

УДК 681.5.013

В.Г. Манжула

**МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СТРУКТУРНО-
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НЕИЗБЫТОЧНЫХ СМЕШАННЫХ
СФ-БЛОКОВ**

Предложена концептуальная модель обработки информации функционально-архитектурного подхода с учетом включения процедуры исключения структурной избыточности, функциональная модель архитектурного уровня процесса обработки информации и функциональная модель синтеза избыточных функциональных и электрических принципиальных схем смешанных (аналоговых) СФ-блоков. Рассмотрена реализация узла СФ-блока на основе принципа схемотехнической интеграции.

Синтез; сложный функциональный блок; концептуальная модель; функциональная модель; SADT-диаграмма.

V.G. Manzhula

**MODELS, METHODS AND ALGORITHMS STRUCTURAL PARAMETRIC
SYNTHESIS IRREDUNDANT MIXED SF UNITS**

In work the functional model of architectural level of process of processing of the information and functional model of the approach of synthesis of irredundant functional and electric circuit diagrams of the mixed (analog) difficult functional blocks are offered conceptual model of processing of the information of the is functional-architectural approach taking into account inclusion of procedure of an exception of structural redundancy. Realization of element of difficult functional block on the basis of principle integration is considered

Synthesis; the difficult functional block; conceptual model; functional model; SADT diagram.

Интерес к смешанным (AMS) СФ-блокам в последнее время растет, и работа в этой области сталкивается со значительными проблемами при проектировании, верификации и производстве [1], связанными с несоответствием между практикой проектирования в аналоговой и цифровой областях, что значительно увеличивает риск и стоимость проектирования.

Смешанное проектирование повсеместно использует стиль проектирования схем «снизу-вверх», при этом оказывается, что в сложных проектах наибольшее влияние на характеристики оказывает уровень архитектуры системы, а стиль проектирования «снизу-вверх» значительно сокращает возможности по исследованию структуры и ее оптимизации. Продолжительные расчеты всего чипа ограничивают возможности по верификации, что приводит к повторным проектным итерациям. Большая часть ошибок появляется в момент объединения блоков, а не внутри отдельных блоков, и при этом верификация неадекватна именно в случае комбинированных блоков. Ошибки, найденные при комбинировании блоков, трудно исправить, так как для этого требуется перепроектирование отдельных блоков. Стадии проекта часто требуют строго последовательного выполнения, в результате стиль проектирования «снизу-вверх» требует слишком много времени.

Альтернативой является переход к стилю проектирования «сверху-вниз». Такой стиль придает гораздо большее значение архитектуре на системном уровне и стадии исследования структуры проекта, с использованием для обширной оптимизации проекта таких средств, как Matlab, Simulink и моделирования с помощью

Verilog-AMS, VHDL-AMS. Данные средства обеспечивают большую возможность применения методов повторного использования, формализуют общение между проектировщиками, снижая повторные итерации.

Для решения задач разбиения и совместного проектирования такие производители, как Aldec, Cadence, Mentor Graphics, Synopsys, LSI Logic, NEC, Tera Systems, Synplicity, Celoxica, Xilinx MicroBlaze [2] на системном уровне используют подход функционально-архитектурного синтеза [3]. В таком подходе модель системы одновременно описывается на двух равноценных уровнях: функциональном – сеть приложений системы, разделённых на ряд функциональных задач, которые могут моделироваться с помощью различных вычислительных моделей таких, как дискретные события, конечные автоматы или потоки данных; архитектурном – сеть коммуникаций, основных IP-блоков.

Такой подход подразумевает следующую методологию синтеза. Вначале строятся явные отображения между двумя представлениями системы: функциональным и архитектурном, а потом на них накладывают разбиение, сделанное для вычислительных задач и коммуникаций. Полученную гибридную модель моделируют, а затем анализируют результаты на предмет изучения пригодности системной архитектуры в качестве средства реализации конечного продукта.

