УДК 621.316.72

Канд.техн.наук Ю.Н.Соколов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭП КЛА В ПЕРЕМЕННЫХ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

Дальнейшее совершенствование и повышение качества бортовой аппаратуры регулирования и контроля систем электропитания космических летательных аппаратов (БАРК СЭП КЛА), улучшение ее динамических и массогабаритных характеристик с учетом возрастающей сложности этих систем неизбежно приводит к необходимости построения их математических моделей.

В связи с тем, что рассматриваемые системы являются сложными нелинейными динамическими системами с изменяемой структурой и имеют высокий порядок дифференциальных уравнений непрерывной части (свыше 20), целесообразным для моделирования является применение метода простанства состояний. В соответствии с принятым в БАРК методом управления СЭП входным сигналом схемы управления ключами является выходное напряжение дифференцирующего трансформатора $U_{д.т}(t)$, пропорциональное напряжению и производной этого напряжения в нагрузке $U_н(t) = U_{сэп}(t)$, т.е.

$$U_{д.т} = K_1 U_н(t) + K_2 \frac{dU_н(t)}{dt} \qquad (1)$$

Это напряжение поступает на вход управляемого генератора УГ, перестраивая его частоту $f_{уг}(U_{д.т}(t))$

Частота сигнала УГ сравнивается со стабилизированной частотой $f_{эг}$ сигнала эталонного генератора ЭГ, соответствующей номинальному напряжению в нагрузке, т.е. $U_{н.ном} = U_{сэп.ном}$ в исследуемой системе электропитания.

С точки зрения формальной логики частота сигнала ЭГ является функцией номинального напряжения в нагрузке, т.е. $f_{эг} = f_{эг}(U_{н.ном})$.

Выходным сигналом схемы управления ключами является сигнал в виде последовательности прямоугольных импульсов, несущий информацию о разности фаз последовательности прямоугольных импульсов, следующих с частотой $f_{эг}$ и $f_{уг}$:

$$\Delta\varphi(t) = 2\pi \int\limits_{t_0}^{t} \Delta f(\tau)\, d\tau , \tag{2}$$

где t_0 - начальный момент времени,

$$\Delta f(t) = f_{эг} - f_{уг} \tag{3}$$

Получим соотношение для вычисления разности фаз сигналов эталонного и управляемого генераторов для некоторого произвольного интервала времени $iT \le t \le (i+1)T$. При этом сделаем следующие предположения. Учитывая, что ЭГ стабилизирован, его частота практически не зависит от приложенного напряжения в номинальном режиме работы СЭП. В то же время частота УГ существенно изменяет свое значение в зависимости от приложенного к нему напряжения $u_{д.т}(t)$ (с выхода дифференцирующего трансформатора). Будем полагать эту зависимость линейной в окрестности некоторой рабочей точки А.

На основании изложенного имеем

$$f_{уг}(u_{д.т}) = S_{уг} \cdot u_{д.т}(t), \tag{4}$$

где $S_{уг}$ $[Гц/В]$ - крутизна статической характеристики УГ в рабочей точке А.

Подставляя (3) и (4) в (2), получаем в интервале $iT \le t \le (i+1)T$:

$$\Delta\varphi(iT) = 2\pi \int\limits_{iT}^{(i+1)T} \Delta\varphi(\tau)\, d\tau = 2\pi \int\limits_{iT}^{(i+1)T} \left[f_{эг} - S_{уг} \cdot u_{д.т}(\tau) \right] d\tau \tag{5}$$

Ввиду малости периода квантования Т по сравнению с длительностью переходных режимов в такой инерционной системе стабилизации напряжения, как СЭП, можно положить на указанном интервале $iT \le t \le (i+1)T$ $\quad u_{д.т}(iT) = const$.

Это позволяет $u_{д.т}(iT)$ вынести за знак интеграла.

