УДК 621.396.6.049.77:681.3.06

© 2015 г. **Чье Ен Ун,** д-р техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск),
А.Б. Шеин, канд. техн. наук
(Чувашский государственный университет, Чебоксары)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СХЕМ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ. I

Описывается метод параметрического синтеза схем электронных устройств, который реализуется исходя из строгой постановки обратной задачи анализа. Для решения обратной задачи – нахождения параметров компонентов схемы по известной информации о векторе переменных состояния и векторе входных воздействий – используются формулы точного решения уравнений состояния.

Ключевые слова. Параметрический синтез электронных устройств, уравнение состояния, прямая задача, обратная задача.

Введение

При синтезе параметров компонентов электронного устройства предполагается, что структура проектируемого объекта и его математическая модель определены и параметры компонентов имеют метрическое выражение. Задача параметрического синтеза в такой постановке обычно сводится к поиску решений, удовлетворяющих метрическим критериям, что делает ее формально разрешимой. Однако сложность заключается не в принципиальной возможности ее формализации, а в разработке достаточно общих принципов и методов автоматического поиска решений с учетом возможности их реализации на современных ЭВМ. Теоретическую основу решения задачи параметрического синтеза могут составлять математические методы, достаточно полно освещенные в современной теории нелинейного программирования. Однако эти методы не являются исчерпывающими при параметрическом синтезе и не дают ответа на ряд вопросов, что связано, главным образом, с высокой размерностью пространств поиска, большим числом разнородных критериев проектирования, нелинейностью и многоэкстремальностью критериальных функций и часто со сложным характером изменения варьируемых параметров электронного устройства. Основной принцип, заложенный в предлагаемых методах, связан с использованием "прямой" модели, имитирующей реальный объект, и организацией по ней цикла проектирования. Процесс синтеза параметров по этой модели представляет собой серию направленных экспериментов, причем за один цикл проектирования осуществляется расчет выходных показателей путем моделирования, проверка одного набора варьируемых параметров (вектора в пространстве варьируемых параметров) и выбор нового вектора, если предыдущее решение не удовлетворяет заданным критериям. Иначе говоря, процесс автоматизированного проектирования с целью нахождения параметров компонентов устройства, используемый в настоящее время, основан на применении модели как средства анализа и специальных процедур выбора параметров как средства автоматического поиска решения. Качество методов поиска при этом оценивается числом подобных циклов проектирования. Даже в простейшем случае, который представляет метод полного перебора, уже при четырех варьируемых параметрах, каждый из которых может принимать десять возможных значений, число экспериментов равно 10^4. В реальных задачах число параметров может быть существенно больше, а поэтому объем экспериментов возрастает до необозримых значений. Собственно, эта многомерность задач, усугубленная рядом других отмеченных факторов, и определяет проблематику автоматического поиска параметров при указанном подходе.

В общей проблеме автоматического поиска параметров выделяются три основных аспекта, связанных с ее решением [1]. Первый связан с постановкой многокритериальных задач проектирования электронных устройств, где одна из критериальных функций является целевой, остальные – ограничивающими. Второй аспект связан с декомпозицией общей задачи проектирования на локальные процедуры и организацией на этой основе общей процедуры системного проектирования. И, наконец, третий аспект связан с собственно методами поиска параметров компонентов электронного устройства.

В настоящей работе предлагается метод параметрического синтеза электронных устройств, который осуществляется исходя из строгой обратной постановки задачи анализа. При этом входные и выходные параметры (токи и напряжения) схемы устройства должны быть заданы (определены) в соответствии с техническим заданием на проектирование. В качестве математической основы используются уравнения состояния электрических цепей, решения которых рассмотрены в работах [2 – 7].

Постановка задачи

Параметрический синтез электронных устройств на основе формул точного решения уравнений состояния. Для электронных устройств, электромагнитные процессы в которых описываются уравнением состояния вида $\frac{dx}{dt} = Ax + Bv,$ при условии, что $v(t)$ есть непрерывная кусочно-постоянная на каждом из временных интервалов h функция, решение их уравнений состояния может быть найдено следующим образом:

$$x\big((k+1)h\big) = Fx(kh) + F_0 Bhv(kh),$$

$$F = e^{Ah} = \sum_{i=0}^{p} \frac{1}{i!}(Ah)^i = E + Ah + \frac{1}{2!}(Ah)^2 + ... + \frac{1}{p!}(Ah)^p,$$

$$F_0=(e^{Ah}-E)(Ah)^{-1}=\sum_{i=0}^{p}\frac{1}{(i+1)!}(Ah)^i=E+\frac{1}{2!}Ah+\frac{1}{3!}(Ah)^2+...+\frac{1}{(p+1)!}(Ah)^p,$$

где p – порядок точности формулы; h – шаг решения уравнения состояния по времени; k – количество шагов, выполняемых при решении уравнения состояния; E – единичная матрица [7].

Пусть *требуется* выполнить расчет параметров компонентов электронного устройства по заданной информации о переменных состояния и входных воздействиях на устройство на основе этой формулы с точностью до третьей значащей цифры.