Однако указанный подход не исключает возможности получения финального продукта с излишне сложной структурой, при этом целесообразным является введение дополнительной процедуры контроля структурной и параметрической избыточности проектируемых систем. Особенно актуальным является введение данной процедуры при проектировании аналоговых и смешанных СФ-блоков, так как используемые этапы проектирования в этом случае имеют очень низкий уровень формализации.

Этапы обработки информации функционально-архитектурного подхода, модернизированного с учетом включения процедур анализа и исключения структурной и параметрической избыточности, представлены на рис. 1 [4]. Введение процедуры анализа структурной избыточности позволит оценить возможность упрощения структуры и определить варианты предполагаемой структуры, а процедура анализа допустимости позволит выявить и исключить неработоспособные упрощенные варианты. Для полноценного сокращения маршрута системного проектирования целесообразным является разработка процедуры одновременного исключения структурной и параметрической избыточности.

На рис. 2 представлена функциональная модель процесса обработки информации при синтезе избыточных структур архитектурного уровня концептуальной модели на основе SADT-диаграммы [5].

В качестве примера рассмотрим синтез структуры СФ-блока системы автономного энергоснабжения потребителя (П) с динамическим распределением ограниченного энергоресурса. Выбор структуры, параметров и закона управления, используемых в источнике питания (ИП), существенно влияет на важнейшие показатели, характеризующие качество ИП, в частности его стоимость и надежность.

Сокращение потребного запаса энергии, достигаемое в результате секционирования, и обусловленная этим экономическая выгода потенциально тем выше, чем выше степень дробления ИП на секции и чем больше в нем линий, сообщающих секции с потребителем. Однако это, в свою очередь, обуславливает его усложнение и, как следствие, возрастание вероятности отказов в его работе. Указанные обстоятельства обуславливают актуальность решения задачи выявления структур ИП, соответствующих заданному уровню экономичности и не обладающих избыточностью [6].

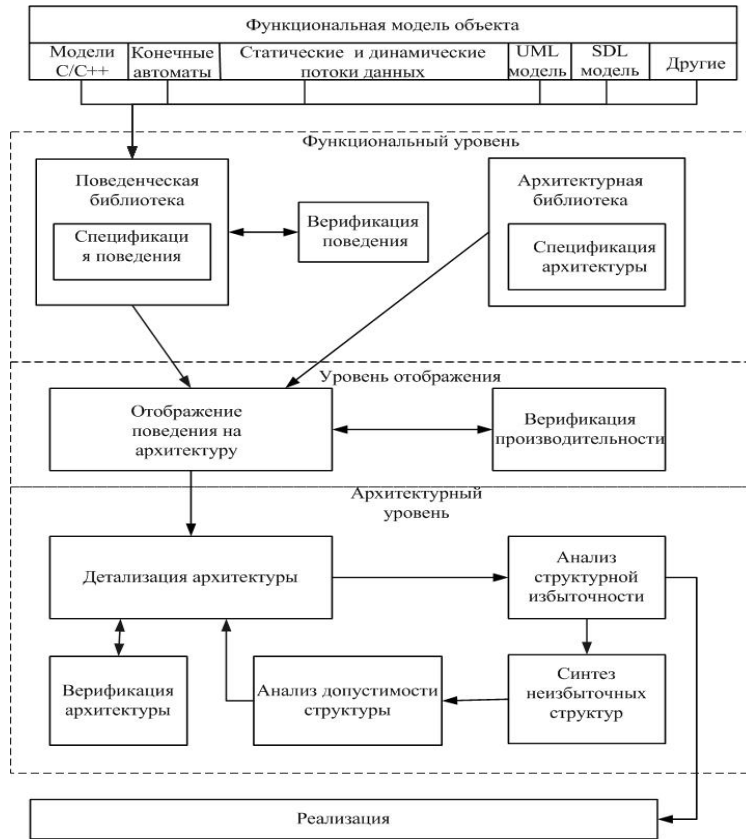


Рис. 1. Концептуальная модель избыточного функционально-архитектурного подхода системного проектирования



