УДК 621.396.6: 681.3.06

© 2016 г. **Чье Ен Ун,** д-р техн. наук
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск),
А.Б. Шеин, канд. техн. наук
(Чувашский государственный университет, Чебоксары)

ФОРМИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ С ПОСТОЯННЫМИ И ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПО ЕДИНОМУ АЛГОРИТМУ. II

В этой части работы показывается, как алгоритм формирования уравнений переменных состояния электронных устройств с постоянными параметрами компонентов, изложенный в первой части, используется для формирования уравнений состояния с переменными по времени параметрами. Алгоритм позволяет формировать системы дифференциальных уравнений первого порядка с учетом особых контуров и сечений, которые понижают порядок нормальной системы на количество вырождений..

***Ключевые слова*:** алгоритм, уравнение переменных состояния, электронные устройства, формирование, индуктивные сечения, емкостные контуры.

Формирование уравнений состояния электронных устройств с переменными по времени параметрами компонентов

Настоящая работа – продолжение статьи [1], поэтому для удобства в ней сохранена сквозная нумерация формул.

Алгоритм формирования уравнений состояния электронных устройств, приведенный в первой части статьи, обобщается на случай, когда в схеме устройства присутствуют компоненты с переменными по времени параметрами. Тогда фундаментальное дерево графа схемы формируется в соответствии со следующей иерархией дуг:

$$e - C_T - \Pi_T - X_T - L_T - C_N - X_N - \Pi_N - L_N - j,$$

где e – независимые ЭДС; C_T – емкости ветвей дерева графа; Π_T – переменные сопротивления ветвей дерева графа; X_T – сопротивления ветвей дерева графа; L_T – индуктивность ветвей дерева графа; C_N – емкости хорд; X_N – проводимость хорд; Π_N – переменные проводимости хорд; L_N – индуктивности хорд; j – независимые источники тока.

Топологические уравнения записываются в виде:

а) для главных сечений

$$
\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
1 & & & & & S_{EC} & S_{EX} & S_{E\text{П}} & S_{EL} & S_{EJ} \\
\hline
 & 1 & & & & S_{CC} & S_{CX} & S_{C\text{П}} & S_{CL} & S_{CJ} \\
\hline
 & & 1 & & & & S_{\text{П}X} & S_{\text{ПП}} & S_{\text{П}L} & S_{\text{П}J} \\
\hline
 & & & 1 & & & S_{XX} & S_{X\text{П}} & S_{XL} & S_{XJ} \\
\hline
 & & & & 1 & & & & S_{LL} & S_{LJ} \\
\hline
\end{array}
\times
\begin{array}{|c|}
\hline
i_E \\ \hline
i_{CT} \\ \hline
i_{\text{П}T} \\ \hline
i_{XT} \\ \hline
i_{LT} \\ \hline
i_{CN} \\ \hline
i_{XN} \\ \hline
i_{\text{П}N} \\ \hline
i_{LN} \\ \hline
j(t) \\ \hline
\end{array}
= 0;
$$

б) для главных контуров

$$
\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
-S_{EC}^{\text{т}} & -S_{CC}^{\text{т}} & & & & 1 & & & & \\
\hline
-S_{EX}^{\text{т}} & -S_{CX}^{\text{т}} & -S_{\text{П}X}^{\text{т}} & -S_{XX}^{\text{т}} & & & 1 & & & \\
\hline
-S_{E\text{П}}^{\text{т}} & -S_{C\text{П}}^{\text{т}} & -S_{\text{ПП}}^{\text{т}} & -S_{X\text{П}}^{\text{т}} & & & & 1 & & \\
\hline
-S_{EL}^{\text{т}} & -S_{CL}^{\text{т}} & -S_{\text{П}L}^{\text{т}} & -S_{XL}^{\text{т}} & -S_{LL}^{\text{т}} & & & & 1 & \\
\hline
-S_{EJ}^{\text{т}} & -S_{CJ}^{\text{т}} & -S_{\text{П}J}^{\text{т}} & -S_{XJ}^{\text{т}} & -S_{LJ}^{\text{т}} & & & & & 1 \\
\hline
\end{array}
\begin{array}{|c|}
\hline
e(t) \\ \hline
u_{CT} \\ \hline
u_{\text{П}T} \\ \hline
u_{XT} \\ \hline
u_{LT} \\ \hline
u_{CN} \\ \hline
u_{XN} \\ \hline
u_{\text{П}N} \\ \hline
u_{LN} \\ \hline
u_J \\ \hline
\end{array}
= 0,
$$