Полагаем $p = 2$. При этом формула решения уравнения состояния может быть записана в виде

$$\begin{aligned} x((k+1)h) &= \left[E+Ah+\frac{1}{2!}(Ah)^2\right]x(kh)+ \\ &+\left[E+\frac{1}{2}Ah+\frac{1}{6}(Ah)^2\right]Bhv(kh)= \\ &=A_1x(kh)+A_2Bhv(kh)=A_1x(kh)+B_1v(kh). \end{aligned} \tag{1}$$

Раскроем содержание матриц A_1 и B_1, входящих в уравнение (1). В общем случае матрицы A и B имеют следующий вид:

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & ... & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & ... & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & ... & a_{3n} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & ... & a_{nn} \end{bmatrix};\ B=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & ... & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & ... & b_{2n} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & ... & b_{3n} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & ... & b_{nn} \end{bmatrix}.$$

Последовательно находим:

$$A^2=\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{n}a_{1j}a_{j1} & \sum_{j=1}^{n}a_{1j}a_{j2} & \sum_{j=1}^{n}a_{1j}a_{j3} & ... & \sum_{j=1}^{n}a_{1j}a_{jn} \\ \sum_{j=1}^{n}a_{2j}a_{j1} & \sum_{j=1}^{n}a_{2j}a_{j2} & \sum_{j=1}^{n}a_{2j}a_{j3} & ... & \sum_{j=1}^{n}a_{2j}a_{jn} \\ \sum_{j=1}^{n}a_{3j}a_{j1} & \sum_{j=1}^{n}a_{3j}a_{j2} & \sum_{j=1}^{n}a_{3j}a_{j3} & ... & \sum_{j=1}^{n}a_{3j}a_{jn} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ \sum_{j=1}^{n}a_{nj}a_{j1} & \sum_{j=1}^{n}a_{nj}a_{j2} & \sum_{j=1}^{n}a_{nj}a_{j3} & ... & \sum_{j=1}^{n}a_{nj}a_{jn} \end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} & ... & \bar{a}_{1n} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} & ... & \bar{a}_{2n} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} & ... & \bar{a}_{3n} \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ \bar{a}_{n1} & \bar{a}_{n2} & \bar{a}_{n3} & ... & \bar{a}_{nn} \end{bmatrix},$$

$$
A_1=\begin{bmatrix}1&0&0&\ldots&0\\0&1&0&\ldots&0\\0&0&1&\ldots&0\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\0&0&0&\ldots&1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}ha_{11}&ha_{12}&ha_{13}&\ldots&ha_{1n}\\ha_{21}&ha_{22}&ha_{23}&\ldots&ha_{2n}\\ha_{31}&ha_{32}&ha_{33}&\ldots&ha_{3n}\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\ha_{n1}&ha_{n2}&ha_{n3}&\ldots&ha_{nn}\end{bmatrix}+
$$

$$
+\begin{bmatrix}\frac{h^2}{2}\bar{a}_{11}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{12}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{13}&\ldots&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{1n}\\\frac{h^2}{2}\bar{a}_{21}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{22}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{23}&\ldots&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{2n}\\\frac{h^2}{2}\bar{a}_{31}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{32}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{33}&\ldots&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{3n}\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\\frac{h^2}{2}\bar{a}_{n1}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{n2}&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{n3}&\ldots&\frac{h^2}{2}\bar{a}_{nn}\end{bmatrix}=
$$

$$
=\begin{bmatrix}1+ha_{11}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{11}&ha_{12}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{12}&ha_{13}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{13}&\ldots&ha_{1n}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{1n}\\ha_{21}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{21}&1+ha_{22}+\frac{h^{2\,2}}{2}\bar{a}_{22}&ha_{23}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{23}&\ldots&ha_{2n}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{2n}\\ha_{31}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{31}&ha_{32}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{32}&1+ha_{33}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{33}&\ldots&ha_{3n}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{3n}\\\ldots&\ldots&\ldots&&\ldots\\ha_{n1}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{n1}&ha_{n2}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{n2}&ha_{n3}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{n3}&\ldots&1+ha_{nn}+\frac{h^2}{2}\bar{a}_{nn}\end{bmatrix}=
$$

$$
=\begin{bmatrix}a_{11(1)}&a_{12(1)}&a_{13(1)}&\ldots&a_{1n(1)}\\a_{21(1)}&a_{22(1)}&a_{23(1)}&\ldots&a_{2n(1)}\\a_{31(1)}&a_{32(1)}&a_{33(1)}&\ldots&a_{3n(1)}\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\a_{n1(1)}&a_{n2(1)}&a_{n3(1)}&\ldots&a_{nn(1)}\end{bmatrix},
$$

$$
A_2=\begin{bmatrix}1&0&0&\ldots&0\\0&1&0&\ldots&0\\0&0&1&\ldots&0\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\0&0&0&\ldots&1\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{1}{2}ha_{11}&\frac{1}{2}ha_{12}&\frac{1}{2}ha_{13}&\ldots&\frac{1}{2}ha_{1n}\\\frac{1}{2}ha_{21}&\frac{1}{2}ha_{22}&\frac{1}{2}ha_{23}&\ldots&\frac{1}{2}ha_{2n}\\\frac{1}{2}ha_{31}&\frac{1}{2}ha_{32}&\frac{1}{2}ha_{33}&\ldots&\frac{1}{2}ha_{3n}\\\ldots&\ldots&\ldots&\ldots&\ldots\\\frac{1}{2}ha_{n1}&\frac{1}{2}ha_{n2}&\frac{1}{2}ha_{n3}&\ldots&\frac{1}{2}ha_{nn}\end{bmatrix}+
$$

