

# АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Л.В. Савкин

## РЕГЕНЕРАТИВНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И КОМПЛЕКСАХ

*Вводится понятие регенеративной электронной системы, способной осуществлять восстановление дискретных элементов системы на низком аппаратном уровне. Предложен подход по повышению надежности электронной аппаратуры космических систем и комплексов с помощью регенеративных электронных систем. Проведен анализ их принципов функционирования.*

*Рассмотрены два способа практической реализации данных систем. Первый способ заключается в использовании многоуровневой реконфигурации электронной аппаратуры на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Второй способ заключается в использовании однородных вычислительных структур.*

*Показано, что каждый из данных методов требует унифицированного подхода по построению электронной аппаратуры космических систем и комплексов.*

***Регенеративная система, резервирование, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), многоуровневая реконфигурация, однородная вычислительная структура.***

### **Введение**

Природа показывает нам невероятные по своему разнообразию и масштабам примеры уникальных свойств живых организмов приспосабливаться к окружающей среде и длительное время существовать в ней и развиваться, адаптируясь к изменениям внешних условий. Человек незамедлительно старается использовать понятые им принципы функционирования биологических систем в различных сферах своей деятельности. Изучая явления живой природы и применяя на практике эффективные механизмы эволюции биологических систем, зародились такие научные направления как бионика, биомиметика, нейробионика, биоробототехника, биокибернетика и многие другие.

Одним из самых уникальных свойств многих живых организмов является его способность к регенерации. Говоря о понятии регенерации, мы чаще всего соотносим его со способностью живых организмов восстанавливать со временем поврежденные ткани, а иногда и целые органы. Если рассматривать живой организм как сложную биологическую систему то, вне зависимости от ее уровня сложности, будь то насекомое, животное или человек, регенерация будет представлять собой свойство всей системы заново восстанавливать (регенерировать) входящие в ее состав подсистемы более низкого уровня при утрате последних. Если речь идет об утерянных функциях системы (или входящих в ее состав подсистем), то под регенерацией понимают, прежде всего, восстановление данных функций.

Во многих отраслях современных наук появились направления, целями которых являются исследование механизмов регенерации, наблюдаемых в биологических системах, и попытка их имитации в той компетентной мере, которая присуща соответствующей научной отрасли.

Научный интерес, направленный на исследование механизмов регенерации, обусловлен, прежде всего, необходимостью получения знаний о процессах восстановления биологических систем, которые могут быть использованы при построении искусственных систем, характеризующихся повышенной отказоустойчивостью и надежностью в целом. К одним из таких систем относится электронная аппаратура, используемая в космических системах и комплексах.

Идеальным вариантом имитации механизма регенерации, применительно к электронной аппаратуре, было бы, в буквальном смысле, наращивание новых электронных компонентов на том месте (кристалл СБИС, печатная плата, аппаратный модуль и т.п.), где было произведено физическое удаление электронных компонентов, или восстановление физической структуры вышедшего из строя компонента в том месте (участке), где она была нарушена (например, в случае перегрева). Подобного рода исследования (преимущественно к авиаконструкционным материалам) ведутся в области микросистемной техники, нанотехнологий и «интеллектуальных» материалов [1–3].

Мы же ограничимся исследованием возможности применения механизмов регенерации к электронным системам, на основе введения избыточности в аппаратную структуру базовых элементов электронной аппаратуры космического назначения, что, в свою очередь, предлагается достигнуть, используя многоуровневую аппаратную реконфигурацию, реализуемую на базе современных ПЛИС, и однородные вычислительные структуры (ОВС).

*Цель работы:* построение и исследование регенеративных электронных систем, как средств повышения отказоустойчивости и надежности электронной аппаратуры космических систем и комплексов.

### **1. Постановка и анализ задачи**

Резервирование аппаратуры большинства электронных систем космического назначения основано, как правило, на введении избыточности в их аппаратное обеспечение, которое осуществляется на высоком аппаратном уровне, и под которым подразумевается использование в качестве резервных подсистем функционально законченных устройств, модулей и блоков.

Резервирование базовых аппаратных элементов низкого уровня (транзисторы, логические элементы, триггеры и т.д.) крайне неэффективно ввиду высокой степени интеграции современной электронной компонентной базы и невозможности распространения на них стандартных методов поэлементного контроля и резервирования. В то же время, современные программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), выполненные по технологии FPGA, позволяют создавать реконфигурируемую электронную аппаратуру, с возможностью управления конфигурацией базовых элементов низкого аппаратного уровня (логические вентили, триггеры, коммутаторы).

Возможность резервирования элементов низкого аппаратного уровня, ввиду высокой степени сложности аппаратного построения современного бортового электронного оборудования, позволяет количественно переосмыслить понятие аппаратного резервирования и перейти к качественно новому понятию — аппаратной регенерации.

**Определение 1.** Под *регенерацией* в дальнейшем будем понимать способность аппаратной части электронных систем восстанавливать вышедшие из строя элементы низкого аппаратного уровня.

**Определение 2.** Под *регенеративной электронной системой* будем понимать такую электронную систему, аппаратная часть которой может восста-

навливать свои элементы за счет регенерации, при этом управление процессом регенерации возможно осуществлять как аппаратно, так и программно.

Для корректной оценки возможности построения регенеративной электронной системы рассмотрим формальную модель операции регенерации, представленную на рис. 1.