где индекс П относится к безреактивным дугам с переменными по времени параметрами, а в рамки заключены субматрицы матрицы сечений для безреактивных дуг.

Из топологических уравнений следуют выражения:

а) для главных сечений

$$i_{CT} = -S_{CC} i_{CN} - S_{CX} i_{XN} - S_{C\text{П}} i_{\text{П}N} - S_{CL} i_{LN} - S_{CJ}\, j(t),$$

$$i_{\text{П}T} = -S_{\text{П}X} i_{XN} - S_{\text{ПП}} i_{\text{П}N} - S_{\text{П}L} i_{LN} - S_{\text{П}J}\, j(t),$$

$$i_{XT} = -S_{XX} i_{XN} - S_{X\text{П}} i_{\text{П}N} - S_{XL} i_{LN} - S_{XJ}\, j(t),$$

$$i_{LT} = -S_{LL} i_{LN} - S_{LJ}\, j(t);$$

б) для главных контуров

$$u_{CN} = S_{EC}^{\text{т}} e(t) + S_{CC}^{\text{т}} u_{CT},$$

$$u_{XN} = S_{EX}^{\text{т}} e(t) + S_{CX}^{\text{т}} u_{CT} + S_{\text{П}X}^{\text{т}} u_{\text{П}T} + S_{XX}^{\text{т}} u_{XT},$$

$$u_{\text{П}N} = S_{E\text{П}}^{\text{т}} e(t) + S_{C\text{П}}^{\text{т}} u_{CT} + S_{\text{ПП}}^{\text{т}} u_{\text{П}T} + S_{X\text{П}}^{\text{т}} u_{XT},$$

$$u_{LN} = S_{EL}^{\text{т}} e(t) + S_{CL}^{\text{т}} u_{CT} + S_{\text{П}L}^{\text{т}} u_{\text{П}T} + S_{XL}^{\text{т}} u_{XT} + S_{LL}^{\text{т}} u_{LT}.$$

Для подмножеств П, X, C, L-дуг справедливы равенства:

$$u_{\Pi T}=R_{\Pi T}i_{\Pi T};\ i_{\Pi T}=G_{\Pi T}u_{\Pi T};\ R_{\Pi T},G_{\Pi T}\subset\Pi_T,$$
$$u_{\Pi N}=R_{\Pi N}i_{\Pi N};\ i_{\Pi N}=G_{\Pi N}u_{\Pi N};\ R_{\Pi N},G_{\Pi N}\subset\Pi_N,$$
$$u_{XT}=R_T i_{XT};\ i_{XT}=G_T u_{XT};\ R_T,G_T\subset X_T,$$
$$u_{XN}=R_N i_{XN};\ i_{XN}=G_N u_{XN};\ R_N,G_N\subset X_N,$$
$$i_{CT}=C_T\frac{du_{CT}}{dt},\ i_{CN}=C_N\frac{du_{CN}}{dt},$$
$$u_{LT}=L_T\frac{di_{LT}}{dt}+L_{NT}\frac{di_{LN}}{dt},\ u_{LN}=L_{NT}\frac{di_{LT}}{dt}+L_N\frac{di_{LN}}{dt}.$$