$$
+\begin{bmatrix}
\frac{1}{6}h^2\bar{a}_{11} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{12} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{13} & \dots & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{1n} \\
\frac{1}{6}h^2\bar{a}_{21} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{22} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{23} & \dots & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{2n} \\
\frac{1}{6}h^2\bar{a}_{31} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{32} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{33} & \dots & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{3n} \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
\frac{1}{6}h^2\bar{a}_{n1} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{n2} & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{n3} & \dots & \frac{1}{6}h^2\bar{a}_{nn}
\end{bmatrix}=
$$

$$
=\begin{bmatrix}
1+\frac{1}{2}ha_{11}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{11} & \frac{1}{2}ha_{12}+\frac{h^{2\,2}}{6}\bar{a}_{12} & \frac{1}{2}ha_{13}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{13} & \dots & \frac{1}{2}ha_{1n}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{1n} \\
\frac{1}{2}ha_{21}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{21} & 1+\frac{1}{2}ha_{22}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{22} & \frac{1}{2}ha_{23}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{23} & \dots & \frac{1}{2}ha_{2n}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{2n} \\
\frac{1}{2}ha_{31}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{31} & \frac{1}{2}ha_{32}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{32} & 1+\frac{1}{2}ha_{33}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{33} & \dots & \frac{1}{2}ha_{3n}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{3n} \\
\dots & \dots & \dots & & \dots \\
\frac{1}{2}ha_{n1}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{n1} & \frac{1}{2}ha_{n2}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{n2} & \frac{1}{2}ha_{n3}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{n3} & \dots & 1+\frac{1}{2}ha_{nn}+\frac{h^2}{6}\bar{a}_{nn}
\end{bmatrix}=
$$

$$
=\begin{bmatrix}
a_{11(2)} & a_{12(2)} & a_{13(2)} & \cdots & a_{1n(2)} \\
a_{21(2)} & a_{22(2)} & a_{23(2)} & \cdots & a_{2n(2)} \\
a_{31(2)} & a_{32(2)} & a_{33(2)} & \cdots & a_{3n(2)} \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
a_{n1(2)} & a_{n2(2)} & a_{n3(2)} & \cdots & a_{nn(2)}
\end{bmatrix},
$$

$$
B_1 = A_2Bh = h\begin{bmatrix}
a_{11(2)} & a_{12(2)} & a_{13(2)} & \cdots & a_{1n(2)} \\
a_{21(2)} & a_{22(2)} & a_{23(2)} & \cdots & a_{2n(2)} \\
a_{31(2)} & a_{32(2)} & a_{33(2)} & \cdots & a_{3n(2)} \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
a_{n1(2)} & a_{n2(2)} & a_{n3(2)} & \cdots & a_{nn(2)}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1n} \\
b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{2n} \\
b_{31} & b_{32} & b_{33} & \cdots & b_{3n} \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & \cdots & b_{nn}
\end{bmatrix}=
$$

$$
=h\begin{bmatrix}
\sum_{j=1}^{n} a_{1j(2)}b_{j1} & \sum_{j=1}^{n} a_{1j(2)}b_{j2} & \sum_{j=1}^{n} a_{1j(2)}b_{j3} & \dots & \sum_{j=1}^{n} a_{1j(2)}b_{jn} \\
\sum_{j=1}^{n} a_{2j(2)}b_{j1} & \sum_{j=1}^{n} a_{2j(2)}b_{j2} & \sum_{j=1}^{n} a_{2j(2)}b_{j3} & \dots & \sum_{j=1}^{n} a_{2j(2)}b_{jn} \\
\sum_{j=1}^{n} a_{3j(2)}b_{j1} & \sum_{j=1}^{n} a_{3j(2)}b_{j2} & \sum_{j=1}^{n} a_{3j(2)}b_{j3} & \dots & \sum_{j=1}^{n} a_{3j(2)}b_{jn} \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
\sum_{j=1}^{n} a_{nj(2)}b_{j1} & \sum_{j=1}^{n} a_{nj(2)}b_{j2} & \sum_{j=1}^{n} a_{nj(2)}b_{j3} & \dots & \sum_{j=1}^{n} a_{nj(2)}b_{jn}
\end{bmatrix}=
$$

$$
=\begin{bmatrix} b_{11(1)} & b_{12(1)} & b_{13(1)} & \dots & b_{1n(1)} \\ b_{21(1)} & b_{22(1)} & b_{23(1)} & \dots & b_{2n(1)} \\ b_{31(1)} & b_{32(1)} & b_{33(1)} & \dots & b_{3n(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1(1)} & b_{n2(1)} & b_{n3(1)} & \dots & b_{nn(1)} \end{bmatrix}.
$$