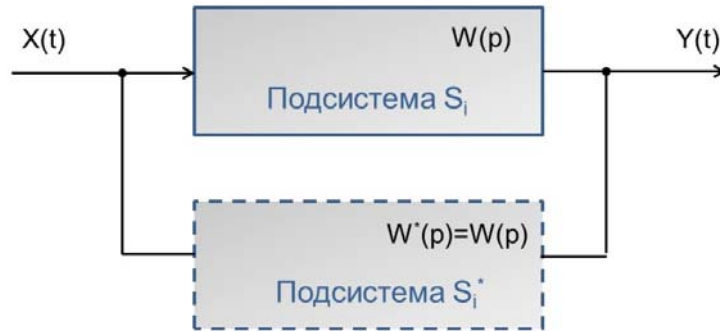


Рис. 1. К пояснению принципа регенерации системы

Пусть дана некоторая подсистема  $S_i$ , где  $i$  — порядковый номер подсистемы, входящей в состав системы  $S$ . Подсистема  $S_i$  описывается передаточной функцией  $W(p)$ , вычисляемой по формуле

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)},$$

где  $X(p)$  и  $Y(p)$  — преобразования Лапласа для входного  $x(t)$  и выходного  $y(t)$  сигналов соответственно.

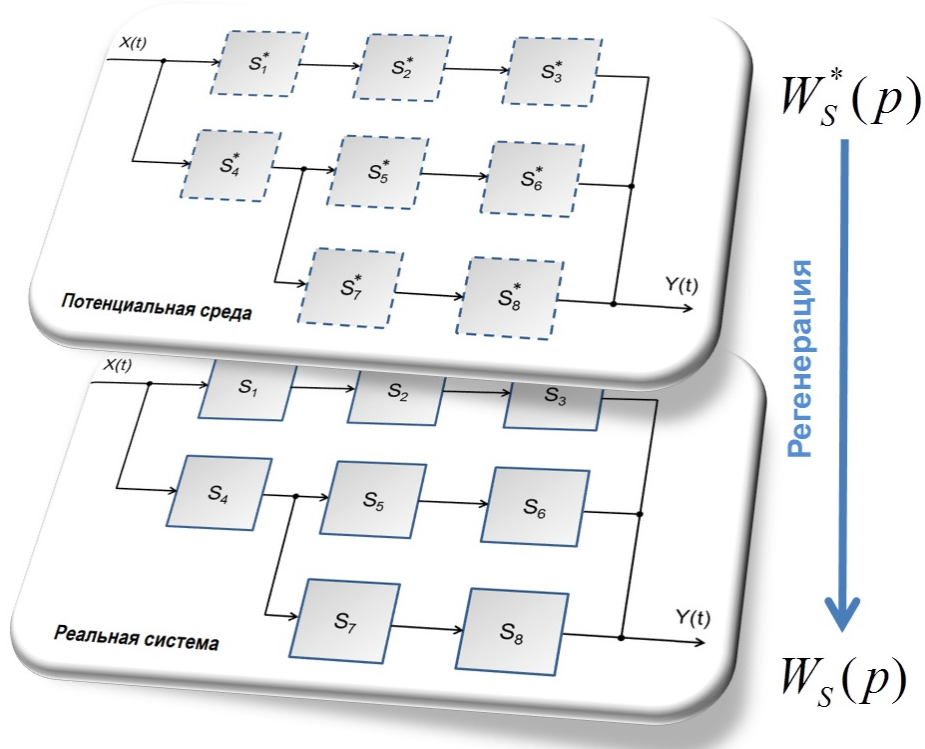
Здесь и далее будем рассматривать операцию регенерации на примере линейных стационарных систем, при этом необходимо учитывать, что все дальнейшие рассуждения будут равносильны и по отношению к дискретным и дискретно-непрерывным системам.

На уровне подсистемы  $S_i$  операция регенерации будет представлять собой восстановление (замену) утраченной передаточной функции  $W(p)$  с помощью потенциально существующей передаточной функции  $W^*(p) = W(p)$ . При этом под понятием «потенциального» существования подразумевается то, что в системе  $S$  заложена возможность формирования или «включения» подсистем, описываемых требуемой передаточной функцией.

Переключение вышедшей из строя электронной аппаратуры на резервную является примером операции регенерации на высоком аппаратном уровне системы. Однако, данный пример является «грубым», поскольку при резервировании система не восстанавливает элементы низкого аппаратного уровня, а, как правило, производит «отбрасывание» одной сложной подсистемы высокого аппаратного уровня и «включение» другой (резервной подсистемы).

Процесс регенерации на уровне системы  $S$ , включающей в себя набор подсистем  $S_i = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, i = \overline{1, n}$ , будет заключаться в восстановлении утра-

ченной системной передаточной функции  $W_s(p) = f(W_1(p), W_2(p), \dots, W_n(p))$  с помощью потенциально существующей системной передаточной функции  $W_s^*(p) = f(W_1^*(p), W_2^*(p), \dots, W_n^*(p))$  (рис. 2).



**Рис. 2.** К принципу регенерации системы за счет внешней потенциальной среды

Из данного рисунка видно, что для осуществления регенерации электронной системы, обозначенной как «Реальная система», необходимо существование некоторой «Потенциальной среды», за счет которой будет производиться восстановление элементов реальной (функционирующей в данный момент времени) системы. Данная среда представляет собой совокупность аппаратно-программных средств, предназначенных для контроля функционирования аппаратной части электронной системы, включая отдельные элементы подсистем  $S_i$  на всех аппаратных уровнях, а также для замещения вышедшего из строя элемента исправным резервным элементом низкого аппаратного уровня. В основной части работы предлагается два способа построения данного типа систем.

Математически это можно описать, следующим образом.

