УДК 004.94

Смешанное моделирование дискретных устройств с использованием автоматической декомпозиции макромодели функционального блока в модели элементов

© И.В. Рудаков, А.В. Шляева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В работе показано, что смешанное моделирование структур является составной частью метода иерархического моделирования сложных дискретных структур. Рассмотрен вопрос смешанного моделирования сложных дискретных устройств с использованием макромоделей устройств на уровне функциональных блоков и их декомпозиции в элементы дискретных структур с разной степенью детализации для анализа и контроля правильности функционирования дискретных устройств на ранних этапах разработки и проектирования.

Ключевые слова: *смешанное моделирование, макромодель функционального блока дискретной структуры, алгоритм декомпозиции макромодели.*

Известно, что в процессе проектирования систем формируются определенные представления о системе, отражающие ее существенные свойства с той или иной степенью подробности. В этих представлениях выделяют составные части — уровни проектирования, которые, в свою очередь, подразделяют на горизонтальные (иерархические) и вертикальные уровни проектирования. Вертикальные уровни проектирования называют также аспектами проектирования. Представления о сложных объектах внутри каждого аспекта необходимо разделять на иерархические уровни (уровни абстрагирования).

Выделение горизонтальных (иерархических) уровней лежит в основе блочно-иерархического подхода к проектированию [1]. На верхнем уровне используют наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности проектируемой системы. На следующих уровнях степень подробности описания возрастает, при этом рассматривают уже отдельные блоки системы, но с учетом воздействий на каждый из них его соседей. Такой подход позволяет на каждом иерархическом уровне формулировать задачи приемлемой сложности, поддающиеся решению с помощью имеющихся средств проектирования. При этом описание каждого блока не должно быть слишком подробным, так как это приведет к чрезмерной громоздкости описаний и невозможности решения возникающих проектных задач. Разбиение на уровни должно быть таким, чтобы документация на блок любого уровня была обозрима и воспринимаема одним человеком [1].

Смешанное моделирование структур является составной частью метода иерархического моделирования сложных дискретных структур. При этом осуществляется анализ схемы устройства с использованием моделей, описывающих функционирование сложных дискретных структур с разной степенью детализации: одна часть описывается на уровне макромоделей функциональных блоков, а другая — на уровне элементов сложной структуры с целью уточнения параметров элементов.

Необходимым условием реализации смешанного моделирования с использованием алгоритма декомпозиции макромодели блока является обеспечение информационной согласованности подсистем макромоделирования и моделирования на уровне элементов, что достигается при помощи базы данных подсистемы анализа и контроля функционирования сложных дискретных структур.

В результате декомпозиции функционирование сети автоматов $\overset{\circ}{N}$ представляется функционированием множества компонентных автоматов $\overset{\circ}{KA}$. Согласно утверждению [2], функционирование сети $\overset{\circ}{N}$ эквивалентно функционированию макромодели $\hat{S}$. Необходимо доказать, что функционирование компонентного автомата $\overset{\circ}{KA_i} \in \overset{\circ}{N}$ эквивалентно таковому элемента сложной структуры $F_i \in \hat{S}$.

Для доказательства этого утверждения необходимо определить функционирование компонентного автомата $\overset{\circ}{KA_i}$. По определению [2], компонентным автоматом называется полуавтомат, имеющий следующие составляющие:

$$KA_i^\circ = \left(C_i^\circ, Z_i^\circ, \delta_i^\circ\right), \tag{1}$$

где $\overset{\circ}{C_i}$, $\overset{\circ}{Z_i}$, $\overset{\circ}{\delta_i}$ — множество состояний, входной алфавит и функция переходов компонентного автомата соответственно.