Согласно выражениям тока i_{CT} и напряжения u_{LN} можно записать

$$C_T\frac{du_{CT}}{dt}=-S_{CC}C_N\frac{du_{CN}}{dt}-S_{CX}i_{XN}-S_{C\Pi}i_{\Pi N}-S_{CL}i_{LN}-S_{CJ}j(t),$$
$$\left(L_N-S_{LL}^{\text{т}}L_{TN}\right)\frac{di_{LN}}{dt}=-\left(L_{NT}-S_{LL}^{\text{т}}L_T\right)\frac{di_{LT}}{dt}+S_{EL}^{\text{т}}e(t)+S_{CL}^{\text{т}}u_{CT}+S_{\Pi L}^{\text{т}}u_{\Pi T}+S_{XL}^{\text{т}}u_{XT}.$$

Выразим i_{XN}, $i_{\Pi N}$, $u_{\Pi T}$, u_{XT}, входящие в эти равенства, через переменные состояния, ЭДС и источники тока.

Подставляя формулы для $u_{\Pi T}, i_{\Pi N}, i_{XN}$ в уравнение для $i_{\Pi T}$ и используя для преобразований выражения u_{XN} и $u_{\Pi N}$, получим

$$G_0u_{\Pi T}=-G_1u_{CT}-S_{\Pi L}i_{LN}-G_2e(t)-S_{\Pi J}j(t)-G_3u_{XT},$$

где $G_0=G_{\Pi T}+S_{\Pi X}G_NS_{\Pi X}^{\text{т}}+S_{\Pi\Pi}G_{\Pi N}S_{\Pi\Pi}^{\text{т}};G_1=S_{\Pi X}G_NS_{CX}^{\text{т}}+S_{\Pi\Pi}G_{\Pi N}S_{C\Pi}^{\text{т}};$

$$G_2=S_{\Pi X}G_NS_{EX}^{\text{т}}+S_{\Pi\Pi}G_{\Pi N}S_{E\Pi}^{\text{т}};G_3=S_{\Pi X}G_NS_{XX}^{\text{т}}+S_{\Pi\Pi}G_{\Pi N}S_{X\Pi}^{\text{т}}.$$

Уравнение для i_{XT} при использовании выражений $i_{XT}, i_{\Pi N}, i_{XN}$ из подмножеств для П- и X-дуг, а также уравнений для напряжений u_{XN} и $u_{\Pi N}$ преобразуются к виду

$$G_4u_{XT}=-G_5u_{CT}-S_{XL}i_{LN}-G_6e(t)-S_{XJ}j(t)-G_7u_{\Pi T},$$

где $G_4=G_T+S_{XX}G_NS_{XX}^{\text{т}}+S_{X\Pi}G_{\Pi N}S_{X\Pi}^{\text{т}};G_5=S_{XX}G_NS_{CX}^{\text{т}}+S_{X\Pi}G_{\Pi N}S_{C\Pi}^{\text{т}};$

$$G_6=S_{XX}G_NS_{EX}^{\text{т}}+S_{X\Pi}G_{\Pi N}S_{E\Pi}^{\text{т}};G_7=S_{XX}G_NS_{\Pi X}^{\text{т}}+S_{X\Pi}G_{\Pi N}S_{\Pi\Pi}^{\text{т}}.$$

Решая систему полученных выше равенств относительно u_{XT} и $u_{\Pi T}$, находим:

$$u_{XT}=-G_{01}^{-1}\Big[\left(G_5-G_7G_0^{-1}G_1\right)u_{CT}+\left(S_{XL}-G_7G_0^{-1}S_{\Pi L}\right)i_{LN}+$$
$$+\left(G_6-G_7G_0^{-1}G_2\right)e(t)+\left(S_{XJ}-G_7G_0^{-1}S_{\Pi J}\right)j(t)\Big];$$
$$u_{\Pi T}=-G_0^{-1}\Big\{\left[G_1-G_3G_{01}^{-1}\left(G_5-G_7G_0^{-1}G_1\right)\right]u_{CT}-$$
$$\left[S_{\Pi L}-G_3G_{01}^{-1}\left(S_{XL}-G_7G_0^{-1}S_{\Pi L}\right)\right]i_{LN}-\left[G_2-G_3G_{01}^{-1}\left(G_6-G_7G_0^{-1}G_2\right)\right]e(t)-$$
$$-\left[S_{\Pi J}-G_3G_{01}^{-1}\left(S_{XJ}-G_7G_0^{-1}S_{\Pi J}\right)\right]j(t)\Big\},$$

где $G_0=G_T+S_{XX}G_NS_{XX}^{\text{т}};\ G_{01}=G_4-G_7G_0^{-1}G_3$.