Пусть в период времени  $(t_0, t_1)$ , нормальное функционирование системы  $S$  описывается системной передаточной функцией  $W_s(p) = \alpha$ , при этом потенциальная среда не замещает никаких элементов, т.е.  $W_s^*(p) = 0$ . Тогда состояние регенеративной системы можно представить в виде:

$$(t_0, t_1) \left\{ \begin{array}{l} W_S(p) = \alpha, \\ W_S^*(p) = 0. \end{array} \right\}$$

В момент времени  $t_1$  один из элементов системы выходит из строя, тогда  $W_S(p) = \beta$ , причем  $\alpha \neq \beta$ . После фиксации неисправности элемента в нижнем аппаратном уровне системы, потенциальная среда формирует вышедший из строя элемент, описываемый такой передаточной функцией, чтобы  $W_S^*(p)$  было равным передаточной функции системы в исправном состоянии, т. е.

$$W_S^*(p) = W_S(p) = \alpha. \quad (1)$$

Состояние регенеративной системы в период времени  $[t_1, t_2]$ , когда в потенциальной среде сформировался элемент, передаточная функция которого удовлетворяет выполнению условия (1), можно записать как

$$[t_1, t_2] \left\{ \begin{array}{l} W_S(p) = \beta, \\ W_S^*(p) = \alpha. \end{array} \right\}$$

Далее в период времени  $(t_2, t_3]$  производится регенерация системы  $S$ , при которой неисправный элемент системы  $S$  замещается исправным, сформированным в потенциальной среде регенеративной электронной системы. Процесс регенерации системы условно можно представить в виде выражения

$$(t_2, t_3] \left\{ W_S^*(p) \xrightarrow{reg} W_S(p) = \alpha \xrightarrow{reg} \beta \right\},$$

где стрелкой изображен направленный процесс восстановления передаточной функции  $\alpha$ , за счет замещения неисправного элемента системы  $S$ , описываемого передаточной функцией  $\beta$ , исправным элементом потенциальной среды, описываемым передаточной функцией  $\alpha$ .

Здесь следует отметить, что потенциальная среда будет эффективной в том случае, если она будет способна замещать максимальное количество вышедших из строя элементов низкого аппаратного уровня системы  $S$ . Именно поэтому на рис. 2 изображена потенциальная среда, полностью дублирующая реальную систему.

Опираясь на примеры регенерации у растений и животных [4] и учитывая различные виды неисправностей сложных бортовых электронных систем [5–7], мы можем предположить, что в случае сложных электронных систем может возникнуть такая ситуация, когда не все элементы системы при определенных видах неисправностей смогут регенерировать (восстановиться) полностью. При этом система будет способна, пусть и с определенными ограничениями, выполнять свои функции. Передаточную функцию системы  $S$  в этом случае можно представить в виде следующего выражения:

$$W_S^{reg}(p) = W_S(p) + E(p), \quad (2)$$

где  $W_S^{reg}(p)$  — передаточная функция системы  $S$  после операции регенерации;  $W_S(p)$  — передаточная функция системы  $S$ , соответствующая ее нор-

мальному функционированию (или полному восстановлению);  $E(p)$  — передаточная функция по возмущению.

Выражение (2) основано на предположении о том, что любое неисправное состояние линейной системы  $S$ , описываемое передаточной функцией  $W_s(p) = f(W_1(p), W_2(p), \dots, W_n(p))$ , где  $W_i(p), i = \overline{1, n}$  — передаточные функции линейных подсистем  $S_i, i = \overline{1, n}$ , образующих систему  $S$ , можно представить в виде суммы передаточной функции, соответствующей исправному состоянию системы  $S$ , и некоторой передаточной функции по возмущению  $E(p)$ , которое совместно с нормальной передаточной функцией образует значение передаточной функции  $W_s(p)$ .

Таким образом, регенерация электронной системы будет максимально эффективной в случае  $E(p) = 0$ , когда выражение (2) будет иметь значение

$$W_s^{reg}(p) = W_s(p).$$

Так же мы можем предположить, что для различных систем  $S$  всегда существует некоторое критическое значение внешнего возмущения  $E_{кр.}(p)$ , не смотря на наличие которого после операции регенерации, система будет способна выполнять возложенные на нее функции. Поэтому значение  $E(p)$  совместно с временем регенерации  $t_{reg.}$ , которое не должно превышать максимального времени регенерации  $t_{reg.}^{max}$ , определяют пострегенеративное состояние  $R^S$  системы  $S$ , т. е.

$$R^S = f(E(p), t_{reg.}).$$

При этом, функция пострегенеративного состояния  $R^S$  системы может принимать значение только «0» или «1», исходя из следующей таблицы:

Таблица 1

**Пострегенеративное состояние системы**

Условие	Значение $R^S$
$E(p) < E_{кр.}(p), t_{reg.} < t_{reg.}^{max}$	1
$E(p) \geq E_{кр.}(p), t_{reg.} < t_{reg.}^{max}$	0
$E(p) < E_{кр.}(p), t_{reg.} \geq t_{reg.}^{max}$	0
$E(p) \geq E_{кр.}(p), t_{reg.} \geq t_{reg.}^{max}$	0

Функция пострегенеративного состояния  $R^S$  системы  $S$  представляет собой дихотомический признак качества операции регенерации, произведенной над системой  $S$ , и дает возможность оценки удовлетворительного функционирования восстановленной системы, что можно представить как

$$R^S = \begin{cases} 1, & \text{если система } S \text{ удовлетворительно функционирует после регенерации,} \\ 0, & \text{если система } S \text{ неудовлетворительно функционирует после регенерации.} \end{cases}$$