Доопределим компонентный автомат следующим образом. Выше отмечалось, что выходная функция сети g° реализует отображение

$$g^\circ : C_N^\circ \cdot Z_N^\circ \to W_N^\circ, \tag{2}$$

где $\overset{\circ}{C_N}$ — множество состояний всех компонентных автоматов $\overset{\circ}{KA_i} \in \overset{\circ}{N}$, $i = \overline{1,n}$, n — количество $\overset{\circ}{KA_i}$;

$$C_N^\circ = C_1^\circ \cdot C_2^\circ \cdot \ldots \cdot C_n^\circ; \tag{3}$$

$$Z_N^\circ = Z_1^\circ \cdot Z_2^\circ \cdot \ldots \cdot Z_n^\circ \tag{4}$$

— входной алфавит сети $\overset{\circ}{N}$, включающий входные алфавиты компонентных автоматов $\overset{\circ}{KA_i}$;

$$W_N^\circ = W_1^\circ \cdot W_2^\circ \cdot \ldots \cdot W_n^\circ \tag{5}$$

— выходной алфавит сети $\overset{\circ}{N}$, включающий выходные алфавиты компонентных автоматов $\overset{\circ}{KA_i}$.

Подставив (3 и 4) в (5), получим:

$$g^{\circ}:\left(C_1^{\circ}\cdot C_2^{\circ}\cdot\ldots\cdot C_n^{\circ}\right)\left(Z_1^{\circ}\cdot Z_2^{\circ}\cdot\ldots\cdot Z_n^{\circ}\right)\to W_1^{\circ}\cdot W_2^{\circ}\cdot\ldots\cdot W_n^{\circ}. \tag{6}$$

Объединим (сгруппируем) вместе i-е члены выражения (3.39), тогда выходная функция сети $\overset{\circ}{N}$ примет вид:

$$g^{\circ}:\left(C_1^{\circ}\cdot Z_1^{\circ}\to W_1^{\circ}\right)\left(C_2^{\circ}\cdot Z_2^{\circ}\to W_2^{\circ}\right)\cdot\ldots\cdot\left(C_n^{\circ}\cdot Z_n^{\circ}\to W_n^{\circ}\right). \tag{7}$$

Введя обозначения $g_1^{\circ}/C_1^{\circ}\cdot Z_1^{\circ}\to W_1^{\circ}$, $g_2^{\circ}/C_2^{\circ}\cdot Z_2^{\circ}\to W_2^{\circ},\ldots,$ $g_n^{\circ}/C_n^{\circ}\cdot Z_n^{\circ}\to W_n^{\circ}$, получим зависимость выходной функции $\overset{\circ}{g}$ сети $\overset{\circ}{N}$ от выходных функций компонентных автоматов $\overset{\circ}{KA_i}$:

$$g^{\circ}=g_1^{\circ}\cdot g_2^{\circ}\cdot\ldots\cdot g_n^{\circ}. \tag{8}$$

Таким образом, компонентный автомат определим следующим образом:

$$KA_i^{\circ}=\left(Z_i^{\circ},C_i^{\circ},W_i^{\circ},\delta_i^{\circ},g_i^{\circ}\right). \tag{9}$$

Учитывая соотношения (3)–(5), можно ввести последовательностную детерминированную функцию $\overset{\circ}{h}$ компонентного автомата $\overset{\circ}{KA_i}$:

$$h_i^{\circ}:\left(C_i^{\circ},\delta_i^{\circ},g_i^{\circ}\right), \tag{10}$$

т. е. функция $\overset{\circ}{h_i}$, приписанная автомату $\overset{\circ}{KA_i}$, отображает функцию перехода $\overset{\circ}{KA_i}$ — $\overset{\circ}{\delta_i}$, множество состояний $\overset{\circ}{KA_i}$ — $\overset{\circ}{C_i}$ и функцию выхода $\overset{\circ}{KA_i}$ — $\overset{\circ}{g_i}$.

