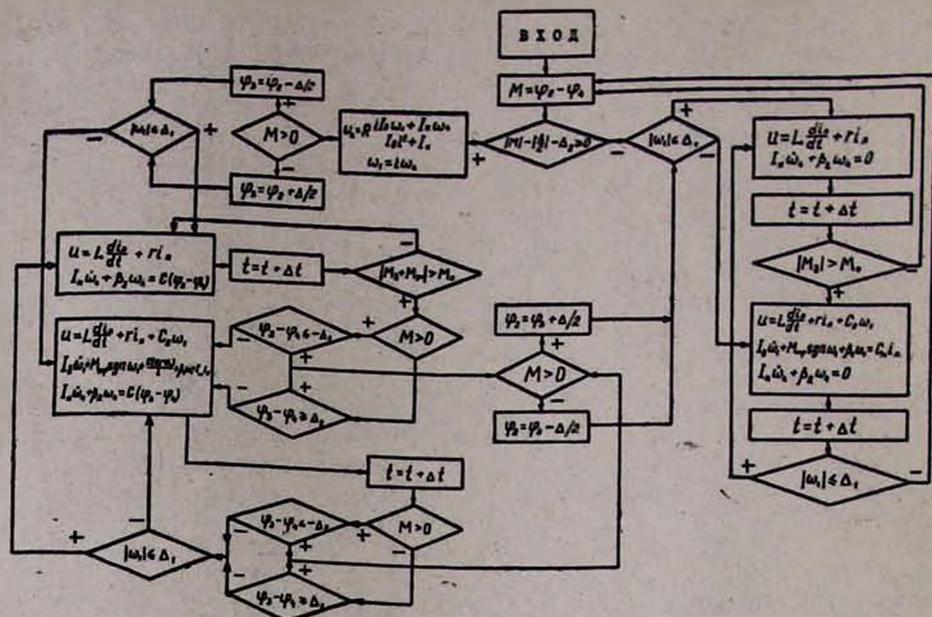


Рис. 2. Блок-схема программы моделирования исполнительного двигателя с МП

Левая часть блок-схемы на рис. 2 соответствует работе отдельного канала СПС при выбранном люфте (в зоне зацепления), а правая часть — в зоне люфта (в зоне раздельного движения нагрузки и вала двигателя). Условием перехода от зоны зацепления к зоне люфта является равенство нулю угла скручивания МП, т. е. отсутствие движущего момента на валу нагрузки со стороны исполнительного двигателя, а условием обратного перехода — равенство разности углов поворота нагрузки и выхода идеальной части МП половине величины люфта. Кроме того, в каждой из указанных зон при прохождении угловой скорости ω_1 через нуль анализируется условие превышения движущего момента, развиваемого исполнительным двигателем, момента трения покоя M_0 .

Динамика одного канала СПС в разных зонах описывается следующими дифференциальными уравнениями:

1. В зацеплении, при $M_0 \leq M_0$.

$$\dot{y}_0 = -\frac{1}{T_1} y_0 + \frac{k_1}{T_1} x_2,$$

$$\dot{y}_1 = -\frac{1}{T_0} y_1 - \frac{k_0}{T_0^2} y_0,$$

$$\dot{y}_2 = -\frac{r}{L} y_2 + \frac{1}{L} x_3,$$

$$\dot{y}_3 = -\frac{\beta}{I_n} y_3 - \frac{C}{I_n} y_4 + \frac{C}{I_n t} y_5,$$

$$\dot{y}_4 = y_3.$$

(1)

2. В зацеплении, при $M_0 > M_0$

$$\begin{aligned} \dot{y}_0 &= -\frac{1}{T_1} y_0 + \frac{k_1}{T_1} x_2, \\ \dot{y}_1 &= -\frac{1}{T_0} y_1 - \frac{k_0}{T_0^2} y_0, \\ \dot{y}_2 &= -\frac{r}{L} y_2 - \frac{C_e}{L} y_0 + \frac{1}{L} x_2, \\ \dot{y}_3 &= -\frac{\beta}{I_H} y_3 + \frac{C}{I_H l} y_5 - \frac{C}{I_H} y_4, \\ \dot{y}_4 &= y_3, \\ \dot{y}_5 &= y_0, \\ \dot{y}_6 &= \frac{C_M}{I_0} y_2 - \frac{M_{TP}}{I_0} \operatorname{sign} y_6 - \frac{C}{I_0 l^2} y_5 + \frac{C}{I_0 l} y_4. \end{aligned} \quad (2)$$