Следовательно, правую часть матрично-векторного уравнения (1) можно записать в следующем виде:

$$
\begin{bmatrix} a_{11(1)} & a_{12(1)} & a_{13(1)} & \dots & a_{1n(1)} \\ a_{21(1)} & a_{22(1)} & a_{23(1)} & \dots & a_{2n(1)} \\ a_{31(1)} & a_{32(1)} & a_{33(1)} & \dots & a_{3n(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1(1)} & a_{n2(1)} & a_{n3(1)} & \dots & a_{nn(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{x}_1(kh) \\ \mathrm{x}_2(kh) \\ \mathrm{x}_3(kh) \\ \dots \\ \mathrm{x}_n(kh) \end{bmatrix} +
$$

$$
+\begin{bmatrix} b_{11(1)} & b_{12(1)} & b_{13(1)} & \dots & b_{1n(1)} \\ b_{21(1)} & b_{22(1)} & b_{23(1)} & \dots & b_{2n(1)} \\ b_{31(1)} & b_{32(1)} & b_{33(1)} & \dots & b_{3n(1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1(1)} & b_{n2(1)} & b_{n3(1)} & \dots & b_{nn(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(kh) \\ v_2(kh) \\ v_3(kh) \\ \dots \\ v_n(kh) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1((k+1)h) \\ x_2((k+1)h) \\ x_3((k+1)h) \\ \dots \\ x_n((k+1)h) \end{bmatrix}. \tag{2}
$$

Уравнение (2) может быть представлено в виде системы алгебраических уравнений с неизвестными $a_{11(1)},\dots,\ a_{nn(1)}$; $b_{11(1)},\dots,\ b_{nn(1)}$:

$$
\begin{aligned}
&x_1((k+1)h) = a_{11(1)}x_1(kh) + a_{12(1)}x_2(kh) + a_{13(1)}x_3(kh) + \dots + a_{1n(1)}x_n(kh) + \\
&\qquad +b_{11(1)}v_1(kh) + b_{12(1)}v_2(kh) + b_{13(1)}v_3(kh) + \dots + b_{1n(1)}v_n(kh); \\
&x_2((k+1)h) a_{21(1)}x_1(kh) + a_{22(1)}x_2(kh) + a_{23(1)}x_3(kh) + \dots + a_{2n(1)}x_n(kh) + \\
&\qquad +b_{21(1)}v_1(kh) + b_{22(1)}v_2(kh) + b_{23(1)}v_3(kh) + \dots + b_{2n(1)}v_n(kh); \\
&x_3((k+1)h) = a_{31(1)}x_1(kh) + a_{32(1)}x_2(kh) + a_{33(1)}x_3(kh) + \dots + a_{3n(1)}x_n(kh) + \\
&\qquad +b_{31(1)}v_1(kh) + b_{32(1)}v_2(kh) + b_{33(1)}v_3(kh) + \dots + b_{3n(1)}v_n(kh): \\
&\qquad\qquad \dots \\
&x_n((k+1)h) a_{n1(1)}x_1(kh) + a_{n2(1)}x_2(kh) + a_{n3(1)}x_3(kh) + \dots + a_{nn(1)}x_n(kh) + \\
&\qquad +b_{n1(1)}v_1(kh) + b_{n2(1)}v_2(kh) + b_{n3(1)}v_3(kh) + \dots + b_{nn(1)}v_n(kh).
\end{aligned} \tag{3}
$$

Каждое уравнение системы равенств (3) содержит $2n$ неизвестных. Поэтому для нахождения всех неизвестных полная система должна содержать $2(n \times n)$ уравнений, что достигается объединением систем равенств (3) в последовательности $k = 1,\ 2,\dots,\ 2n$.

Так, для схемы третьего порядка имеем систему из трех уравнений

$$
\begin{aligned}
&x_1((k+1)ha_{11(1)}x_1(kh) + a_{12(1)}x_2(kh) + a_{13(1)}x_3(kh) + \\
&\qquad + b_{11(1)}v_1(kh) + b_{12(1)}v_2(kh) + b_{13(1)}v_3(kh));\\
&x_2((k+1)h) = a_{21(1)}x_1(kh) + a_{22(1)}x_2(kh) + a_{23(1)}x_3(kh) + \\
&\qquad + b_{21(1)}v_1(kh) + b_{22(1)}v_2(kh) + b_{23(1)}v_3(kh);\\
&x_3((k+1)h) = a_{31(1)}x_1(kh) + a_{32(1)}x_2(kh) + a_{33(1)}x_3(kh) + \\
&\qquad + b_{31(1)}v_1(kh) + b_{32(1)}v_2(kh) + b_{33(1)}v_3(kh).
\end{aligned}
\tag{4}
$$

