

Д. т. н. В. М. НИКОЛАЕНКО, к. т. н. О. В. НИКОЛАЕНКО,
А. Ю. ВЕНЕДИКТОВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет,
СПКБ "Дискрет"
E-mail: sas@tekom.odessa.ua

Дата поступления в редакцию
18.09 2006 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНДА С ЗАПИРАЮЩИМ ПОТЕНЦИАЛОМ В ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕМЕТРИИ И УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрены особенности построения термофункциональной гипермодели зонда с запирающим потенциалом и адаптация модели к форме, удобной при проектировании устройств телеметрии и управления.

В плазменных исследованиях околоземного и межпланетного пространства широко используются электронные устройства телеметрии и управления космическими объектами. К функциональным возможностям электронной аппаратуры, содержащей устройства данного класса, предъявляются достаточно жесткие требования по их температурной устойчивости.

Процесс проектирования таких устройств требует всестороннего анализа свойств первичных преобразователей параметров плазмы (ППП) на основе моделирования функциональных характеристик разрабатываемой аппаратуры в среде схемотехнических САПР (СхСАПР). Для проектирования в этой среде необходимо предварительно сформировать модели ППП, которые учитывали бы нелинейность их характеристик, динамические свойства. Кроме того, желательно учесть в них влияние температуры T ($T \in [T_{\min}, T_{\max}]$, где $T_{\min}$, $T_{\max}$ — минимальное и максимальное ее значение). Последнее в значительной мере определяет точностные показатели создаваемых устройств [1, 2].

К сожалению, имеющиеся модели ППП построены на основе традиционных принципов физического моделирования, ограниченно учитывают вышеперечисленные особенности датчиков и практически не включают функционального описания действия температуры на характеристики ППП.

Таким образом, для создания температуроустойчивой электронной аппаратуры, предназначенной для проведения исследований космического пространства, требуется разработка теоретических и прикладных аспектов эффективного моделирования ППП с учетом влияния температуры на их функциональные свойства.

Рассмотрим особенности формирования указанных моделей, базируясь на преобразователях параметров плазмы типа зонда с запирающим потенциа-

лом [2]. Конструкция таких ППП упрощенно изображена на рис. 1 (отдельные дополнительные сетки, соединенные с корпусом прибора, не указаны).



Рис. 1. Конструкция преобразователя параметров плазмы типа зонда с запирающим потенциалом:
1 — супрессорная сетка; 2 — управляющая сетка; 3 — коллектор;
4 — корпус ППП

Наиболее целесообразным подходом в плане учета вышеперечисленных свойств исследуемых ППП является термофункциональное гипермоделирование [3], применение которого в данном контексте включает следующие этапы.

В силу конструкции ППП, приведенной на рис. 1, форма термофункциональной гипермодели (ТФГМ) ППП примет вид, показанный на рис. 2, где сохранена нумерация полюсов ППП и введено обозначение напряжения H_r ($r = 1, 3$).

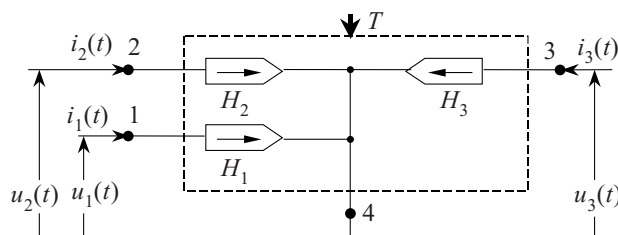


Рис. 2. Термофункциональная гипермодель ППП

Для определения описания гипергенераторов необходимо провести тестирование ППП в соответствии со схемой, изображенной на рис. 3. Здесь генераторы J_r и g_r проводимости предназначены для подачи на полюсы ППП тестовых сигналов вида

$$i_{tr}(t) = I_{tr} 1(t), \quad I_{tr} \in [I_{r \min}, I_{r \max}], \quad (1)$$

где I_{tr} — амплитуда r -го тестового сигнала;
 $I_{r \min}$, $I_{r \max}$ — минимальное и максимальное его значения;
 $1(t)$ — единичная функция [4, с. 790];
 $t > 0$ — произвольный момент времени.