Рис. 2. Функциональная модель обработки информации при синтезе избыточных структур

Таким образом, неизвестными решаемой задачи являются: число n секций ИП и линий связи между секциями и магистралями (структура ИП). Выбор значений перечисленных неизвестных должен обеспечивать совместное выполнение соотношений. В представленной формулировке задача допускает многовариантное решение, допустимые варианты решения различаются соответствующей им оценкой качества ИП.

Показателем качества ИП, подлежащим минимизации, целесообразно считать остаток запаса ресурса в ИП в конечный момент времени. Кроме того, необходимо снизить число подключений секций ИП к магистралям и отключений от них, иными словами, ограничить число переключений (смен значений) функции управления $U(t)$. Данное требование отражает стремление косвенно ограничить вероятность отказов в работе системы, обусловленных указанными переключениями.

Структура решения рассматриваемой задачи определяется набором S номеров активных компонент $w_k(t)$. Учитывая, что каждой компоненте $w_k(t)$, $k \in S$ соответствует линия, связывающая i -ую секцию ИП с j -й магистралью (значения ij однозначно определяются значением k), набор S определяет перечень линий, используемых в ИП. Перечень линий связи одновременно определяет и число используемых секций, т.е. определяет структуру ИП.

Для решения задачи синтеза ИП предлагается выявить множество всех структур решений рассматриваемой задачи при известной стоимости каждого элемента структуры. В этом случае оказывается целесообразным использовать правило минимально взвешенного сравнения сложности структур, в котором весовым коэффициентом сложности i -го элемента структуры является его стоимость.

В результате сложность структуры S решения рассматриваемой задачи оценивается критерием качества $L = \sum_{i \in S_1} (\gamma_i)$, равным суммарной стоимости линий ИП со структурой S . Кроме критерия L при выборе предпочтительной перестраиваемой структуры часто учитывают минимально возможный остаток M_e ресурса в ИП как еще один критерий оптимизации [7].

В качестве формализованного правила выбора предпочтительных вариантов при наличии векторного критерия качества (L, M_e) будем использовать правило выбора Парето. В соответствии с ним структура a лучше, чем структура b , если a лучше b хотя бы по одному критерию и не хуже по другому, т.е., если $L(a) < L(b)$ и $M_e(a) < M_e(b)$ или $L(a) \leq L(b)$ и $M_e(a) < M_e(b)$. Структура a строго лучше структуры b по критериям M_e и L одновременно, если $L(a) < L(b)$ и $M_e(a) < M_e(b)$.

Синтез структур, оптимальных по критериям L, M_e , предлагается осуществлять, используя следующий алгоритм [8]:

- ◆ Последовательно увеличиваем на единицу число секций n , начиная с $n=1$ до n^* .
- ◆ Для каждого значения n генерируем множество Ω^n структур ИП с n секциями, предполагающих подключение каждой магистрали (секции), по крайней мере, к одной из секций (магистралей).
- ◆ Из множества Ω^n выделяем его подмножество Ω_0^n допустимых структур.
- ◆ Определяем минимально возможный остаток ресурса и стоимость линий в ИП для каждой структуры из Ω_0^n .

- ♦ В множество Ω° включаем такие и только такие структуры S^0 из Ω_∂^n , для которых среди найденных допустимых структур, соответствующих текущему и предшествующим значениям n , не находится такой структуры, которая строго лучше структуры S^0 по критериям M_e, L одновременно. Из Ω° исключаем все ранее включенные в нее структуры S^* , для которых в Ω_∂^n удастся обнаружить структуру, которая строго лучше, чем S^* , по критериям M_e, L одновременно.

В результате выполнения представленных действий формируется множество Ω° искомых структур Парето – оптимальных по показателям M_e, L .