Подстановка формул для $u_{XN}, u_{XT}, u_{\Pi T}$ из подмножеств П- и X-дуг в уравнение для u_{XN} и использование для преобразований выражений $i_{\Pi T}$ и i_{XT}

позволяет получить равенство

$$R_0 i_{XN} = S_{CX}^{\text{т}} u_{CT} - R_1 i_{LN} + S_{EX}^{\text{т}} e(t) - R_2 j(t) - R_3 i_{\Pi N},$$

где

$$R_0 = R_N + S_{\Pi X}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi X} + S_{XX}^{\text{т}} R_T S_{XX};\; R_1 = S_{\Pi X}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi L} + S_{XX}^{\text{т}} R_T S_{XL};$$

$$R_2 = S_{\Pi X}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi J} + S_{XX}^{\text{т}} R_T S_{XJ};\; R_3 = S_{\Pi X}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi\Pi} + S_{XX}^{\text{т}} R_T S_{X\Pi.}$$

Преобразование уравнения для $u_{\Pi N}$ с помощью формул для $u_{\Pi T}$, $u_{\Pi N}$, u_{XT} из подмножеств П- и X-дуг, а затем использование выражений $i_{\Pi T}$ и i_{XT} приводит к равенству

$$R_4 i_{\Pi N} = S_{C\Pi}^{\text{т}} u_{CT} - R_5 i_{LN} + S_{E\Pi}^{\text{т}} e(t) - R_6 j(t) - R_7 i_{XN},$$

где

$$R_4 = R_{\Pi N} + S_{\Pi\Pi}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi\Pi} + S_{X\Pi}^{\text{т}} R_T S_{X\Pi};\; R_5 = S_{\Pi\Pi}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi L} + S_{X\Pi}^{\text{т}} R_T S_{XL};$$

$$R_6 = S_{\Pi\Pi}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi J} + S_{X\Pi}^{\text{т}} R_T S_{XJ};\; R_7 = S_{\Pi\Pi}^{\text{т}} R_{\Pi T} S_{\Pi X} + S_{X\Pi}^{\text{т}} R_T S_{XX.}$$

Решение системы полученных уравнений относительно $i_{\Pi N}$ и i_{XN} дает следующие выражения:

$$i_{\Pi N} = R_0^{-1}\Big[\Big(S_{C\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{CX}^{\text{т}}\Big)u_{CT} - \Big(R_5 - R_7 R_0^{-1} R_1\Big)i_{LN} +$$
$$+\Big(S_{E\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{EX}^{\text{т}}\Big)e(t) - \Big(R_6 - R_7 R_0^{-1} R_2\Big)j(t)\Big];$$

$$i_{XN} = R_0^{-1}\Big\{\Big[S_{CX}^{\text{т}} - R_3 R_{01}^{-1}\Big(S_{C\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{CX}^{\text{т}}\Big)\Big]u_{CT} -$$
$$\Big[R_1 - R_3 R_{01}^{-1}\Big(R_5 - R_7 R_0^{-1} R_1\Big)\Big]i_{LN} + \Big[S_{EX}^{\text{т}} - R_3 R_0^{-1}\Big(S_{E\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_{01}^{-1} S_{EX}^{\text{т}}\Big)\Big]e(t) -$$
$$-\Big[R_2 - R_3 R_{01}^{-1}\Big(R_6 - R_7 R_0^{-1} R_2\Big)\Big]j(t)\Big\},$$

где $R_0 = R_N + S_{XX}^{\text{т}} R_T S_{XX}$; $R_{01} = R_4 - R_7 R_0^{-1} R_3$.