Работа выполнена в рамках Общегосударственной космической программы Украины на 2003—2007 гг.

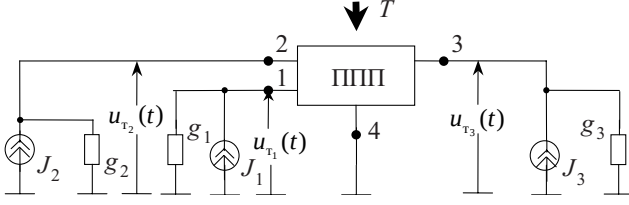


Рис. 3. Схема тестирования ППП

Для формирования описания гипергенераторов ТФГМ ППП + H_r (рис. 2) необходимо обеспечить полный перебор ситуаций по всем переменным

$$T \in [T_{\min}, T_{\max}], I_{tr} \in [I_{r\min}, I_{r\max}], \quad (2)$$

а именно, требуется реализовать следующие варианты:

$$T = T_{\min}, I_{tr} = I_{r\min};$$

$$T = T_{\min}, I_{t1} = I_{1\min}, I_{t2} = I_{2\min}, I_{t3} = I_{3\min} + \Delta I_3; \quad (3)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$T = T_{\min}, I_{t1} = I_{1\min}, I_{t2} = I_{2\min}, I_{t3} = I_{3\min} + m_3 \Delta I_3;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$T = T_{\min} + m_0 \Delta T, I_{t1} = I_{1\min} + m_1 \Delta I_1;$$

$$I_{t2} = I_{2\min} + m_2 \Delta I_2, I_{t3} = I_{3\min} + m_3 \Delta I_3,$$

где $\Delta T, \Delta I_r$ — величины приращения соответствующих переменных;

$$T_{\min} + m_0 \Delta T = T_{\max};$$

$$I_{r\min} + m_n \Delta I_r = I_{r\max};$$

m_n — количество приращений по n -й переменной ($n = \overline{0, 3}$).

В общем случае в процессе реализации вариантов (2), (3) дополнительно следует изменять параметры $\tilde{p} = \{p_1, \dots, p_m\}$, характеризующие состояние плазмы [2]. При этом для построения ТФГМ производится контроль откликов ППП $u_{tr}(t)$ (рис. 3) на тестовые воздействия (1). Аппроксимация этих откликов позволяет получить описание переходных характеристик моделируемого объекта в виде некоторых нелинейных, в общем случае обобщенных, функций [3, с. 20]

$$u_{tr}(t) = \Psi_r(I_{t1}, I_{t2}, I_{t3}, \tilde{p}, T, t). \quad (4)$$

Далее на основе переходных характеристик (4) посредством специальных методов [3] формируется описание гипергенераторов ТФГМ ППП H_r в следующей форме:

$$H_r \equiv u_r(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t F_{1r}[\tilde{z}_1(\tau_1), \tilde{p}, T, t - \tau_1] d\tau_1, \quad (5)$$

где $F_{1r}[\cdot]$ — нелинейная функция, базирующаяся на переходных характеристиках (4); $\tilde{z}_1(\tau_1) = \{z_{11}(\tau_1), \dots, z_{1d}(\tau_1)\}$ — вектор операторов первого уровня типа операторов переходной реакции (ОПР) [3, с. 61]

$$z_{1l}(\tau_1) = \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} F_{2l}[\tilde{z}_2(\tau_2), \tilde{p}, T, \tau_1 - \tau_2] d\tau_2, \quad (6)$$

$$(l = \overline{1, d}),$$

где d — количество операторов соответствующего уровня.