Следовательно, функционирование компонентного автомата $\overset{\circ}{KA_i}$ можно описать следующим образом: в последовательные моменты времени t на входы $v^{\circ}=\overline{1,r}$ автомата $\overset{\circ}{KA_i}$ поступают входные буквы $e_1^{Z_i^{\circ}},e_2^{Z_i^{\circ}},\ldots,e_r^{Z_i^{\circ}}$, при этом $\overset{\circ}{KA_i}$ находится в одном из внутренних состояний, кодируемых элементами из $\overset{\circ}{h_i}$; с выходов автомата $\overset{\circ}{KA_i}$ ($u^{\circ}=\overline{1,n}$) снимаются выходные буквы $e_1^{W_i^{\circ}},e_2^{W_i^{\circ}},\ldots,e_n^{W_i^{\circ}}$.

Иначе:

$$\begin{gathered}\left(\forall v^{\circ}\right)\left(v^{\circ}=\overline{1,r}\right)\left(sttm\left(Z_i^{\circ}\left(KA_i^{\circ}\right),t\right)\right)\left(\forall t\right)\left(t\ge 0\right)\left(t=\left\{t_1,t_2,\ldots\right\}\right)=e^{Z_i^{\circ}}\ \&\\ \left(\forall h_i^{\circ}\right)\left(\mathit{O\Pi}\left(Z_i^{\circ}\right)\times h_i^{\circ}\to \mathit{O\Pi}\left(W_i^{\circ}\right)\right)\&\left(z_i^{\circ}\leftrightarrow v^{\circ}\right)\left(w_i^{\circ}\leftrightarrow u^{\circ}\right)\to\\ \to\left(\forall u^{\circ}\right)\left(u^{\circ}=\overline{1,n}\right)\left(sttm\left(W_i^{\circ}\left(KA_i^{\circ}\right),t\right)\right)=e^{W_i^{\circ}}.\end{gathered} \tag{11}$$

Вычислительную процедуру, устанавливающую соответствие между входными последовательностями, образованными из входных букв, последовательностями состояний и выходными последовательностями, образованными из выходных букв, назовем функционированием компонентного автомата $\overset{\circ}{KA_i}$, принадлежащего сети $\overset{\circ}{N}$.

Функционирование элемента сложной структуры определяется выражением:

$$\left(\forall p_i\right)\left(p_i=\overline{1,r_i}\right)\left(sttm\left(p_i,t\right)\right)\left(\forall t\right)\left(t\geq 0\right)\left(t=\left\{t_1,t_2,\ldots\right\}\right)=e^{p_i}\ \&$$
$$\left(\exists\theta_i\right)\left(ОП\left(X\right)\times\theta_i\to\theta_i\right)\left(ОП\left(x\right)\times\theta_i\to ОП\left(Y\right)\right)\left(x\leftrightarrow p_i\right)\left(y\leftrightarrow q_i\right)\to$$
$$\to\left(\forall q_i\right)\left(q_i=\overline{1,n_i}\right)\left(sttm\left(Q_i,t\right)\right)=e^{Q_i}.$$

Утверждение 1. Функционирование компонентного автомата $\overset{\circ}{KA_i}$, принадлежащего сети автоматов $\overset{\circ}{N}$, эквивалентно функционированию элемента сложной структуры F_i, принадлежащему макромодели функционального блока сложной структуры $\hat{S}$.

Доказательство. Компонентный автомат $\overset{\circ}{KA_i}$ и элемент сложной структуры F_i будут функционировать эквивалентно, если при подаче одной и той же последовательности входных букв на автомат $\overset{\circ}{KA_i}$ и элемент F_i в одни и те же моменты времени на выходе $\overset{\circ}{KA_i}$ и F_i одновременно будут появляться одни и те же последовательности выходных букв. Иначе:

$$\left(\forall v^\circ\right)\left(v^\circ=\overline{1,r}\right)\left(sttm\left(Z_i^\circ\left(KA_i^\circ\right),t\right)\right)\left(\forall t\right)\left(t\geq 0\right)\left(t=\left\{t_1,t_2,\ldots\right\}\right)=e^{Z_i^\circ}=$$
$$=\left(\forall h_i^\circ\right)\left(ОП\left(Z_i^\circ\right)\times h_i^\circ\to h_i^\circ\right)\left(ОП\left(Z_i^\circ\right)\times h_i^\circ\to ОП\left(W_i^\circ\right)\right)\&$$
$$\left(z_i^\circ\leftrightarrow v^\circ\right)\left(w_i^\circ\leftrightarrow u^\circ\right)\to$$
$$\to\left(\forall u^\circ\right)\left(u^\circ=\overline{1,n}\right)\left(sttm\left(W_i^\circ\left(KA_i^\circ\right),t\right)\right)=e^{W_i^\circ}= \qquad (12)$$
$$=\left(\forall p_i\right)\left(p_i=\overline{1,r_i}\right)\left(sttm\left(P_i,t\right)\right)\left(\forall t\right)\left(t\geq 0\right)\left(t=\left\{t_1,t_2,\ldots\right\}\right)=e^{P_i}=$$
$$=\left(\forall\theta_i\right)\left(ОП\left(X\right)\times\theta_i\to\theta_i\right)\left(ОП\left(X\right)\times\theta_i\to ОП\left(Y\right)\right)\left(x\leftrightarrow p_i\right)\left(y\leftrightarrow q_i\right)\to$$
$$\to\left(\forall q_i\right)\left(q_i=\overline{1,n_i}\right)\left(sttm\left(Q_i,t\right)\right)=e^{Q_i}.$$

Предположим, что компонентный автомат $\overset{\circ}{KA_i}$ и элемент F_i функционируют в одинаковые моменты времени, реализуют одни и те же функции и имеют равное количество входов и выходов.

Основываясь на сделанном предположении, можно записать, что:

1) если количество входов KA_i° равно количеству входов F_i и одновременно подаются одинаковые входные буквы, то входная последовательность автомата KA_i° будет эквивалентна входной последовательности F_i, т.е.

$$\begin{aligned}&\left(\left(\forall v^{\circ}\right)\left(v^{\circ}=\overline{1,r}\right)=\left(\forall p_i\right)\left(p_i=\overline{1,r_i}\right)\right)\&\\&\left(sttm\left(Z_i^{\circ}\left(KA_i^{\circ}\right),t\right)=sttm\left(P_i,t\right)\right)\to\\&\to\left(\left(\forall v^{\circ}\right)\left(v^{\circ}=\overline{1,r}\right)\left(sttm\left(Z_i^{\circ}\left(KA_i^{\circ}\right),t\right)\right)=e^{Z_i^{\circ}}\right)=\\&=\left(\left(\forall p_i\right)\left(p_i=\overline{1,r_i}\right)\left(sttm\left(P_i,t\right)\right)=e^{P_i}\right)\&\left(e^{Z_i^{\circ}}=e^{P_i}\right);\end{aligned}\tag{13}$$

2) если автомат KA_i° реализует одни и те же функции, что и элемент F_i, то последовательностные детерминированные функции KA_i° и F_i эквивалентны, т.е.

$$\begin{aligned}&\left(\left(\forall h_i^{\circ}\right)=\left(\forall\theta_i\right)\right)\to\left(\forall h_i^{\circ}\right)\left(O\Pi\left(Z_i^{\circ}\right)\times h_i^{\circ}\to h_i^{\circ}\right)\times\\&\times\left(O\Pi\left(Z_i^{\circ}\right)\times h_i^{\circ}\to O\Pi\left(W_i^{\circ}\right)\right)=\\&=\left(\forall\theta_i\right)\left(O\Pi\left(X\right),\times\theta_i\to\theta_i\right)\left(O\Pi\left(X\right)\times\theta_i\to O\Pi\left(Y\right)\right).\end{aligned}\tag{14}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned}&A25:\left(\forall v^{\circ}\right)\left(v^{\circ}=\overline{1,r}\right)\left(sttm\left(Z_i^{\circ}\left(KA_i^{\circ}\right),t\right)\right)\times\\&\times\left(\forall t\right)\left(t\geq 0\right)\left(t=\left\{t_1,t_2,\ldots\right\}\right)=e^{Z_i^{\circ}};\end{aligned}\tag{15}$$