На основе предложенных концептуальной и функциональной моделей обработки информации при синтезе СФ-блоков разработано программное обеспечение для пакета MatLab, позволяющее синтезировать избыточные структуры систем электропитания автономного объекта с динамическим распределением ограниченного энергоресурса оптимальных по критериям стоимости соединительной магистрали и минимального остатка энергоресурса.

```
function result = struct_sintez(max_sections,magistrales)
omega_o = {};
index = 1;
for n = 1:max_sections
    % Сгенерировать множество структур omega с n секциями и m
    % магистральями
    for counter = 0:(2^(magistrales*n))
        binary = dec2bin(counter);
        while length(binary) < magistrales*n
            binary = ['0' binary];
        end
        matrix = zeros(magistrales,n);
        for i=1:magistrales
            for j=1:n
                matrix(i,j) = (binary(n*(i-1)+j) == '1');
            end
        end
        omega_o{index} = matrix;
        index = index + 1;
    end
end
% Выделяем подмножество допустимых структур
omega_true = {};
index = 1;
for i = 1:length(omega_o)
    matrix = omega_o{i};
    flag = 1;
    [height width] = size(matrix);
    % Магистраль может быть подключена только к одному источнику
    for j = 1:height
        if(length(find(matrix(j,:) == 1)) ~= 1)
            flag = 0;
            break;
        end
    end
end
end
```

В качестве формализованного правила выбора предпочтительных вариантов, при наличии векторного критерия качества, в программе используется правило Парето.

Современные аналоговые СФ-блоки РЭА характеризуются многообразием функциональных возможностей, режимов работы и алгоритмов функционирования [9]. Проектирование функциональной схемы конечного устройства (системы на кристалле), реализующей все требуемые параметры, характеристики и алгоритмы функционирования без использования системного подхода затруднительно ввиду многообразия факторов, влияющих на финальный состав функциональной и принципиальной схем СФ-блока.

Решение данной задачи синтеза возможно реализовать при помощи подхода, основанного на последовательном использовании операций редуцирования и агрегирования (рис. 3). Снижение сложности решения исходной задачи предлагается осуществить за счет редукиции, при этом начальная задача разбивается на подзадачи, в соответствии которым устанавливаются методы их решения. Данный подход предлагается использовать как на этапе синтеза функциональной схемы, так и на этапе синтеза принципиальной схемы СФ блока (системы на кристалле).

На этапе редукиции генерируются решения функциональных подсхем, соответствующих различным режимам и, в свою очередь, различным алгоритмам функционирования. В дальнейшем полученные решения интегрируются в виде единого, функционально-полного решения. Таким образом, синтезируется функциональная схема СФ-блока, избыточность которой минимизирована за счет интеграции отдельных элементов функциональных подсхем.