В описании (6) $\tilde{z}_2(\tau_2)$ является также вектором операторов типа ОПР второго уровня. Аналогично соотношению (6) рассматриваются векторы $\tilde{z}_3(\tau_3)$, $\tilde{z}_4(\tau_4)$, ..., $\tilde{z}_{q-2}(\tau_{q-2})$ для соответствующих операторных уровней. Для вектора $\tilde{z}_{q-1}(\tau_{q-1})$ имеем

$$z_{(q-1)l}(\tau_{q-1}) = \frac{d}{d\tau_{q-1}} \int_0^{\tau_{q-1}} F_{ql}[\tilde{i}(\tau_q), \tilde{p}, T, \tau_{q-1} - \tau_q] d\tau_q, \quad (7)$$

где $\tilde{i}(\tau_q) = \{i_1(\tau_q), i_2(\tau_q), i_3(\tau_q)\}$ — токи полюсов ТФГМ ППП.

Непосредственное применение рассмотренной методики (1)–(7) в полном объеме сводится к весьма громоздкой процедуре, требующей значительных временных, вычислительных и аппаратных затрат. Поэтому воспользуемся рядом известных положений, определенных традиционными экспериментальными методами.

Так, для зонда с запирающим потенциалом можно использовать сепарабельное представление динамических и статических свойств [2] в соотношениях (4). Кроме того, для этих ППП влияние вектора $\tilde{p}$ на динамику достаточно ограничено.

В силу отмеченных особенностей определение переходных характеристик (4) и построение представлений (5)–(7) удобно проводить в два этапа, на первом из которых принимается $\tilde{p} = \tilde{0}$ ($p_1 = 0, \dots, p_m = 0$) и определяются зависимости (4) на основе тестовых сигналов (1) без учета статической составляющей.

Проведенные исследования показали, что для зонда с запирающим потенциалом имеют место следующие переходные характеристики:

$$u_{t1}(t) =$$

$$= I_{t1} \frac{1(t)}{S_1(I_{t1}, T)} \left(1 - \exp \left[- \frac{S_1(I_{t1}, T)}{S_2(I_{t1}, I_{t2}^*, I_{t3}^*, T)} t 1(t) \right] \right);$$

$$u_{t2}(t) =$$

$$= I_{t2} \frac{1(t)}{N_1(I_{t2}, T)} \left(1 - \exp \left[- \frac{N_1(I_{t2}, T)}{N_2(I_{t1}, I_{t2}^*, I_{t3}^*, T)} t 1(t) \right] \right); \quad (8)$$

$$u_{t3}(t) =$$

$$= I_{t3}^* \frac{1(t)}{K_1(I_{t3}^*, T)} \left(1 - \exp \left[- \frac{K_1(I_{t3}^*, T)}{K_2(I_{t1}, I_{t2}, I_{t3}^*, T)} t 1(t) \right] \right),$$

где $S_i(\cdot)$, $N_i(\cdot)$, $K_i(\cdot)$ ($i = 1, 2$) — некоторые нелинейные функции; I_{t3}^* — амплитуда тестового тока $i_3(t)$ (1) без учета статической составляющей, зависящей от вектора $\tilde{p}$.

Дополнительные исследования и, в частности, тестирование ППП рассматриваемого типа импульсными сигналами вида

$$i_{tr}(t) = I_{tr}[1(t) - 1(t - \zeta)], I_{tr} \in [I_{\min r}, I_{\max}] \quad (9)$$

позволили определить структуру математического представления гипергенераторов (рис. 2) (5)–(7). (Здесь I_{tr} — амплитуда r -го импульсного сигнала, а $I_{\min r}, I_{\max}$ — минимальное и максимальное его значения; $\zeta > 0$ — длительность импульсных сигналов.)

Эти математические представления получены на основе метода частных функций [3] и могут быть описаны следующим образом:

$$H_r \equiv u_r(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t F_{1r}[z_{11}(\tau_1), z_{12}(\tau_1), T, t - \tau_1] d\tau_1, \quad (10)$$

где функция $F_{1r}[\dots]$ имеет вид

$$F_{1r}[z_{11}(\tau_1), z_{12}(\tau_1), T, t - \tau_1] = \exp[-z_{11}(T, \tau_1)] z_{12}(T, \tau_1) 1(t - \tau_1). \quad (11)$$