Множество всех состояний  $S$  системы  $S$  можно разделить на два подмножества:

—  $S_l^1 \subset S, l = \overline{1, L}$  — подмножество состояний, в которых система функционирует удовлетворительно, т. е. система работоспособна ( $R^S = 1$ );

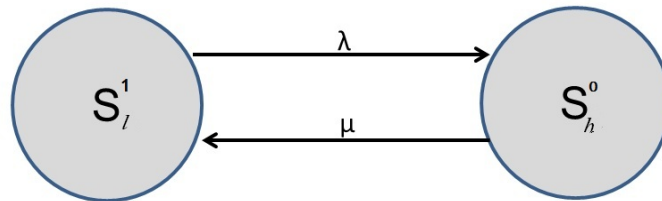
—  $S_h^0 \subset S, h = \overline{1, H}$  — подмножество состояний, в которых система неработоспособна ( $R^S = 0$ ).

Очевидно, что  $S = S_l^1 \vee S_h^0, L + H = N$  — количество состояний системы  $S$ . Для описания случайного процесса перехода состояний («отказ»/«регенерация») можно воспользоваться вероятностью нахождения системы в  $r$ -ом состоянии  $P_r(t), r = \overline{1, N}$ .

Поскольку система  $S$  в любой момент времени  $t$  может находиться только в одном состоянии, то для любого  $t$  будет справедливо условие

$$\sum_{r=1}^N P_r(t) = 1, t = \overline{0, \infty}. \quad (3)$$

Регенеративную систему  $S$  можно представить в виде графа (рис. 3), вершинами которого являются работоспособное состояние  $S_l^1$  и неработоспособное состояние  $S_h^0$ .



**Рис. 3.** Граф состояний регенеративной системы:

$S_l^1$  — работоспособное состояние;  $S_h^0$  — неработоспособное состояние

Дуги данного графа характеризуют направление переходов состояний системы  $S$  с интенсивностью отказов  $\lambda$  и интенсивностью регенерации (восстановления)  $\mu$ .

«По графу состояний составляется система однородных дифференциальных уравнений первого порядка (уравнений Колмогорова — Чепмена), имеющих вид:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{\mu} \lambda_{ki} \cdot P_k(t) - \sum_{j=1}^{\nu} \lambda_{ij} \cdot P_j(t), \quad (4)$$

где  $\lambda_{ki}$  — интенсивности перехода  $k$ -х состояний в  $i$ -е состояние;  $\lambda_{ij}$  — интенсивности, с которыми  $i$ -е состояние переходит в  $j$ -е состояние» [8].

Для простейшего случая, изображенного на рис. 3, уравнение (4) будет иметь вид системы:

$$\begin{cases} \frac{dP_{S_l^1}(t)}{dt} = -\lambda P_{S_l^1}(t) + \mu P_{S_h^0}(t), \\ \frac{dP_{S_h^0}(t)}{dt} = \lambda P_{S_l^1}(t) - \mu P_{S_h^0}(t), \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_{S_l^1}(t)$  и  $P_{S_h^0}(t)$  — вероятности нахождения системы  $S$  в работоспособном  $S_l^1$  и неработоспособном  $S_h^0$  состояниях, причем  $l = \overline{1, L}$  и  $h = \overline{1, H}$ .

Как видно из (3) и (5), общее состояние регенеративной системы  $S$  описывается аналогично любому процессу восстановления систем, использующих резервирование подсистем на высоких аппаратных уровнях.

Существенные различия между регенеративной системой и резервируемой будут наблюдаться лишь на самом низком аппаратном уровне.

Рассмотрим рис. 4, на котором схематично показана многоуровневая аппаратная организация некоторой электронной системы  $S$ .

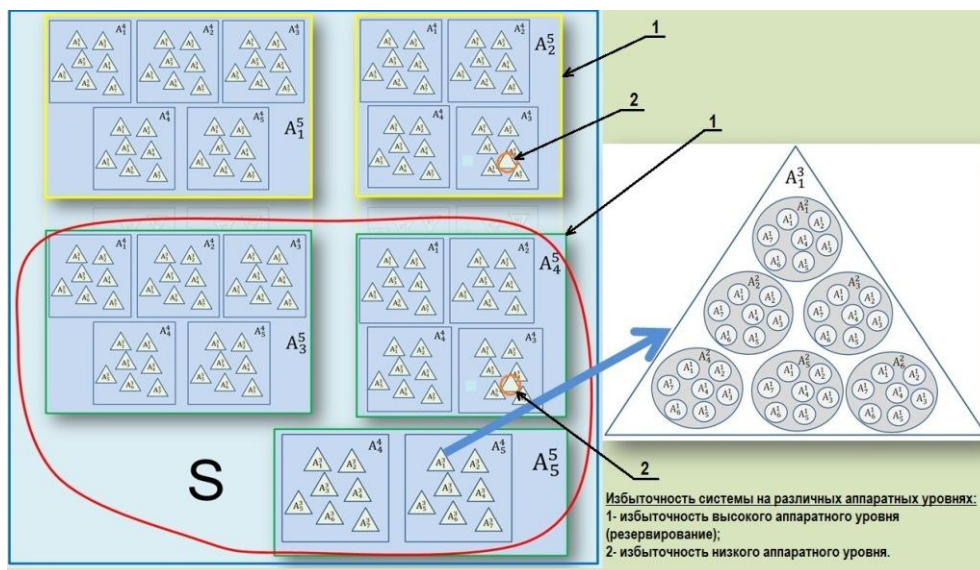


Рис. 4. Многоуровневая аппаратная организация

В состав данной системы входят пять подсистем  $A_1^5, A_2^5, A_3^5, A_4^5, A_5^5$ , каждая из которых представляет собой верхний аппаратный уровень системы  $S$ , причем верхний индекс при букве  $A$  соответствует номеру аппаратного уровня системы, а нижний — порядковому номеру элементов, образующих данный

аппаратный уровень. В качестве примера, можно представить себе электронный прибор, состоящий из пяти функционально законченных модулей, расположенных внутри корпуса данного прибора.