Раскроем уравнение для du_{CT}/dt, учитывая, что du_{CN}/dt найдено дифференцированием u_{CN}, т.е. запишем соотношение:

$$\frac{du_{CN}}{dt} = S_{EC}^{\text{т}} \frac{de(t)}{dt} + S_{CC}^{\text{т}} \frac{du_{CT}}{dt},$$

или, используя вновь полученные выражения $i_{\Pi N}$ и i_{XN}:

$$\Big(C_T + S_{CC} C_N S_{CC}^{\text{т}}\Big)\frac{du_{CT}}{dt} =$$
$$= -\Big\{S_{CX} R_0^{-1}\Big[S_{CX}^{\text{т}} - R_3 R_0^{-1}\Big(S_{C\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{CX}^{\text{т}}\Big)\Big] + S_{C\Pi} R_{01}^{-1}\Big(S_{C\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{CX}^{\text{т}}\Big)\Big\}u_{CT} -$$
$$-\Big\{S_{CL} - S_{CX} R_0^{-1}\Big[R_1 - R_3 R_0^{-1}\Big(R_5 - R_7 R_0^{-1} R_1\Big)\Big] - S_{C\Pi} R_{01}^{-1}\Big(R_5 - R_7 R_0^{-1} R_1\Big)\Big\}i_{LN} -$$
$$-\Big\{S_{CX} R_0^{-1}\Big[S_{EX}^{\text{т}} - R_3 R_0^{-1}\Big(S_{E\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{EX}^{\text{т}}\Big)\Big] + S_{C\Pi} R_{01}^{-1}\Big(S_{E\Pi}^{\text{т}} - R_7 R_0^{-1} S_{EX}^{\text{т}}\Big)\Big\}e(t) -$$
$$-\Big\{S_{CJ} - S_{CX} R_0^{-1}\Big[R_2 - R_3 R_{01}^{-1}\Big(R_6 - R_7 R_0^{-1} R_2\Big)\Big] - S_{C\Pi} R_{01}^{-1}\Big(R_6 - R_7 R_0^{-1} R_2\Big)\Big\}j(t) -$$
$$- S_{CC} C_N S_{EC}^{\text{т}} \frac{de(t)}{dt}.$$

Аналогично раскроем уравнение для di_{LN}/dt с учетом того, что di_{LT}/dt определяется дифференцированием i_{LT} по времени, т.е. получим уравнение

$$\frac{di_{LT}}{dt} = -S_{LL}\,\frac{di_{LN}}{dt} - S_{LJ}\,\frac{dj(t)}{dt},$$

или, используя вновь полученные выражения u_{XT} и $u_{\text{П}T}$:

$$\begin{aligned}
&\left(L_N - S_{LL}^{\text{т}}L_{TN} - L_{NT}S_{LL} + S_{LL}^{\text{т}}L_T S_{LL}\right)\frac{di_{LN}}{dt} = \\
&= \left\{S_{CL}^{\text{т}} - S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[G_1 - G_3G_{01}^{-1}\left(G_5 - G_7G_0^{-1}G_1\right) - S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}\left(G_5 - G_7G_0^{-1}G_1\right)\right]\right\}u_{CT} - \\
&- \left\{S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[S_{\text{П}L} - G_3G_0^{-1}\left(S_{XL} - G_7G_0^{-1}S_{\text{П}L}\right)\right] + S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}\left(S_{XL} - G_7G_0^{-1}S_{\text{П}L}\right)\right\}i_{LN} + \\
&+ \left\{S_{EL}^{\text{т}} - S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[G_2 - G_3G_{01}^{-1}\left(G_6 - G_7G_0^{-1}G_2\right) - S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}\left(G_6 - G_7G_0^{-1}G_2\right)\right]\right\}e(t) - \\
&- \left\{S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[S_{\text{П}L} - G_3G_0^{-1}\left(S_{XJ} - G_7G_0^{-1}S_{\text{П}J}\right)\right] + S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}\left(S_{XJ} - G_7G_0^{-1}S_{\text{П}J}\right)\right\}j(t) + \\
&+ \left(L_{NT} - S_{LL}^{\text{т}}L_T\right)S_{LJ}\,\frac{dj(t)}{dt}.
\end{aligned}$$