Операторы первого уровня, входящие в описание (11), представимы соотношениями

$$z_{11}(T, \tau_1) = \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} (\tau_1 - \tau_2) d\tau_2; \quad (12)$$

$$z_{12}(T, \tau_1) = \frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} F_{2r}[z_2(\tau_2), i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T, \tau_1 - \tau_2] d\tau_2, \quad (13)$$

где $f_{11}(\cdot) = S_1(\cdot)$; $f_{12}(\cdot) = N_1(\cdot)$; $f_{13}(\cdot) = K_1(\cdot)$; $f_{21}(\cdot) = S_2(\cdot)$; $f_{22}(\cdot) = N_2(\cdot)$; $f_{23}(\cdot) = K_2(\cdot)$.

Функция $F_{2r}[\dots]$ в выражении (13) описывается следующим образом:

$$F_{2r}[z_2(\tau_2), i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T, \tau_1 - \tau_2] = \frac{i_r(\tau_2)}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} \exp[z_{2r}(T, \tau_2)] (\tau_1 - \tau_2), \quad (14)$$

где оператор второго уровня $z_{2k}(\cdot)$ имеет вид

$$z_{2r}(T, \tau_2) = \frac{d}{d\tau_2} \int_0^{\tau_2} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_3), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_3), i_2(\tau_3), i_3^*(\tau_3), T]} (\tau_2 - \tau_3) d\tau_3. \quad (15)$$

Подстановка выражений (11)–(15) в формулу (10) дает описание гипергенераторов в следующей форме:

$$H_r \equiv u_r(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t 1(t - \tau_1) \times \left\{ \exp \left[-\frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} (\tau_1 - \tau_2) d\tau_2 \right] \times \left(\frac{d}{d\tau_1} \int_0^{\tau_1} \frac{i_r(\tau_2)}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} (\tau_1 - \tau_2) \times \exp \left[\frac{d}{d\tau_2} \int_0^{\tau_2} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_3), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_3), i_2(\tau_3), i_3^*(\tau_3), T]} (\tau_2 - \tau_3) d\tau_3 \right] d\tau_2 \right) \right\} \times d\tau_1. \quad (16)$$

Соотношение (16) описывает гипергенераторы H_r (рис. 2) на основе операторов типа ОПР первого и второго уровня (5)–(7). Его можно упростить, вос-

пользовавшись правилом Лейбница для дифференцирования операторов, зависящих от параметров [4]. После указанного преобразования описание (16) принимает вид

$$H_r \equiv u_r(t) = \exp \left[-\int_0^t \frac{f_{1r}[i_r(\tau_1), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3^*(\tau_1), T]} d\tau_1 \right] \times \int_0^t \frac{i_r(\tau_1)}{f_{2r}[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3^*(\tau_1), T]} \times \exp \left[\int_0^{\tau_1} \frac{f_{1r}[i_r(\tau_2), T]}{f_{2r}[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3^*(\tau_2), T]} d\tau_2 \right] d\tau_1. \quad (17)$$

На втором этапе построения ТФГМ ППП (рис. 2) необходимо учесть влияние вектора $\tilde{p}$ посредством статической составляющей тока $i_3(t)$, который представим следующим образом:

$$i_3(t) = i_3^*(t) + i_{30}(t), \quad (18)$$

где $i_{30}(t) = \Phi(\tilde{p}, u_{10}(t), u_{20}(t), u_{30}(t), T)$; $\Phi(\dots)$ — некоторая нелинейная функция, в общем случае зависящая от статических составляющих напряжения на полюсах ППП.

Традиционно для зонда с запирающим потенциалом функцию $\Phi(\dots)$ можно представить в виде [2, с. 46]

$$\Phi(\tilde{p}, u_{10}(t), u_{20}(t), u_{30}(t), T) = A(a, s, v, \theta) \times \sum_{\mu=1}^m M_{\mu} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}(x_{\mu}) + B(a_{\mu}, u_{20}, T) \right] + c, \quad (19)$$

где a — коэффициент прозрачности управляющей сетки;
 s — площадь входного отверстия;
 v — параллельная составляющая скорости ионов;
 θ — угол, определяющий направленность ППП;
 m — количество ионных компонент;
 M_{μ} — концентрация ионов μ -го "сорта";
 a_{μ} — тепловая скорость ионов с массой m_{μ} ;
 c — фон.