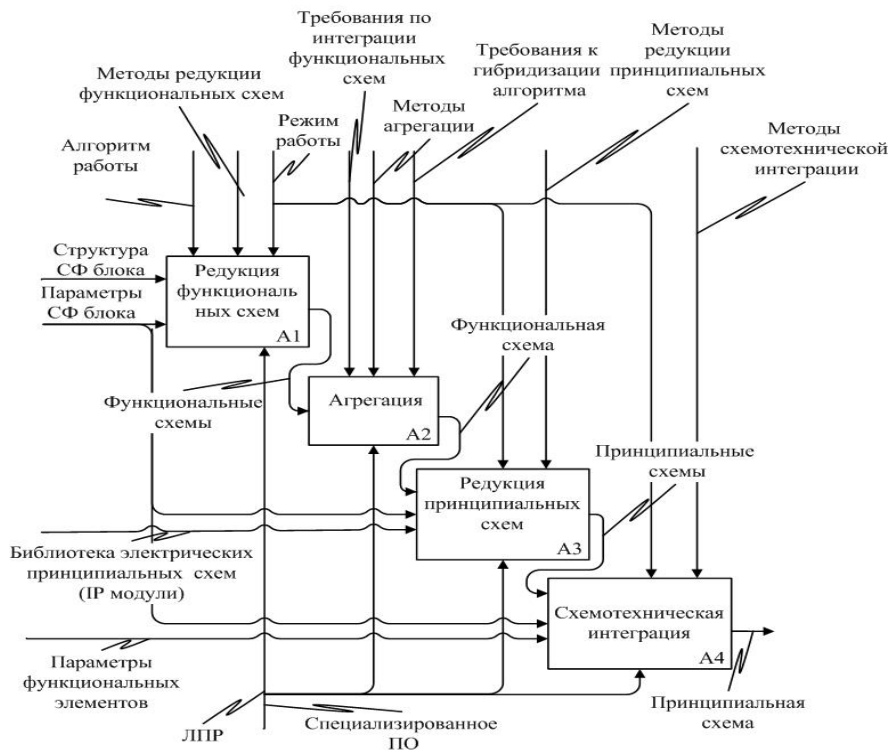


Рис. 3. Функциональная модель подхода синтеза избыточных функциональных и электрических принципиальных схем СФ-блоков РЭА

На этапе синтеза принципиальной схемы СФ-блока в соответствие каждому элементу синтезированной избыточной функциональной схемы предлагается вариант ее схемотехнической реализации, как правило, в виде IP-модуля. На этапе агрегации, за счет использования принципа схемотехнической интеграции, отдельные схемные блоки объединяются в виде единого схемотехнического решения, выполняющего задачи нескольких функциональных элементов. Данный подход позволяет получить схемотехнические решения, имеющие меньшее количество элементов и, как правило, обладающие параметрами, превосходящими простую совокупность элементов неинтегрированных принципиальных схем.

В качестве примера рассмотрим варианты схемотехнической реализации формирователя сигнала обратной связи (ФСОС), используемого в интегральной микросхеме управления (ИМУ) импульсным источником вторичного электропитания [9]. Проходная характеристика синтезируемого устройства представлена на рис. 4. Вид данной зависимости обусловлен возможностью функционирования ИМУ в трех основных алгоритмах (режим запуска – участок $0-U_z$; режим стабилизации выходного напряжения – участок U_z-U_3 ; режим защиты от перегрузок – участок U_3-U_k). При переходе из режима стабилизации в режим защиты происходит изменение знака обратной связи. Условием перехода является превышение напряжения U_p величины U_3 , при этом зависимость $U_{oc}(U_p)$ становится обратнопропорциональной.

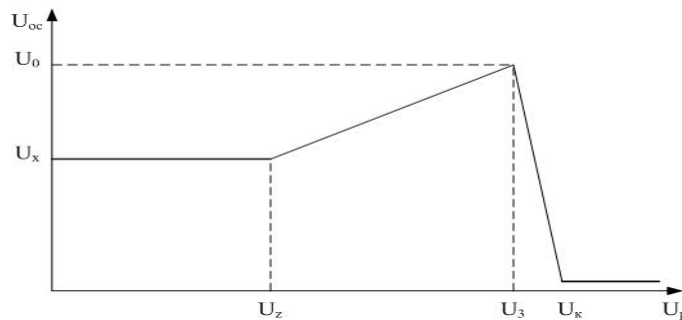


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения ФСОС от входного

На рис. 5 элемент ФСОС реализован на основе неинвертирующего усилителя (VT1-VT11, R1, R2, R5, I1), инвертирующего решающего усилителя (VT12-VT20, I2-I4, R3, R4) и ограничителя (VT21-VT23, I5).