Полагая, что $k = \overline{1,\ 6}$, на основании системы уравнений (4) можно составить полную систему уравнений для определения неизвестных $a_{11(1)}, \ldots, a_{33(1)}$; $b_{11(1)}, \ldots,\ b_{33(1)}$ по известной информации о переменных состояния и входных воздействиях на схему устройства:

$$
\begin{aligned}
&k = 1,\\
&a_{11(1)}x_1(h) + a_{12(1)}x_2(h) + a_{13(1)}x_3(h) + b_{11(1)}v_1(h) + b_{12(1)}v_2(h) + b_{13(1)}v_3(h) = x_1(2h),\\
&a_{21(1)}x_1(h) + a_{22(1)}x_2(h) + a_{23(1)}x_3(h) + b_{21(1)}v_1(h) + b_{22(1)}v_2(h) + b_{23(1)}v_3(h) = x_2(2h),\\
&a_{31(1)}x_1(h) + a_{32(1)}x_2(h) + a_{33(1)}x_3(h) + b_{31(1)}v_1(h) + b_{32(1)}v_2(h) + b_{33(1)}v_3(h) = x_3(2h);\\
&k = 2,\\
&a_{11(1)}x_1(2h) + a_{12(1)}x_2(2h) + a_{13(1)}x_3(2h) + b_{11(1)}v_1(2h) + b_{12(1)}v_2(2h) + b_{13(1)}v_3(2h) = x_1(3h),\\
&a_{21(1)}x_1(2h) + a_{22(1)}x_2(2h) + a_{23(1)}x_3(2h) + b_{21(1)}v_1(2h) + b_{22(1)}v_2(2h) + b_{23(1)}v_3(2h) = x_2(3h),\\
&a_{31(1)}x_1(2h) + a_{32(1)}x_2(2h) + a_{33(1)}x_3(2h) + b_{31(1)}v_1(2h) + b_{32(1)}v_2(2h) + b_{33(1)}v_3(2h) = x_3(3h);\\
&k = 3,\\
&a_{11(1)}x_1(3h) + a_{12(1)}x_2(3h) + a_{13(1)}x_3(3h) + b_{11(1)}v_1(3h) + b_{12(1)}v_2(3h) + b_{13(1)}v_3(3h) = x_1(4h),\\
&a_{21(1)}x_1(3h) + a_{22(1)}x_2(3h) + a_{23(1)}x_3(3h) + b_{21(1)}v_1(3h) + b_{22(1)}v_2(3h) + b_{23(1)}v_3(3h) = x_2(4h),\\
&a_{31(1)}x_1(3h) + a_{32(1)}x_2(3h) + a_{33(1)}x_3(3h) + b_{31(1)}v_1(3h) + b_{32(1)}v_2(3h) + b_{33(1)}v_3(3h) = x_3(4h);\\
&k = 4,\\
&a_{11(1)}x_1(4h) + a_{12(1)}x_2(4h) + a_{13(1)}x_3(4h) + b_{11(1)}v_1(4h) + b_{12(1)}v_2(4h) + b_{13(1)}v_3(4h) = x_1(5h),\\
&a_{21(1)}x_1(4h) + a_{22(1)}x_2(4h) + a_{23(1)}x_3(4h) + b_{21(1)}v_1(4h) + b_{22(1)}v_2(4h) + b_{23(1)}v_3(4h) = x_2(5h),\\
&a_{31(1)}x_1(4h) + a_{32(1)}x_2(4h) + a_{33(1)}x_3(4h) + b_{31(1)}v_1(4h) + b_{32(1)}v_2(4h) + b_{33(1)}v_3(4h) = x_3(5h);\\
&k = 5,\\
&a_{11(1)}x_1(5h) + a_{12(1)}x_2(5h) + a_{13(1)}x_3(5h) + b_{11(1)}v_1(5h) + b_{12(1)}v_2(5h) + b_{13(1)}v_3(5h) = x_1(6h),\\
&a_{21(1)}x_1(5h) + a_{22(1)}x_2(5h) + a_{23(1)}x_3(5h) + b_{21(1)}v_1(5h) + b_{22(1)}v_2(5h) + b_{23(1)}v_3(5h) = x_2(6h),\\
&a_{31(1)}x_1(5h) + a_{32(1)}x_2(5h) + a_{33(1)}x_3(5h) + b_{31(1)}v_1(5h) + b_{32(1)}v_2(5h) + b_{33(1)}v_3(5h) = x_3(6h);\\
&k = 6,\\
&a_{11(1)}x_1(6h) + a_{12(1)}x_2(6h) + a_{13(1)}x_3(6h) + b_{11(1)}v_1(6h) + b_{12(1)}v_2(6h) + b_{13(1)}v_3(6h) = x_1(7h),\\
&a_{21(1)}x_1(6h) + a_{22(1)}x_2(6h) + a_{23(1)}x_3(6h) + b_{21(1)}v_1(6h) + b_{22(1)}v_2(6h) + b_{23(1)}v_3(6h) = x_2(7h),\\
&a_{31(1)}x_1(6h) + a_{32(1)}x_2(6h) + a_{33(1)}x_3(6h) + b_{31(1)}v_1(6h) + b_{32(1)}v_2(6h) + b_{33(1)}v_3(6h) = x_3(7h).
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Группируем уравнения системы равенств (5) в следующей последовательности:

$$x_1(2h)=a_{11(1)}x_1(h)+a_{12(1)}x_2(h)+a_{13(1)}x_3(h)+b_{11(1)}v_1(h)+b_{12(1)}v_2(h)+b_{13(1)}v_3(h),$$
$$x_1(3h)=a_{11(1)}x_1(2h)+a_{12(1)}x_2(2h)+a_{13(1)}x_3(2h)+b_{11(1)}v_1(2h)+b_{12(1)}v_2(2h)+b_{13(1)}v_3(2h),$$
$$x_1(4h)=a_{11(1)}x_1(3h)+a_{12(1)}x_2(3h)+a_{13(1)}x_3(3h)+b_{11(1)}v_1(3h)+b_{12(1)}v_2(3h)+b_{13(1)}v_3(3h),\quad (6)$$
$$x_1(5h)=a_{11(1)}x_1(4h)+a_{12(1)}x_2(4h)+a_{13(1)}x_3(4h)+b_{11(1)}v_1(4h)+b_{12(1)}v_2(4h)+b_{13(1)}v_3(4h),$$
$$x_1(6h)=a_{11(1)}x_1(5h)+a_{12(1)}x_2(5h)+a_{13(1)}x_3(5h)+b_{11(1)}v_1(5h)+b_{12(1)}v_2(5h)+b_{13(1)}v_3(5h),$$
$$x_1(7h)=a_{11(1)}x_1(6h)+a_{12(1)}x_2(6h)+a_{13(1)}x_3(6h)+b_{11(1)}v_1(6h)+b_{12(1)}v_2(6h)+b_{13(1)}v_3(6h);$$

$$x_2(2h)=a_{21(1)}x_1(h)+a_{22(1)}x_2(h)+a_{23(1)}x_3(h)+b_{21(1)}v_1(h)+b_{22(1)}v_2(h)+b_{23(1)}v_3(h),$$
$$x_2(3h)=a_{21(1)}x_1(2h)+a_{22(1)}x_2(2h)+a_{23(1)}x_3(2h)+b_{21(1)}v_1(2h)+b_{22(1)}v_2(2h)+b_{23(1)}v_3(2h),$$
$$x_2(4h)=a_{21(1)}x_1(3h)+a_{22(1)}x_2(3h)+a_{23(1)}x_3(3h)+b_{21(1)}v_1(3h)+b_{22(1)}v_2(3h)+b_{23(1)}v_3(3h),\quad (7)$$
$$x_2(5h)=a_{21(1)}x_1(4h)+a_{22(1)}x_2(4h)+a_{23(1)}x_3(4h)+b_{21(1)}v_1(4h)+b_{22(1)}v_2(4h)+b_{23(1)}v_3(4h),$$
$$x_2(6h)=a_{21(1)}x_1(5h)+a_{22(1)}x_2(5h)+a_{23(1)}x_3(5h)+b_{21(1)}v_1(5h)+b_{22(1)}v_2(5h)+b_{23(1)}v_3(5h),$$
$$x_2(7h)=a_{21(1)}x_1(6h)+a_{22(1)}x_2(6h)+a_{23(1)}x_3(6h)+b_{21(1)}v_1(6h)+b_{22(1)}v_2(6h)+b_{23(1)}v_3(6h);$$

$$x_3(2h)=a_{31(1)}x_1(h)+a_{32(1)}x_2(h)+a_{33(1)}x_3(h)+b_{31(1)}v_1(h)+b_{32(1)}v_2(h)+b_{33(1)}v_3(h),$$
$$x_3(3h)=a_{31(1)}x_1(2h)+a_{32(1)}x_2(2h)+a_{33(1)}x_3(2h)+b_{31(1)}v_1(2h)+b_{32(1)}v_2(2h)+b_{33(1)}v_3(2h),$$
$$x_3(4h)=a_{31(1)}x_1(3h)+a_{32(1)}x_2(3h)+a_{33(1)}x_3(3h)+b_{31(1)}v_1(3h)+b_{32(1)}v_2(3h)+b_{33(1)}v_3(3h),\quad (8)$$
$$x_3(5h)=a_{31(1)}x_1(4h)+a_{32(1)}x_2(4h)+a_{33(1)}x_3(4h)+b_{31(1)}v_1(4h)+b_{32(1)}v_2(4h)+b_{33(1)}v_3(4h),$$
$$x_3(6h)=a_{31(1)}x_1(5h)+a_{32(1)}x_2(5h)+a_{33(1)}x_3(5h)+b_{31(1)}v_1(5h)+b_{32(1)}v_2(5h)+b_{33(1)}v_3(5h),$$
$$x_3(7h)=a_{31(1)}x_1(6h)+a_{32(1)}x_2(6h)+a_{33(1)}x_3(6h)+b_{31(1)}v_1(6h)+b_{32(1)}v_2(6h)+b_{33(1)}v_3(6h);$$

Системы уравнений (6), (7) и (8) удобно представить в следующем виде:

$$c_1=\alpha_{11}y_1+\alpha_{12}y_2+\alpha_{13}y_3+\alpha_{14}y_4+\alpha_{15}y_5+\alpha_{16}y_6;$$
$$c_2=\alpha_{21}y_1+\alpha_{22}y_2+\alpha_{23}y_3+\alpha_{24}y_4+\alpha_{25}y_5+\alpha_{26}y_6;$$
$$c_3=\alpha_{31}y_1+\alpha_{32}y_2+\alpha_{33}y_3+\alpha_{34}y_4+\alpha_{35}y_5+\alpha_{36}y_6;\quad (9)$$
$$c_4=\alpha_{41}y_1+\alpha_{42}y_2+\alpha_{43}y_3+\alpha_{44}y_4+\alpha_{45}y_5+\alpha_{46}y_6;$$
$$c_5=\alpha_{51}y_1+\alpha_{52}y_2+\alpha_{53}y_3+\alpha_{54}y_4+\alpha_{55}y_5+\alpha_{56}y_6;$$
$$c_6=\alpha_{61}y_1+\alpha_{62}y_2+\alpha_{63}y_3+\alpha_{64}y_4+\alpha_{65}y_5+\alpha_{66}y_6,$$