3. В зоне люфта, при $M_0 < M_0$

$$\begin{aligned} \dot{y}_0 &= -\frac{1}{T_1} y_0 + \frac{k_1}{T_1} x_2, \\ \dot{y}_1 &= -\frac{1}{T_0} y_1 - \frac{k_0}{T_0^2} y_0, \\ \dot{y}_2 &= -\frac{r}{L} y_2 + \frac{1}{L} x_2, \\ \dot{y}_3 &= -\frac{\beta}{I_H} y_3, \\ \dot{y}_4 &= y_2. \end{aligned} \quad (3)$$

4. В зоне люфта, при $M_0 > M_0$

$$\begin{aligned} \dot{y}_0 &= -\frac{1}{T_1} y_0 + \frac{k_1}{T_1} x_2, \\ \dot{y}_1 &= -\frac{1}{T_0} y_1 - \frac{k_0}{T_0^2} y_0, \\ \dot{y}_2 &= -\frac{r}{L} y_2 - \frac{C_e}{L} y_0 + \frac{1}{L} x_2, \\ \dot{y}_3 &= -\frac{\beta}{I_H} y_3, \\ \dot{y}_4 &= y_2, \\ \dot{y}_5 &= y_0, \\ \dot{y}_6 &= \frac{C_M}{I_0} y_2 - \frac{M_{TP}}{I_0} \operatorname{sign} y_6. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих уравнениях: k_1, T_1 —коэффициент передачи и постоянная времени АД; k_0, T_0 —коэффициент передачи и постоянная времени цепи гибкой обратной связи по ускорению; $y_0 = x_3$ —выход АД; $y_1 = i_1$; $y_2 = \omega_1$; $y_3 = \varphi_1$; $y_4 = \omega_1$; $y_5 = \varphi_1$; $y_6 = \omega_1$; y_1 —промежуточная переменная; x_2 и x_3 —выходы блоков, характеризующих нелинейные статические характеристики АД и УМ.

Дифференциальные уравнения (1)—(4) дополняются следующими алгебраическими соотношениями

$$x_1 = -\frac{1}{2}(\varphi_4 + \Delta\varphi_2) - \varphi_{\text{сн}}^{\text{abc}},$$

$$x_4 = x_3 - x_0,$$

$$x_0 = y_1 + \frac{k_0}{T_0} y_6,$$

где $\varphi_{\text{сн}}^{\text{abc}}$ —абсолютный угол поворота станции „Астрон“ в инерциальном пространстве; x_0 —сигнал на выходе гибкой обратной связи; $\Delta\varphi_2$ —добавка, обусловленная кинематическими и циклическими погрешностями МП.

С целью анализа динамических характеристик СПС в режиме автосопровождения было проведено моделирование при скачкообразном возмущении $\varphi_{\text{сн}}^{\text{abc}} = -2''$. Результаты показаны на рис. 3 и свидетельствуют об удовлетворительном качестве обработки малых отклонений.

Одним из основных режимов работы СПС является режим наведения при больших начальных отклонениях. На рис. 4 показан процесс обработки системой отклонения $\varphi_{\text{сн}}^{\text{abc}} = -200''$, соответствующего точности ориентации космической станции. Относительно медленное про-

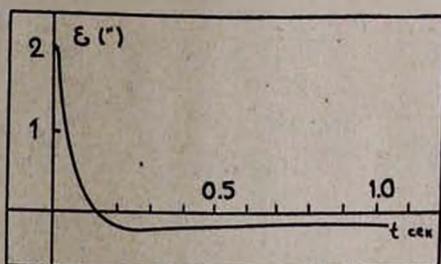


Рис. 3. Моделирование СПС в режиме автосопровождения при малых отклонениях

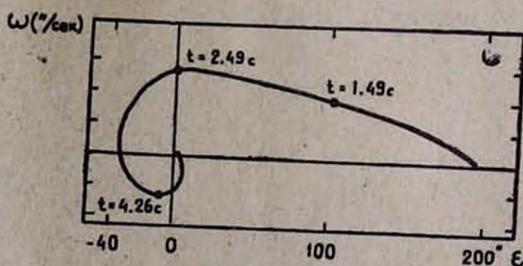


Рис. 4. Моделирование режима наведения СПС

течение процесса наведения ($t_{\text{пер}} = 5,8$ с) и большое перерегулирование ($\delta = 35''$) объясняются сильным демпфирующим влиянием гибкой обратной связи по ускорению.