Данный ФСОС реализует зависимость $U_{oc}=f(U_p)$ (рис. 4). На участке от нуля до величины U_z инвертирующий и неинвертирующий усилители находятся в режиме ограничения. На участке U_z-U_3 инвертирующий усилитель находится в линейном режиме, а неинвертирующий – в режиме ограничения. На участке U_3-U_k оба усилителя работают в линейном режиме. При напряжении U_p , превышающем значение U_k , инвертирующий, а затем и неинвертирующий усилители перейдут в режим ограничения.

Коэффициенты усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей определяются следующими соотношениями:

$$K_{yn} = \frac{R_4}{R_3}, \quad K_{yn} = \frac{R_5}{R_3} - K, \quad K = \frac{I_{k1}N}{I_{k1} + I_{k2}}, \quad N = \frac{S_{11}}{S_4} = \frac{S_9S_7}{S_8S_5}, \quad (1)$$

где $R_3 = R_1 = R_2$; S_i – площадь эмиттерного перехода i -го транзистора. Значения напряжений U_x и U_z можно найти из выражений:

$$U_x = U_0 - I_1 K N R_6, U_z = U_3 - I_1 R_9. \quad (2)$$

Элемент ФСОС, реализованный на основе принципа схемотехнической интеграции, представлен на рис. 6. В данной схеме инвертирующий, неинвертирующий усилители и ограничитель выполнены в виде единого неразделимого схемного блока, реализующего зависимость $U_{oc} = f(U_p)$ (рис. 4).