где $y_1=a_{11(1)}$; $y_2=a_{12(1)}$; $y_3=a_{13(1)}$; $y_4=b_{11(1)}$; $y_5=b_{12(1)}$; $y_6=b_{13(1)}$; $\alpha_{11}=x_1(h)$; $\alpha_{12}=x_2(h)$; $\alpha_{13}=x_3(h)$; $\alpha_{14}=v_1(h)$; $\alpha_{15}=v_2(h)$; $\alpha_{16}=v_3(h)$; $\alpha_{21}=x_1(2h)$; $\alpha_{22}=x_2(2h)$; $\alpha_{23}=x_3(2h)$; $\alpha_{24}=v_1(2h)$; $\alpha_{25}=v_2(2h)$; $\alpha_{26}=v_3(2h)$; $\alpha_{31}=x_1(3h)$; $\alpha_{32}=x_2(3h)$; $\alpha_{33}=x_3(3h)$; $\alpha_{34}=v_1(3h)$; $\alpha_{35}=v_2(3h)$; $\alpha_{36}=v_3(3h)$; $\alpha_{41}=x_1(4h)$; $\alpha_{42}=x_2(4h)$; $\alpha_{43}=x_3(4h)$; $\alpha_{44}=v_1(4h)$; $\alpha_{45}=v_2(4h)$; $\alpha_{46}=v_3(4h)$; $\alpha_{51}=x_1(5h)$; $\alpha_{52}=x_2(5h)$; $\alpha_{53}=x_3(5h)$; $\alpha_{54}=v_1(5h)$; $\alpha_{55}=v_2(5h)$; $\alpha_{56}=v_3(5h)$; $\alpha_{61}=x_1(6h)$; $\alpha_{62}=x_2(6h)$; $\alpha_{63}=x_3(6h)$; $\alpha_{64}=v_1(6h)$; $\alpha_{65}=v_2(6h)$; $\alpha_{66}=v_3(6h)$; $c_1=x_1(2h)$; $c_2=x_1(3h)$; $c_3=x_1(4h)$; $c_4=x_1(5h)$; $c_5=x_1(6h)$; $c_6=x_1(7h)$.

$$
\begin{aligned}
&d_1 = \alpha_{11}z_1 + \alpha_{12}z_2 + \alpha_{13}z_3 + \alpha_{14}z_4 + \alpha_{15}z_5 + \alpha_{16}z;\\
&d_2 = \alpha_{21}z_1 + \alpha_{22}z_2 + \alpha_{23}z_3 + \alpha_{24}z_4 + \alpha_{25}z_5 + \alpha_{26}z_6;\\
&d_3 = \alpha_{31}z_1 + \alpha_{32}z_2 + \alpha_{33}z_3 + \alpha_{34}z_4 + \alpha_{35}z_5 + \alpha_{36}z_6;\\
&d_4 = \alpha_{41}z_1 + \alpha_{42}z_2 + \alpha_{43}z_3 + \alpha_{44}z_4 + \alpha_{45}z_5 + \alpha_{46}z_6;\\
&d_5 = \alpha_{51}z_1 + \alpha_{52}z_2 + \alpha_{53}z_3 + \alpha_{54}z_4 + \alpha_{55}z_5 + \alpha_{56}z_6;\\
&d_6 = \alpha_{61}z_1 + \alpha_{62}z_2 + \alpha_{63}z_3 + \alpha_{64}z_4 + \alpha_{65}z_5 + \alpha_{66}z_6;
\end{aligned}
\qquad (10)
$$

где $z_1 = a_{21(1)}$; $z_2 = a_{22(1)}$; $z_3 = a_{23(1)}$; $z_4 = b_{21(1)}$; $z_5 = b_{22(1)}$; $z_6 = b_{23(1)}$; $d_1 = x_2(2h)$; $d_2 = x_2(3h)$; $d_3 = x_2(4h)$; $d_4 = x_2(5h)$; $d_5 = x_2(6h)$; $d_6 = x_2(7h)$.

$$
\begin{aligned}
&g_1 = \alpha_{11}w_1 + \alpha_{12}w_2 + \alpha_{13}w_3 + \alpha_{14}w_4 + \alpha_{15}w_5 + \alpha_{16}w_6;\\
&g_2 = \alpha_{21}w_1 + \alpha_{22}w_2 + \alpha_{23}w_3 + \alpha_{24}w_4 + \alpha_{25}w_5 + \alpha_{26}w_6;\\
&g_3 = \alpha_{31}w_1 + \alpha_{32}w_2 + \alpha_{33}w_3 + \alpha_{34}w_4 + \alpha_{35}w_5 + \alpha_{36}w_6;\\
&g_4 = \alpha_{41}w_1 + \alpha_{42}w_2 + \alpha_{43}w_3 + \alpha_{44}w_4 + \alpha_{45}w_5 + \alpha_{46}w_6;\\
&g_5 = \alpha_{51}w_1 + \alpha_{52}w_2 + \alpha_{53}w_3 + \alpha_{54}w_4 + \alpha_{55}w_5 + \alpha_{56}w_6;\\
&g_6 = \alpha_{61}w_1 + \alpha_{62}w_2 + \alpha_{63}w_3 + \alpha_{64}w_4 + \alpha_{65}w_5 + \alpha_{66}w_6,
\end{aligned}
\qquad (11)
$$