Тогда в результате вычисления интеграла (5) получаем

$$\Delta\varphi(iT) = 2\pi\left[f_{эг}T - S_{уг}T\,u_{д.т}(iT)\right] =$$
$$= 2\pi\left[1 - \alpha u_{д.т}(iT)\right],\ i = 0,1,2,\dots \quad (6)$$

Длительность широтно-модулированных импульсов, управляющих транзисторными ключами регуляторов избыточной мощности, заряда и разряда можно выразить через разность фаз $\Delta\varphi$ сигналов ЭГ и УГ следующим образом :

$$\tau_{1,i} = T_1\,\text{æ}_i\,\Delta\varphi(iT), \quad (7)$$

где

$$\text{æ}_i = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad \Delta\varphi > 0, \\ 0 & \text{при} \quad \Delta\varphi = 0, \\ -1 & \text{при} \quad \Delta\varphi < 0, \end{cases} \quad (8)$$

T_I - некоторая константа, имеющая размерность времени, $T_1 < T$.

Введем в рассмотрение управляющую функцию, определяющую режимы работы БАРК в зависимости от разности фаз $\Delta\varphi$.

$$\Psi[\Delta\varphi(iT)] = \begin{cases} \text{æ}_i & \text{при} \quad iT \le t \le iT + \tau_{1,i} \\ 0 & \text{при} \quad iT + \tau_{1,i} \le t < (i+1)T \end{cases} \quad (9)$$

С учетом непрерывной части динамику АРК с ШИМ можно описать уравнениями в векторно-матричной форме:

$$\dot{x} = Px + h\Psi(\sigma),\ x(t_0), \quad (10)$$

$$\sigma = \gamma x + C \quad (11)$$

где $\sigma = \Delta\varphi$ - управляющий параметр,

$\Psi(\sigma)$ - управляющая функция (скаляр),

P - $n \times n$ - динамическая матрица,

$x = [x_1, \dots, x_n]^T$ - n - вектор состояния,

$h = [h_1 \dots h_2]^T$ - 2 - вектор управления,

$\gamma = [\gamma_1 \dots \gamma_m]^T$ - $m\times 1$ - матрица измерения (строка),

- некоторая константа.

Уравнения (I0) решаются методом припасовывания на интервалах времени, указанных в (9), в зависимости от значения управляющей функции $\psi'(\sigma)$.

Уравнение в форме (I0) можно получить, рассмотрев отдельные режимы работы БАРК. Переход с режима на режим определяется управляющей функцией $\psi(\sigma)$, аргумент которой в свою очередь зависит от состояния БАРК (вектор x).

В качестве элементов вектора состояния $x(t)$ могут быть, например, напряжения в нагрузке $U_н(t)$, производная этого напряжения $dU_н(t)/dt$, напряжения и токи в других частях схемы. Введем для конкретности следующие переменные состояния:

$$x_1(t) = U_н(t), \qquad (I2)$$
$$x_2(t) = \dot{U}_н(t)$$

и получим уравнение измерений в форме (II). Подставляя правую часть уравнения (I) в (6), и заменив iT на t, получаем

$$\sigma = 2\pi - 2\pi\alpha\,(k_1 U_н + k_2 \dot{U}_н)$$

а с учетом (I2) :

$$\sigma = 2\pi - 2\pi\alpha k_1 x_1 - 2\pi\alpha k_2 x_2, \qquad (I3)$$

или

$$\sigma = \left[-2\pi\alpha k_1 \quad -2\pi\alpha k_2\right]\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + 2\pi, \qquad (I4)$$

т.е. здесь $\gamma_1 = -2\pi\alpha k_1$, $\gamma_2 = -2\pi\alpha k_2$, $C = 2\pi$.

Анализируя (I4), видим, что это выражение представлено в форме (II).

Программная реализация алгоритмов (I0) и (II) на ЭВМ позволяет в диалоговом режиме исследовать переходные процессы практически в любой точке системы, исследовать влияние параметров на качество ее работы и находит практическое применение на начальном этапе разработки и проектирования БАРК СЭП.

Разработанная математическая млдель БАРК СЭП и соответствующая программа дают возможность оперативно корректировать качественные показатели динамических процессов в СЭП за счет оптимального выбора параметров схемы и коэффициентов принятого закона управления.