Параметр x_{μ} определяется соотношениями

$$x_{\mu} = \begin{cases} (1/a_{\mu}) \left[v \cos \theta - \sqrt{2q(u_{20} + \varphi)/m_{\mu}} \right] & \text{при } u_{20} + \varphi \geq 0; \\ (1/a_{\mu}) v \cos \theta & \text{при } u_{20} + \varphi < 0, \end{cases} \quad (20)$$

где q — заряд электрона;
 φ — потенциал корпуса.

Величина тепловой скорости ионов описывается формулой

$$a_{\mu} = \sqrt{2kT/m_{\mu}}, \quad (21)$$

где k — постоянная Больцмана.

Окончательно описание гипергенераторов ТФГМ ППП (рис. 2) с учетом выражений (17)–(21) можно представить следующим образом:

$$H_1 \equiv u_1(t) = \exp \left\{ -\int_0^t \frac{S_1[i_1(\tau_1), T]}{S_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]} d\tau_1 \right\} \times$$

$$\begin{aligned} & \times \int_0^t i_1(\tau_1) (S_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T])^{-1} \times \\ & \times \exp \left\{ \int_0^{\tau_1} S_1[i_1(\tau_2), T] (S_2[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3(\tau_2) - \right. \\ & \left. - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T])^{-1} d\tau_2 \right\} d\tau_1; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} H_2 \equiv u_2(t) = & \exp \left\{ - \int_0^t \frac{N_1[i_1(\tau_1), T]}{N_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]} d\tau_1 \right\} \times \\ & \times \int_0^t i_2(\tau_1) (N_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T])^{-1} \times \\ & \times \exp \left\{ \int_0^{\tau_1} N_1[i_1(\tau_2), T] (N_2[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3(\tau_2) - \right. \\ & \left. - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T])^{-1} d\tau_2 \right\} d\tau_1; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} H_3 \equiv u_3(t) = & \exp \left\{ - \int_0^t \frac{K_1[i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]}{K_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]} d\tau_1 \right\} \times \\ & \times \int_0^t [i_3(\tau_1) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T)] (K_2[i_1(\tau_1), i_2(\tau_1), i_3(\tau_1) - \\ & - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T])^{-1} \exp \left\{ \int_0^{\tau_1} K_1[i_3(\tau_2) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \times \right. \\ & \left. \times (K_2[i_1(\tau_2), i_2(\tau_2), i_3(\tau_2) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T])^{-1} d\tau_2 \right\} d\tau_1, \end{aligned} \quad (24)$$

где $u_{20} = u_{20}(t)$; $\Phi(\dots)$ соответствует выражению (19).

В некоторых случаях непосредственное применение описаний ТФГМ ППП в форме (22)—(24) в среде СхСАПР вызывает определенные затруднения. Поэтому в таких ситуациях целесообразно представлять гипермодели в элементном базисе используемой СхСАПР, т. е. адаптировать их по форме на основе известных методов [3, с. 192] при сохранении полной адекватности ТФГМ. Для реализации этого подхода в данном случае достаточно продифференцировать соотношения (22)—(24) по t , что приведет к следующей системе уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= G_1[i_1(t), T]u_1(t) + C_1[i_1(t), i_2(t), i_3(t) - \\ &- \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_1}{dt}; \\ i_2(t) &= G_2[i_2(t), T]u_2(t) + C_2[i_1(t), i_2(t), i_3(t) - \\ &- \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_2}{dt}; \\ i_3(t) &= \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T) + G_3[i_3(t) - \\ &- \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T]u_3(t) + C_3[i_1(t), i_2(t), i_3(t) - \\ &- \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_3}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где $G_1[\dots] = S_1[\dots]$; $C_1[\dots] = S_2[\dots]$; $G_2[\dots] = N_1[\dots]$; $C_2[\dots] = N_2[\dots]$; $G_3[\dots] = K_1[\dots]$; $C_3[\dots] = K_2[\dots]$.