Уравнения переменных состояния, представленные выше, в матрично-векторной форме записи имеют вид

$$Q_0\,\frac{dx(t)}{dt} = Q_{1\text{П}}x(t) + Q_{2\text{П}}v(t) + Q_3\,\frac{dv(t)}{dt}, \tag{22}$$

$$Q_0 = \left|\begin{array}{c|c}
C_T + S_{CC}C_N S_{CC}^{\text{т}} & \\
\hline
 & L_N - S_{LL}^{\text{т}}L_{TN} - L_{NT}S_{LL} + S_{LL}^{\text{т}}L_T S_{LL}
\end{array}\right|;$$

$$Q_{1\text{П}} = \left|\begin{array}{c|c}
\begin{aligned}&-\left\{S_{CX}R_0^{-1}\left[S_{CX}^{\text{т}} - R_3R_{01}^{-1}\left(S_{C\text{П}}^{\text{т}} - \right.\right.\right.\\ &\left.\left.- R_7R_0^{-1}S_{CX}^{\text{т}}\right)\right] + S_{C\text{П}}R_0^{-1}\left(S_{C\text{П}}^{\text{т}} - \right.\\ &\left.\left.- R_7R_0^{-1}S_{CX}^{\text{т}}\right)\right\}\end{aligned} &
\begin{aligned}&-\left\{S_{CL} - S_{CX}R_0^{-1}\left[R_1 - \right.\right.\\ &\left.- R_3R_{01}^{-1}\left(R_5 - R_7R_0^{-1}R_1\right)\right] - \\ &\left.- S_{C\text{П}}R_{01}^{-1}\left(R_5 - R_7R_0^{-1}R_1\right)\right\}\end{aligned} \\
\hline
\begin{aligned}&S_{CL}^{\text{т}} - S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[G_1 - G_3G_{01}^{-1}(G_5 - \right.\\ &\left.- G_7G_0^{-1}G_1)\right] - S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}(G_5 - \\ &- G_7G_0^{-1}G_1)\end{aligned} &
\begin{aligned}&-\left\{S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[S_{\text{П}L} - G_3G_{01}^{-1}(S_{XL} - \right.\right.\\ &\left.- G_7G_0^{-1}S_{\text{П}L})\right] + S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}(S_{XL} - \\ &\left.- G_7G_0^{-1}S_{\text{П}L})\right\}\end{aligned}
\end{array}\right|;$$

$$Q_{2\text{П}} = \left|\begin{array}{c|c}
\begin{aligned}&-\left\{S_{CX}R_0^{-1}\left[S_{EX}^{\text{т}} - R_3R_{01}^{-1}\left(S_{E\text{П}}^{\text{т}} - \right.\right.\right.\\ &\left.\left.- R_7R_0^{-1}S_{EX}^{\text{т}}\right)\right] + S_{C\text{П}}R_0^{-1}\left(S_{E\text{П}}^{\text{т}} - \right.\\ &\left.\left.- R_7R_0^{-1}S_{EX}^{\text{т}}\right)\right\}\end{aligned} &
\begin{aligned}&-\left\{S_{CJ} - S_{CX}R_0^{-1}\left[R_2 - \right.\right.\\ &\left.- R_3R_{01}^{-1}(R_6 - R_7R_0^{-1}R_2)\right] - \\ &\left.- S_{C\text{П}}R_{01}^{-1}\left(R_6 - R_7R_0^{-1}R_2\right)\right\}\end{aligned} \\
\hline
\begin{aligned}&S_{EL}^{\text{т}} - S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[G_2 - \right.\\ &\left.- G_3G_{01}^{-1}(G_6 - G_7G_0^{-1}G_2)\right] - \\ &- S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}\left(G_6 - G_7G_0^{-1}G_2\right)\end{aligned} &
\begin{aligned}&-\left\{S_{\text{П}L}^{\text{т}}G_0^{-1}\left[S_{\text{П}J} - G_3G_{01}^{-1}(S_{XJ} - \right.\right.\\ &\left.- G_7G_0^{-1}S_{\text{П}J})\right] + S_{XL}^{\text{т}}G_{01}^{-1}(S_{XJ} - \\ &\left.- G_7G_0^{-1}S_{\text{П}J})\right\}\end{aligned}
\end{array}\right|;$$