где $w_1 = a_{31(1)}$; $w_2 = a_{32(1)}$; $w_3 = a_{33(1)}$; $w_4 = b_{31(1)}$; $w_5 = b_{32(1)}$; $w_6 = b_{33(1)}$; $g_1 = x_3(2h)$; $g_2 = x_3(3h)$; $g_3 = x_3(4h)$; $g_4 = x_3(5h)$; $g_5 = x_3(6h)$; $g_6 = x_3(7h)$.

Решая системы уравнений (9), (10) и (11) и дополнительно системы с уже полученными значениями коэффициентов структурно-параметрических матриц *A* и *B*, можно найти параметры компонентов электронного устройства. Для решения систем уравнений, необходимых для нахождения параметров компонентов схем, можно использовать метод, описанный в работе [8], который является более общим, чем метод Гаусса, метод подстановок и другие точные методы, так как позволяет находить все возможные решения систем алгебраических уравнений.

Заключение

Таким образом, на основе решения уравнений состояния получены в общем виде соотношения, позволяющие реализовать параметрический синтез электронного устройства. В продолжении этой статьи будет рассмотрена практическая реализация описанного метода параметрического синтеза электронных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вермишев Ю.Х.* Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем. – М.: Радио и связь, 1982.
2. *Чье Ен Ун*, *Шеин А.Б.* Решение уравнений состояния в задачах схемотехнического проектирования при произвольных воздействиях // Ученые записки КнАГТУ. – 2012. – № 4. – С. 45-51.
3. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Метод решения уравнений состояния электронных устройств // Проектирование и технология электронных средств. – 2012. – № 1. – С.19-25.

4. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Решение уравнений переменных состояния электронных устройств на основе обнуления невязки // Проектирование и технология электронных средств. – 2014. – № 1. – С.17-20.
5. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Решение уравнений переменных состояния электрических цепей на основе свойства ортогональности базисных функций // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4(42). – С.112-117.
6. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Решение уравнений переменных состояния электронных устройств на основе интегрального метода наименьших квадратов // Проектирование и технология электронных средств. – 2014. – № 3. – С.14-17.
7. *Шеин А.Б.*, *Лазарева Н.М.* Методы проектирования электронных устройств. – М.: Инфра–инженерия, 2011.
8. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Метод решения систем линейных алгебраических уравнений для задач моделирования электронных устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 4 (36). – С.21-26.

E-mail:
Чье Ен Ун – chye@ais.khstu.ru;
Шеин Александр Борисович – shabishzl@yandex.ru.

5-й научно-технический семинар «Современные проблемы прикладной математики, информатики, автоматизации и управления», 15-20 июня 2015г, г. Севастополь

ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Рабочие языки семинара – русский, английский. Предусматриваются: выступление с докладом на пленарных и секционных заседаниях (до 60 минут по решению оргкомитета), вопросы и обсуждение доклада (до 60 минут по решению оргкомитета).

Регистрация и поселение участников семинара будет проводиться 15 июня 2015г. с 9-00 до 17-00 в СГУ, студгородок, главный учебный корпус СГУ. Проезд от ж.д. и автовокзала маршрутным такси № 77, 107, 109, 110, 112 до остановки «Студгородок» или троллейбусами № 1, 3, 7, 9 до остановки «пл. Лазарева» и далее троллейбусом №10 или маршрутным такси № 16, 83, 84, 85, 111 до остановки «Студгородок».

Принимаются доклады, посвященные перспективным комплексным направлениям исследований в области прикладной математики, информатики, автоматизации и управления.

Оргкомитет принимает решение о включении доклада в программу семинара после получения материалов, оформленных в соответствии с прилагаемыми требованиями. Материалы докладов, заслушанных на семинаре, будут опубликованы в сборнике трудов в форме статей (до 8 страниц формата А4). Имеется возможность публикации работ (по рекомендациям ведущих секционные заседания) в научно-технических сборниках, издаваемых в СГУ и Морском гидрофизическом институте.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ ВЗНОС

Организационный взнос оплачивается в рублях и составляет сумму, эквивалентную 50 долларам по курсу ЦБ РФ на день оплаты. Рекомендуется оплачивать организационный взнос на месте по прибытии.

ПРОЖИВАНИЕ

Предполагается поселение участников семинара в гостиницах города и общежитии СГУ. Культурная программа формируется по заявкам и оплачивается отдельно. Билеты на обратный путь рекомендуется приобретать заблаговременно.

АДРЕС ОРГКОМИТЕТА

299053, Россия, Севастополь, ул. Университетская 33, Севастопольский государственный университет. Тел.: +38-0692-43-51-30, E-mail: tk.sevntu@gmail.com, iggurevich@gmail.com.