Этой системе уравнений соответствует адаптированная форма ТФГМ (рис. 4), которая полностью адекватна гипермодели ППП (рис. 2, соотношения (22)—(24)).

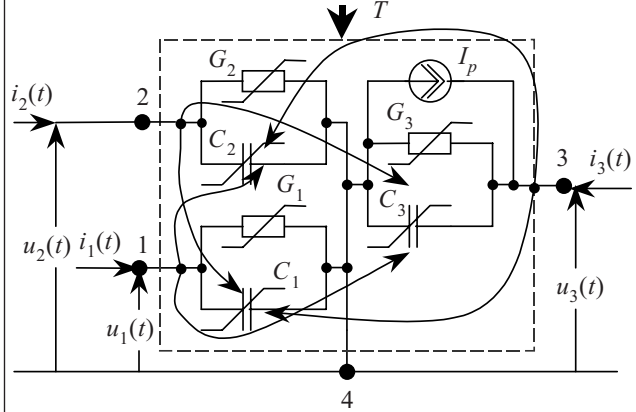


Рис. 4. Адаптированная форма ТФГМ ППП

Несмотря на то, что адаптация гипермодели основывается на формальных математических преобразованиях [3], в полученной форме (рис. 4) можно выявить конкретный физический смысл. Так, конденсаторы C_1, C_2, C_3 иллюстрируют наличие емкостей между полюсами ППП и его корпусом, но т. к. они управляются токами других полюсов (управление показано стрелками), то эти конденсаторы идентифицируют также емкостную связь полюсов между собой. Наличие токов утечки между полюсами ППП и его корпусом моделируется проводимостями G_1, G_2, G_3 . Источник тока I_p зависит от параметров плазмы $\tilde{p}$ (19), в частности, от концентрации ионов заданных типов.

В практических случаях в качестве функций $S_i(\cdot)$, $N_i(\cdot)$, $K_i(\cdot)$ ($i = 1, 2$) удобно использовать полиномиальное представление [3, 4]. При этом возможна сепарабельная зависимость конденсаторов C_1, C_2, C_3 от токов полюсов ППП. Такое описание указанных конденсаторов позволяет получить следующее представление системы уравнений (25):

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= G_1[i_1(t), T]u_1(t) + C_{11}[i_1(t), T] \frac{du_1}{dt} + \\ &+ C_{12}[i_2(t), T] \frac{du_1}{dt} + C_{13}[i_3(t) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_1}{dt}; \\ i_2(t) &= G_2[i_2(t), T]u_2(t) + C_{21}[i_1(t), T] \frac{du_2}{dt} + \\ &+ C_{22}[i_2(t), T] \frac{du_2}{dt} + C_{23}[i_3(t) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_2}{dt}; \\ i_3(t) &= G_3[i_3(t) - \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T)] + \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T) + \\ &+ C_{31}[i_1(t), T] \frac{du_3}{dt} + C_{32}[i_2(t), T] \frac{du_3}{dt} + C_{33}[i_3(t) - \\ &- \Phi(\tilde{p}, u_{20}, T), T] \frac{du_3}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Этой системе уравнений соответствует адаптированная форма ТФГМ ППП, изображенная на рис. 5. В этой форме наглядно представлена емкостная связь всех элементов ППП между собой, что иллюстрирует физическую интерпретацию ТФГМ ППП.