$$Q_3 = \left|\begin{array}{c|c}
-S_{CC}C_N S_{EC}^{\text{т}} & \\
\hline
 & L_{NT}S_{LJ} - S_{LL}^{\text{т}}L_T S_{LJ}
\end{array}\right|;$$

Алгоритм формирования уравнений состояния электронных устройств, изложенный выше, не является единственным: может быть изменена иерархия следования резистивных компонентов с постоянными и переменными параметрами, в частности, – на обратную и, кроме того, выполняемые при создании алгоритма различные подстановки того или иного параметра или те или иные преобразования промежуточных уравнений могут быть выполнены иным образом.

В результате векторно-матричное уравнение состояния электронного устройства может иметь отличный от уравнения (22) вид.

В остальном алгоритм формирования на основе векторно-матричного уравнения (22) аналогичен алгоритму формирования уравнений состояния на основе векторно-матричного уравнения (20) [1].

Необходимо отметить, что переменные по времени параметры компонентов схемы в процессе решения уравнений состояния устройств (22) имеют постоянные значения в пределах шага дискретизации переходного процесса по времени, т.е. имеют фиксированные (постоянные) значения для текущего момента времени рассчитываемого процесса.

Таким образом, алгоритм формирования уравнений состояния на основе формул (20) может быть принят как базовый.

Заключение

Уравнения переменных состояния электронных устройств с постоянными и переменными по времени параметрами компонентов получены в обобщенной форме записи с учетом возможных схемных особенностей в виде «звезд» из индуктивностей и «многоугольников» («треугольников») из конденсаторов, т.е. с учетом индуктивных сечений и емкостных контуров. Это выгодно отличает алгоритм от известных, – например, работа [2], где выполнена детализация возможных схем, включающих такие особенности.

Алгоритм формирования уравнений переменных состояния электронных устройств сводится к заполнению структурно-параметрических матриц уравнений с использованием простейших математических операций с блочными матрицами.

Подобные алгоритмы требуют минимальных затрат машинного времени на переформирование системы дифференциальных уравнений для цепей с постоянными и переменными по времени параметрами компонентов. Алгоритм является достаточно общим, так как в его основе лежит метод переменных состояния электрических и электронных цепей [3 – 12].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Формирование уравнений состояния электронных схем с постоянными и переменными параметрами по единому алгоритму. I // Информатика и системы управления. – 2016. – № 1(47) . – С.65-72.
2. *Курганов С.А.* Формирование уравнений состояния линейных электрических цепей с обобщенными индуктивными сечениями и емкостными контурами // Электричество. – 2013. –

№9. – С.49-55.
3. *Шеин А.Б., Лазарева Н.М.* Методы проектирования электронных устройств. – М.: Инфра-инженерия, 2011.
4. *Чуа Л.О., Лин Пен Мин.* Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы. – М.: Энергия, 1980.
5. *Демирчян К.*С., *Бутырин П.А.* Моделирование и машинный расчет электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1998.
6. *Влах И., Сингхал К.* Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. – М.: Радио и связь, 1988.
7. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Метод решения уравнений состояния электронных устройств // Проектирование и технология электронных средств. – 2012. – № 1. – С.19-25.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Решение задачи параметрического синтеза схем электронных устройств на основе уравнений состояния. I // Информатика и системы управления. – 2015. – №1(43). – С.83-92.
12. *Чье Ен Ун, Шеин А.Б.* Решение задачи параметрического синтеза схем электронных устройств на основе уравнений состояния. II // Информатика и системы управления. – 2015. – №2(44). – С.45-52.

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