Каждая из подсистем  $A_1^5, A_2^5, A_3^5, A_4^5, A_5^5$  состоит, в свою очередь, из подсистем, соответствующих четвертому аппаратному уровню, подсистем  $A_1^4, A_2^4, \dots, A_n^4$ , причем каждый элемент пятого аппаратного уровня подсистемы, может использовать различное количество элементов четвертого уровня  $n$ . Для примера прибора, указанного выше, четвертый аппаратный уровень можно представить в виде ячеек, из которых состоят модули.

Понижение аппаратного уровня происходит вплоть до базовых элементов (транзисторы, логические элементы микросхем и т. п.) прибора, которые соответствуют первому аппаратному уровню.

Деление электронной системы на аппаратные уровни является формальной задачей, в которой нижний аппаратный уровень должен определяться контролепригодностью базовых элементов, т. к. для замещения неисправного элемента регенеративная система должна будет локализовать одиночную или групповую неисправность на самом нижнем аппаратном уровне. Здесь, безусловно, важную роль играет концепция архитектурного построения электронной аппаратуры, степень и методы ее унификации, а также номенклатура электронной компонентной базы (ЭКБ), от которых зависят как контролепригодность, так и возможность реализации регенеративных электронных систем рассматриваемого типа.

На рис. 4 помимо организации аппаратных уровней условно показаны два примера методов повышения надежности системы  $S$  посредством введения аппаратной избыточности. Красным цветом выделена область, состоящая из трех подсистем:  $A_3^5, A_4^5, A_5^5$ . Эти подсистемы способны выполнять все функции, возложенные на систему  $S$ . С целью повышения надежности системы  $S$ , вводятся две дополнительные резервные подсистемы: подсистема  $A_2^5$  предназначена для резервирования подсистемы  $A_4^5$  и подсистема  $A_1^5$ , которая резервирует подсистему  $A_3^5$ . Введение двух резервных подсистем в систему  $S$  представляет собой введение избыточности системы на высоком аппаратном уровне. Таким образом, в воображаемом приборе два модуля являются резервными (дублирующими).

Избыточность может быть и более низкого уровня. На рис. 4 показан пример того, как для подсистем  $A_2^5$  и  $A_4^5$  на четвертом аппаратном уровне вводятся избыточность третьего аппаратного уровня. На практике таким примером может служить введение, к примеру, дополнительной внешней памяти EEPROM к микроконтроллеру и использование ее в качестве резервной.

Для более качественного рассмотрения отличительных особенностей процессов регенерации аппаратуры и процесса восстановления работоспособности аппаратуры за счет переключения вышедших из строя аппаратных подсистем на резервные, представим себе следующий случай.

Пусть процессу нормального функционирования системы  $S$  соответствует системная передаточная функция  $W_S(p) = A$ . В момент времени  $t_1$  возникает

неисправность подсистемы  $A_4^5$ . Поскольку  $W_S(p) = f(W_{A_3^5}(p), W_{A_4^5}(p), W_{A_5^5}(p))$ , где  $W_{A_3^5}(p), W_{A_4^5}(p), W_{A_5^5}(p)$  — передаточные функции соответствующих подсистем  $A_3^5, A_4^5, A_5^5$ , то изменение значения передаточной функции (т.е.  $W_S(p) \neq A$ ), будет связано с изменением значения передаточной функции  $W_{A_4^5}(p)$  подсистемы  $A_4^5$ . Причиной неисправности в подсистеме  $A_4^5$  является, как правило, выход из строя элемента или группы элементов низкого аппаратного уровня, т. е.  $A_j^1$ , где  $j$  — порядковый номер элемента первого аппаратного уровня системы  $S$ . Тогда задача восстановления исправного состояния системы  $S$  заключается в восстановлении передаточной функции элемента первого аппаратного уровня.

На практике для восстановления функциональной работоспособности системы  $S$  используют, как правило, резервирование целой подсистемы. В нашем случае, для того чтобы восстановить систему  $S$  с вышедшей из строя подсистемой  $A_4^5$ , необходимо переключиться на резервную подсистему  $A_2^5$ .

Для того чтобы описать процесс восстановления передаточной функции системы  $S$  воспользуемся упрощенной моделью иерархического распределения аппаратных уровней, изображенной на рис. 5.