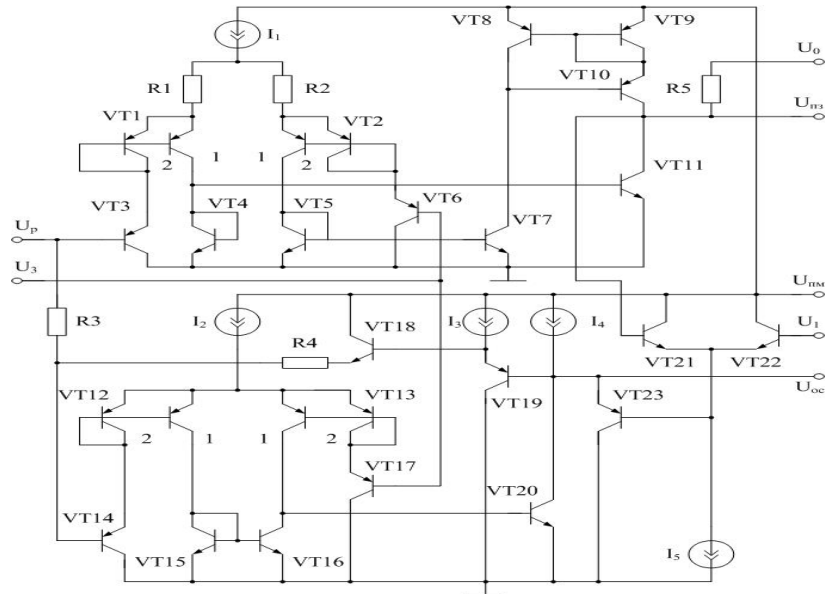


Рис. 5. Принципиальная схема ФСОС

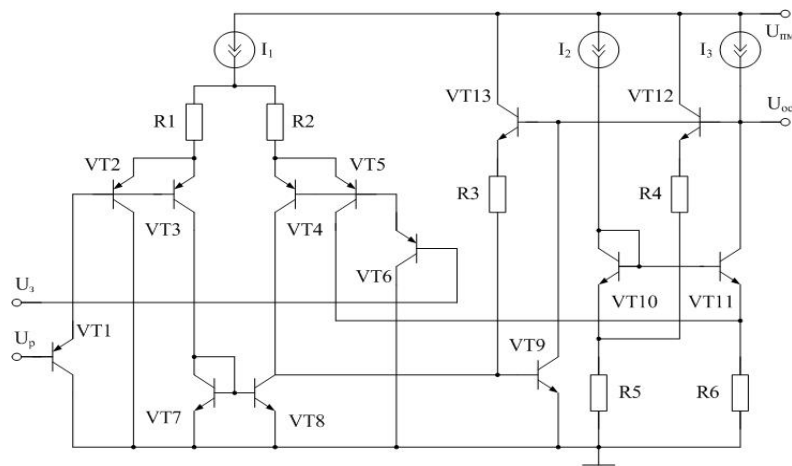


Рис. 6. Схемотехнически интегрированный ФСОС

Коэффициенты передачи для участков U_2-U_3 и U_3-U_k при условии $I_2 = I_3$, $R_5 = R_6$, $R_1 = R_2$ определяются соотношениями

$$K_z = \frac{R_6}{2R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right) \frac{S_5}{S_4}, K_x = \frac{R_3}{R_1}. \quad (3)$$

Значения напряжений U_z , U_x и U_0 определяются соотношениями

$$U_z = U_{on} - I_1 R_1, \quad U_x = I_2 R_5 \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right), \quad U_0 = \left(\frac{I_1 R_6 S_5}{2S_4} + I_2 R_5 \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right). \quad (4)$$

Из рассмотрения схмотехнических решений элемента ФСОС (рис. 5, 6) следует, что применение принципа схмотехнической интеграции позволило более чем в 2 раза сократить количество активных элементов, а также снизить суммарный потребляемый ток примерно в 3 раза.

Таким образом, предлагаемые подходы синтеза избыточных структурных, функциональных и принципиальных схем на основе разработанных концептуальных и функциональных моделей позволяют проектировать решения, использующие меньшее число активных и пассивных элементов интегральных схем, обладающие низким токопотреблением и повышенной функциональной надежностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Chang H. SoC Design Methodologies, Winning the SoC Revolution: Experiences in Real Designing.* – Boston: Kluwer Academic Publishers. – 2003. – P. 329.
2. *Немудров В.А., Мартин Г.* Системы на кристалле. Проектирование и развитие. – М.: Техносфера, 2004. – 216 с.
3. *Krolikoski S., Schirrmester F., Salefski B., Rowson J., Martin G.* Methodology and Technology for Virtual Component Driven Hardware/Software Co-Design on the System Level. – Orlando Florida: ISCAS, 1999. – P. 941.
4. *Манжула В.Г.* Моделирование системного уровня процесса обработки информации при синтезе аналоговых сложных функциональных блоков // Системы управления и информационные технологии. – 2010. – № 3 (41). – С. 36-40.
5. *Манжула В.Г., Федяшов Д.С.* Функциональная модель процесса обработки информации при синтезе избыточных структур // Современные наукоемкие технологии. – 2010. – № 8. – С. 91-92.
6. *Манжула В.Г.* Структурный синтез системы управления электропитанием автономного объекта с динамическим распределением ограниченного энергоресурса // Изв. вузов. Электромеханика. – 2010. – № 2. – С. 43-49.
7. *Манжула В.Г.* Синтез избыточных структур систем управления на основе минимально факторного анализа. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ, 2010. – 104 с.
8. *Манжула В.Г.* Алгоритм решения задачи синтеза избыточных структур систем управления с избирательными ограничениями // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2010. – № 5. – С. 175-177.
9. *Манжула В.Г.* Методы структурно-параметрического синтеза энергетически напряженных сложных функциональных блоков, систем на кристалле. – М.: Академия естествознания, 2008. – 140 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Крутчинский.

Манжула Владимир Гаврилович

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса.

E-mail: manjula@sssu.ru.

346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147.

Тел.: 8636224595.

Начальник Информационно-технического центра ЮРГУЭС; доцент.

Manzhula Vladimir Gavriilovich

The South Russian State University of Economy and Service.

E-mail: manjula@sssu.ru.

147, Shevchenko's Street, Shakhty, 346500, Russia.

Phone: 8636224595.

The Chief of Information Centre-Technical; Associate Professor.