На рис. 5 даны результаты моделирования СПС в режиме автосопровождения (результаты приведены для одной оси). Движение станции «Астрон» задавалось в виде квадратичной функции времени, на которую накладывалось гармоническое колебание с частотой $f = 1,4$ Гц и амплитудой $A = 0,1''$, характеризующее упругие колебания солнечных панелей.

$$\varphi_{\text{сп}}^{\text{абс}} = \frac{1,8 t^2}{2} + 0,1 \sin(8,8 t).$$

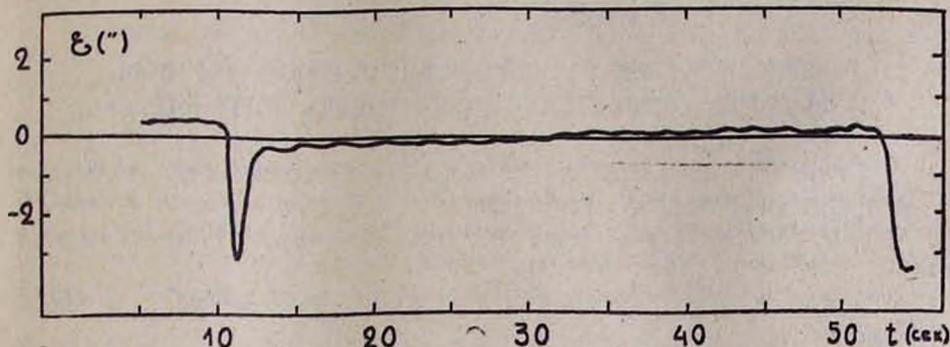


Рис. 5. Моделирование СПС в режиме автосопровождения

Период предельного цикла космической станции был принят равным $T = 43$ с, причем при переходе от одного цикла к другому угловая скорость станции поддерживалась при моделировании постоянной в течение $\Delta T = 0,05$ с (времени работы исполнительных двигателей). Отметим, что скорость в начале и конце принятого предельного цикла ($\dot{\varphi} = 23,2''/\text{с}$) несколько превышала заданную ($\dot{\varphi} = 18''/\text{с}$). Анализ кривой на рис. 5 показывает, что точность работы СПС в режиме автосопровождения удовлетворяет поставленным требованиям.

Было осуществлено также моделирование СПС в офсетном режиме для наихудшего случая максимально возможного угла $\theta = 26'$ между офсетной звездой и оптической осью телескопа (рис. 6). Предель-

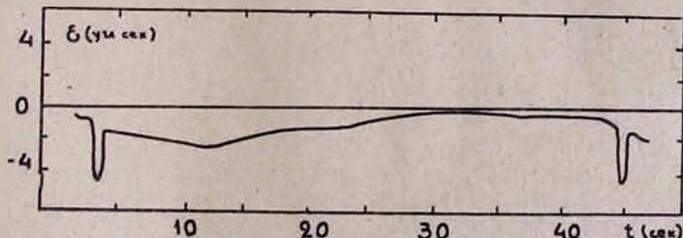


Рис. 6. Моделирование СПС в офсетном режиме

ный цикл качки космической станции вокруг оптической оси телескопа при этом считался смещенным по времени относительно соответствующего цикла по поперечной оси Y на 9 с. Как видно из рис. 6,

установившаяся ошибка стабилизации СПС и в офсетном режиме не превышает заданной.

Таким образом, проведенный анализ результатов математического моделирования на ЦВМ показал, что спроектированная система прецизионной стабилизации телескопа космической станции «Астрон» в целом соответствует поставленным требованиям. Результаты моделирования впоследствии были подтверждены наземными и летными испытаниями СПС.

10 մայ, 1984.

Օ. Ն. ԳԱՏՊԱՐՅԱՆ, Ա. Յ. ՅԱԽԱՐՅԱՆ, Վ. Ա. ԽԱՇԱՏՐՅԱՆ,
Ա. Ս. ԴԱԶԱՐՅԱՆ, Գ. Գ. ԵԴԻԱԶԱՐՅԱՆ

«ԱՍՏՐՈՆ» ՏԻԵԶԵՐԱԿԱՆ ԿԱՑԱՆԻ ԱՍՏՂԱԴԻՏԱԿԻ ԳԵՐՃՇԳՐԻՑ
ԿԱՑՈՒՆԱՑՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԴԵԼԱՎՈՐՈՒՄԸ

Նկարագրված է «Աստրոն» տիեզերական աստղադիտակի գերձզգրիտ կայունացման համակարգի մաթեմատիկական մոդելը ուղիղ և օվսեթային հետևող զործելակարգերում, հաշվի առնելով փոխադարձ կապը կանալների միջև և համակարգի հիմնական ոչգծայնությունները:

Բերված են համակարգի մոդելավորման արդյունքները՝ ստացված ՔՀՄ-ով:

O. N. GASPARIAN, A. Z. ZAKHARIAN, W. A. KHACHATRIAN,
A. S. KAZARIAN, G. G. YEGIAZARIAN

DIGITAL SIMULATION OF THE „ASTRON“ SPACE STATION
TELESCOPE FINE STABILISATION SYSTEM

The mathematical model of fine stabilisation system of the „Astron“ space telescope in direct and offset operation modes is described. In evaluating the model the interconnections between three spatial subsystems and principal non-linearities are taken into account. The results of the computer based system dynamics simulation are given.