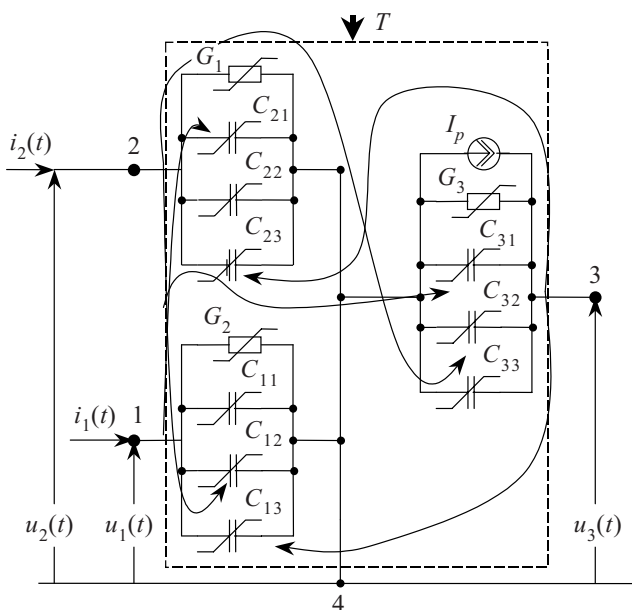


Рис. 5. Адаптированная форма ТФГМ ППП с сепарбельным представлением емкостей

Проверка адекватности ТФГМ ППП базируется на оценке отклонений выходных сигналов для заданных воздействий — как по параметрам $\tilde{p}$, так и по действующим напряжениям на сетках и коллекторе зонда с запирающим потенциалом.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование предложенных представлений (рис. 2, (22)—(24) и рис. 4, (25), рис. 5, (26)) позволяет при незначительных затратах обеспечить погрешность гипермодели ППП, не превышающую $\pm 10\%$.

В заключение отметим следующее.

Во-первых, предложенный подход достаточно универсален и может быть успешно применен при формировании термофункциональных гипермоделей преобразователей параметров плазмы других типов [1, 2].

Во-вторых, получаемые гипермодели в общем виде (рис. 2) и в адаптированной форме (рис. 4, 5)

представляют собой адекватное объединение соответственно математической и физической модели ППП. Первая из них в абстрактной форме, без конкретизации структуры и происходящих в ней процессов, описывает основные свойства моделируемого объекта. Вторая форма гипермодели учитывает конструкцию ППП и имеющиеся в ней связи и взаимные влияния, а также представляет объект моделирования в виде эквивалентной электрической схемы (рис. 4, 5).

В-третьих, в ТФГМ учтены все динамические особенности и нелинейные свойства моделируемого объекта, а также влияние на них температуры. При этом качество отображения указанных особенностей и свойств определяется параметрами реализации тестовых сигналов (1), точностью регистрации откликов и погрешностью аппроксимации переходных характеристик (4), что позволяет отказаться от специальных индивидуальных измерительных процедур и дополнительных оригинальных методик обработки экспериментальных данных.

В-четвертых, ТФГМ ППП общего вида (рис. 2) позволяет проводить моделирование функциональных характеристик первичных и вторичных преобразователей информации устройств телеметрии и управления в процессе их проектирования в средах систем символьной математики. А адаптированная форма ТФГМ ППП может успешно использоваться для тех же целей в средах СхСАПР. При этом на основе СхСАПР можно проводить как функциональную, так и схемотехническую разработку указанных устройств с учетом влияния температуры.

И в-пятых, все вышеперечисленные проектные возможности ТФГМ ППП успешно использованы для создания температуроустойчивой электронной аппаратуры для исследования околоземного и межпланетного пространства.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме.— М.: Атомиздат, 1969.
2. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой.— Киев: Наукова думка, 1995.
3. Ніколаєнко В. М. Фактор-функціональні гіпермодельованія нелінійних електронних об'єктів.— Одеса: Фотосинтетика, СПД Хавроненко В. В., 2004.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.— М.: Наука, 1984.



Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем: В 2 т.— М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006.— Т. 1: Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Ревелева М. А. Технологические процессы изготовления кремниевых интегральных схем и их моделирование.— 356 с., ил.

В учебном пособии рассматриваются вопросы, связанные с разработкой, изготовлением и моделированием кремниевых интегральных микросхем. Особое внимание уделяется современным маршрутам изготовления СБИС, методам моделирования процессов и маршрутов, основам субмикронной технологии интегральных микросхем.

Для студентов старших курсов университетов соответствующего профиля, аспирантов и специалистов в области проектирования, технологии изготовления и применения интегральных микросхем.