$$\begin{aligned}&A26:\left(\forall h_i^{\circ}\right)\left(O\Pi\left(Z_i^{\circ}\right)\times h_i^{\circ}\to h_i^{\circ}\right)\times\\&\times\left(O\Pi\left(Z_i^{\circ}\right)\times h_i^{\circ}\to O\Pi\left(W_i^{\circ}\right)\right)\&\left(z_i^{\circ}\leftrightarrow v^{\circ}\right)\left(w_i^{\circ}\leftrightarrow u^{\circ}\right);\end{aligned}\tag{16}$$

$$A27:\left(\forall p_i\right)\left(p_i=\overline{1,r_i}\right)\left(sttm\left(P_i,t\right)\right)\left(\forall t\right)\left(t\geq 0\right)\left(t=\left\{t_1,t_2,\ldots\right\}\right)=e^{P_i};\tag{17}$$

$$\begin{aligned}&A28:\left(\forall\theta_i\right)\left(O\Pi\left(X\right)\times\theta_i\to\theta_i\right)\times\\&\times\left(O\Pi\left(X\right)\times\theta_i\to O\Pi\left(Y\right)\right)\left(x\leftrightarrow p_i\right)\left(y\leftrightarrow q_i\right);\end{aligned}\tag{18}$$

$$A29:\left(\forall u^{\circ}\right)\left(u^{\circ}=\overline{1,n}\right)\left(sttm\left(W_i^{\circ}\left(KA_i^{\circ}\right),t\right)\right)=e^{W_i^{\circ}};\tag{19}$$

$$A30:\left(\forall q_i\right)\left(q_i=\overline{1,n_i}\right)\left(sttm\left(Q_i,t\right)\right)=e^{Q_i}.\tag{20}$$

Подставив выражения (14)–(17) в (18), получим:

$$\left(A25\,\&\,A26\rightarrow A29\right)=\left(A27\,\&\,A28\rightarrow A30\right). \tag{21}$$

Выражение (21) является справедливым, так как каждый член левой части является эквивалентным соответствующим членом в правой части, т. е.

$A25 = A27$, согласно (1);

$A26 = A28$, согласно (2);

$A29 = A30$ как логические следствия из эквивалентных выражений.

Следовательно, утверждение 1 справедливо, и функционирование компонентного автомата KA_i° эквивалентно функционированию элемента сложной структуры F_i.

Выводы. Разработанный алгоритм декомпозиции макромодели функционального блока позволяет автоматически изменить степень детализации описания анализируемой сложной структуры и, таким образом, является средством осуществления смешанного моделирования. Результаты исследований показали, что в целом смешанное моделирование сложных дискретных устройств обладает необходимой эффективностью. Анализ результатов подтвердил, что при достаточной сложности и определенной топологии системы алгоритм уменьшает время анализа процесса функционирования такого класса устройств в среднем на 18 %, причем также уменьшается общая вероятность ошибки в системе (порядка 29 %) в силу подробного просмотра и анализа каждой подструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Рудаков И.В., Смирнов А.А. Исследование сложных дискретных систем на базе агентного метода. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2009, № 3, с. 33–41.

[2] Рудаков И.В. Методика иерархического исследования сложных дискретных структур. *Наука и образование*, 2012, вып 6, с. 251–260. http://technomag.edu.ru/70230.html

Статья поступила в редакцию 10.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Рудаков И.В., Шляева А.В. Смешанное моделирование дискретных устройств с использованием автоматической декомпозиции макромодели функционального блока в модели элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 6. URL http://engjournal.ru/catalog/it/hidden/781.html

Рудаков Игорь Владимирович родился в 1958 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981 г. Канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: irudakov@yandex.ru

Шляева Анна Викторовна родилась 1984 г., окончила кафедру «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии». Автор 15 научных работ. Области научных интересов: математическое моделирование, статистический анализ данных. e-mail: shlyaeva@gmail.com