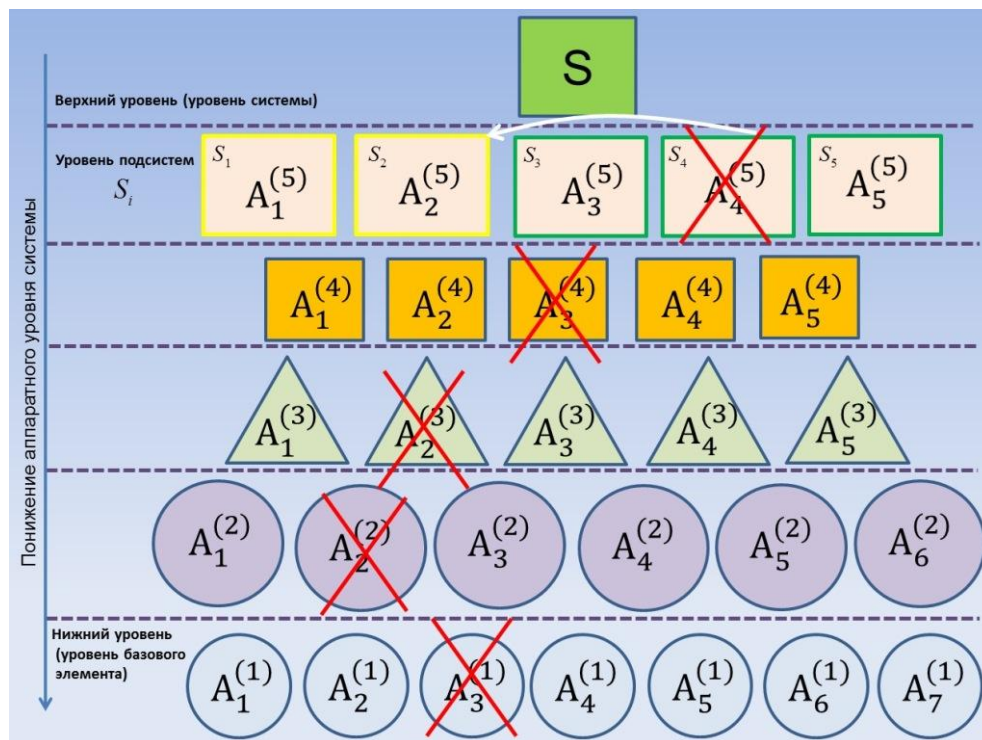


Рис. 5. Иерархия многоуровневой аппаратной организации

Здесь показано понижение аппаратного уровня системы, начиная от высшего аппаратного уровня системы и заканчивая нижним аппаратным уровнем базовых элементов. Для того чтобы отличать структурное построение аппаратуры, показанной на рис. 5, от более сложного примера, приведенного ранее на рис. 4, будем обозначать здесь верхние индексы при  $A$ , указывающие на аппаратный уровень, в круглых скобках.

Пусть, аналогично предыдущему примеру, причиной выхода из строя системы  $S$  является неисправность подсистемы  $A_4^{(5)}$  (или  $S_4$ ). В действительности это означает, что существует неисправность на всех аппаратных уровнях. Возьмем для нашего примера следующие неисправные элементы для каждого из уровней: 3-й элемент 4-го аппаратного уровня —  $A_3^{(4)}$ , 2-й элемент 3-го аппаратного уровня —  $A_2^{(3)}$ , 2-й элемент 2-го аппаратного уровня —  $A_2^{(2)}$ , 3-й элемент 1-го аппаратного уровня —  $A_3^{(1)}$ .

Если верхний индекс передаточных функций составных элементов всех аппаратных уровней системы  $S$  обозначать «1» или «0», где «1» — то исправное состояние элемента, а «0» — неисправное состояние элемента, тогда системную передаточную функцию неисправной системы можно записать:

$$\begin{aligned} W_S^0(p) &= f(W_{A_3^{(5)}}^1(p), W_{A_4^{(5)}}^0(p), W_{A_5^{(5)}}^1(p)), \\ W_{A_4^{(5)}}^0(p) &= f(W_{A_1^{(4)}}^1(p), W_{A_2^{(4)}}^1(p), W_{A_3^{(4)}}^0(p), W_{A_4^{(4)}}^1(p), W_{A_5^{(4)}}^1(p)), \\ W_{A_3^{(4)}}^0(p) &= f(W_{A_1^{(3)}}^1(p), W_{A_2^{(3)}}^0(p), W_{A_3^{(3)}}^1(p), W_{A_4^{(3)}}^1(p), W_{A_5^{(3)}}^1(p)), \\ W_{A_2^{(3)}}^0(p) &= f(W_{A_1^{(2)}}^1(p), W_{A_2^{(2)}}^0(p), W_{A_3^{(2)}}^1(p), W_{A_4^{(2)}}^1(p), W_{A_5^{(2)}}^1(p), W_{A_6^{(2)}}^1(p)), \\ W_{A_2^{(2)}}^0(p) &= f(W_{A_1^{(1)}}^1(p), W_{A_2^{(1)}}^1(p), W_{A_3^{(1)}}^0(p), W_{A_4^{(1)}}^1(p), W_{A_5^{(1)}}^1(p), W_{A_6^{(1)}}^1(p), W_{A_7^{(1)}}^1(p)). \end{aligned}$$

Рассмотрим два способа восстановления системы  $S$ , которое условно обозначим в виде преобразования

$$W_S^0(p) \longrightarrow W_S^1(p),$$

где  $W_S^0(p)$  и  $W_S^1(p)$  — системные передаточные функции соответствующие неисправному и исправному состоянию системы  $S$ .

Первый способ заключается в восстановлении системы  $S$  с помощью переключения неисправной подсистемы  $A_4^{(5)}$  на резервную подсистему  $A_2^{(5)}$ .

В данном случае можно записать

$$W_S^0(p) \longrightarrow W_S^1(p) = W_{A_4^{(5)}}^0(p) \longrightarrow W_{A_2^{(5)}}^1(p),$$

где  $W_{A_4^{(5)}}^0(p)$  — передаточная функция неисправной подсистемы  $A_4^{(5)}$ ;

$W_{A_2^{(5)}}^1(p)$  — передаточная функция исправной подсистемы  $A_2^{(5)}$ .

Введем временные интервалы. Обозначим время, когда система  $S$  была исправной за  $[t_0, t_1)$ , и время существования системы  $S$  после восстановле-

ния за  $(t_1, t_2]$ , где  $t_1$  — момент восстановления системы, учитывающий время нахождения неисправности и коммутацию на резервную подсистему,  $t_2$  — время появления второй неисправности.

Тогда, учитывая, что в исправном состоянии, резервная подсистема  $A_2^{(5)}$  не входит в состав функционирующей аппаратуры, получим

$$[t_0, t_1) \{A_4^{(5)} \in S, A_3^{(4)} \in S, A_2^{(3)} \in S, A_2^{(2)} \in S, A_3^{(1)} \in S, A_2^{(5)} \notin S\}. \quad (6)$$

После введения резервной аппаратуры, все нижние аппаратные уровни подсистемы  $A_4^{(5)}$  заменяются нижними аппаратными уровнями резервной подсистемы  $A_2^{(5)}$ , поэтому

$$(t_1, t_2] \{A_4^{(5)} \notin S, A_3^{(4)} \notin S, A_2^{(3)} \notin S, A_2^{(2)} \notin S, A_3^{(1)} \notin S, A_2^{(5)} \in S\}. \quad (7)$$

Второй способ заключается в регенерации неисправного элемента первого аппаратного уровня  $A_3^{(1)}$ , что можно представить в виде

$$W_S^0(p) \longrightarrow W_S^1(p) = W_{A_3^{(1)}}^0(p) \longrightarrow W_{A_3^{*(1)}}^1(p),$$

где  $W_{A_3^{*(1)}}^1(p)$  — передаточная функция исправного элемента первого аппаратного уровня, получаемая за счет замещения неисправного элемента  $A_3^{(1)}$  исправным элементом регенеративной среды  $A_3^{*(1)}$ .

Учитывая, что в процессе регенерации замещается только элемент первого аппаратного уровня, получим

$$[t_0, t_1) \{A_4^{(5)} \in S, A_3^{(4)} \in S, A_2^{(3)} \in S, A_2^{(2)} \in S, A_3^{(1)} \in S, A_3^{*(1)} \notin S\} \quad (8)$$

и

$$(t_1, t_2] \{A_4^{(5)} \in S, A_3^{(4)} \in S, A_2^{(3)} \in S, A_2^{(2)} \in S, A_3^{(1)} \notin S, A_3^{*(1)} \in S\}. \quad (9)$$

Таким образом, полученные выражения (6–9) показывают, каким образом на аппаратных уровнях системы  $S$ , качественно отличаются методы восстановления ее работоспособности за счет резервирования аппаратных подсистем и регенерации базовых элементов первого аппаратного уровня.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что основной отличительной чертой предлагаемых для использования в космических системах и комплексах регенеративных электронных систем от систем, использующих резервирование высокого аппаратного уровня, является возможность резервирования элементов на самом низком аппаратном уровне системы.

*Сформулируем задачу.* Исходя из рассмотренного принципа функционирования предлагаемой регенеративной системы, необходимо рассмотреть возможность ее реализации на современной ЭКБ.

При решении данной задачи следует учитывать, что основной областью применения данной регенеративной электронной системы являются космические системы и комплексы. Ввиду этого, при дальнейшем рассмотрении методов реализации регенеративной системы, подразумевается, что ЭКБ, на кото-

рой предполагается реализовать данный тип электронных систем, удовлетворяет всем требованиям по стойкости к внешним воздействующим факторам (ВВФ), которые необходимо учитывать при эксплуатации данных систем в технике космического применения: радиационная стойкость, вибростойкость, температурные условия и т.д.

## **2. Решение задачи**

Физически мы, как правило, не можем «удалить» неисправный элемент низкого аппаратного уровня и поместить на его место другой. ПЛИС FPGA предоставляют нам два пути решения данной задачи. Первый — использование глобальной реконфигурации, с учетом локализации неисправного элемента или участка элементов. Второй — это включение элементов нижнего уровня из резервной группы элементов за счет коммутации связей между базовыми элементами. Использование второго метода является основной идеей в реализации регенеративной электронной системы при использовании ПЛИС FPGA.

Еще один возможный вариант по практической реализации регенеративной электронной системы заключается в использовании ОВС.

Таким образом, при решении поставленной задачи будет рассмотрено два метода реализации регенеративных электронных систем:

- 1) с помощью ПЛИС FPGA;
- 2) с помощью ОВС.

Исходя из описанных в постановке и анализе задачи свойств регенеративной электронной системы, перечислим основные требования, которые должны быть к ней предъявлены:

- а) открытость аппаратной архитектуры низкого уровня;
- б) высокая контролепригодность элементов низкого аппаратного уровня;
- в) единый унифицированный подход к аппаратному построению электронной системы.

Первое требование обусловлено необходимостью обеспечения регенеративной системы возможностью реконфигурации на уровне базовых элементов.

Второе требование непосредственно связано с самим определением электронной регенеративной системы, для которой прежде чем восстановить неисправный элемент низкого аппаратного уровня, необходимо установить сам факт неисправности и локализовать ее место.

Третье требование определяет принцип восстановления неисправных элементов, который напрямую связан с архитектурными особенностями аппаратной части электронной системы. Данное требование должно учитывать соответствие роста сложности аппаратного построения системы с увеличением объема ее функциональных задач, усложнением алгоритмов обработки и повышением вычислительной трудоемкости в целом. Именно поэтому, в качестве ключевого принципа аппаратной архитектуры регенеративных электронных систем предлагается использовать единообразный унифицированный подход при построении электронной аппаратуры космического назначения.

### **2.1. Многоуровневая аппаратная реконфигурация на базе современных ПЛИС FPGA и ее использование в регенеративных электронных системах**

Из широкой номенклатуры современной ЭКБ наиболее подходящими для реализации регенеративных электронных систем предложенного типа являются ПЛИС FPGA. Помимо возможности реконфигурации базовых элементов

низкого аппаратного уровня, которыми, как правило, являются логические элементы (вентили), данный тип ПЛИС позволяет реализовать электронные системы с многоуровневой реконфигурацией, посредством которых предполагается достигнуть минимального времени регенерации близкорасположенных неисправных (отказавших) элементов нижнего аппаратного уровня.

Рассмотрим рис. 6, на котором представлен первый уровень аппаратной конфигурации в виде матричной структуры с элементами  $S_n^m$ , где  $m$  — номер элемента в строке, а  $n$  — номер элемента в столбце.

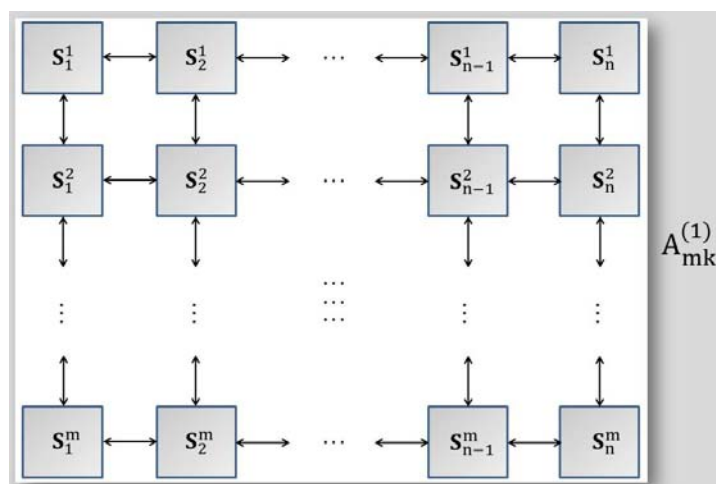


Рис. 6. Первый уровень аппаратной конфигурации

В данном случае элементами матрицы служат базовые логические вентили ПЛИС FPGA, которые расположены на кристалле ПЛИС также в виде матрицы. Соединениями в ПЛИС можно управлять путем замыкания транзисторных ключей, для чего предназначены низкоуровневые языки описания аппаратуры (Hardware Description Language, HDL). Матричное расположение логических вентилях удобно, поскольку оно обеспечивает возможность распределения вычислительных ресурсов на различных участках топологии вычислительного поля.

Данная матрица может являться одним из элементов второго уровня аппаратной конфигурации, как показано на рис. 7.

Высокая степень интеграции ПЛИС последних поколений позволяет создавать на своей базе вложенные аппаратные системы больших порядков, необходимость в построении которых определяется функциональными задачами данных структур.

Последний и наивысший аппаратный уровень  $q$  (рис. 8) в матричной структуре  $A_{mk}^{(q)}$ , построенной на основе ПЛИС, определяет уровень всей системы  $S$ , которая в нашем случае должна быть регенеративной.

Использование возможности многоуровневой реконфигурации в регенеративных электронных системах позволит осуществлять регенерацию целой группы неисправных элементов низкого аппаратного уровня за счет их коммутации на резервные матричные наборы, соответствующие нижнему аппарат-

ному уровню коммутируемых логических блоков ПЛИС FPGA, которые можно отнести к матрице, рассмотренной ранее на рис. 6.

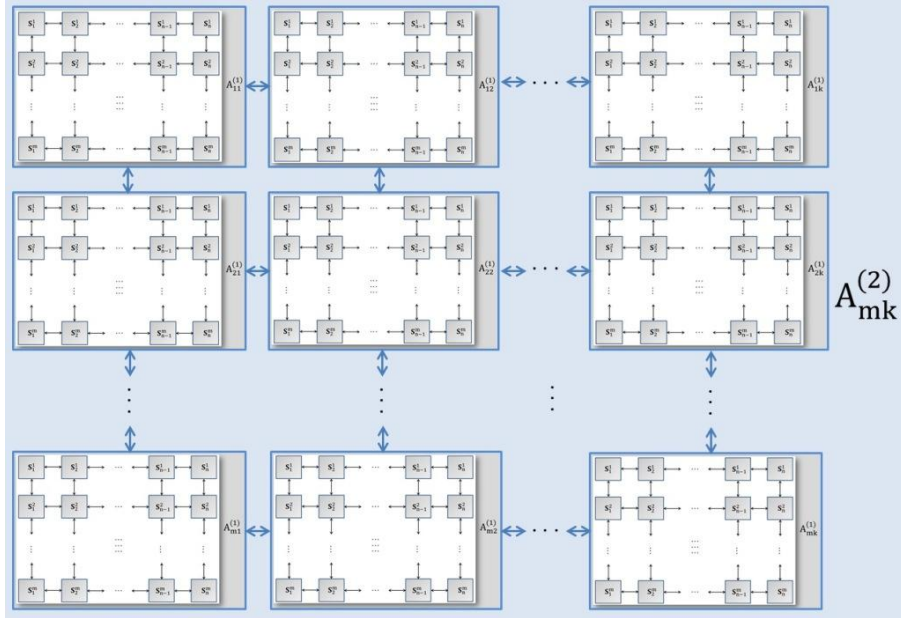


Рис. 7. Второй уровень аппаратной конфигурации

Свойство многоуровневой реконфигурации особенно важно при средне-статистических сбоях логических вентилей, возникающих в процессе воздействия космической радиации на бортовую аппаратуру космических аппаратов.

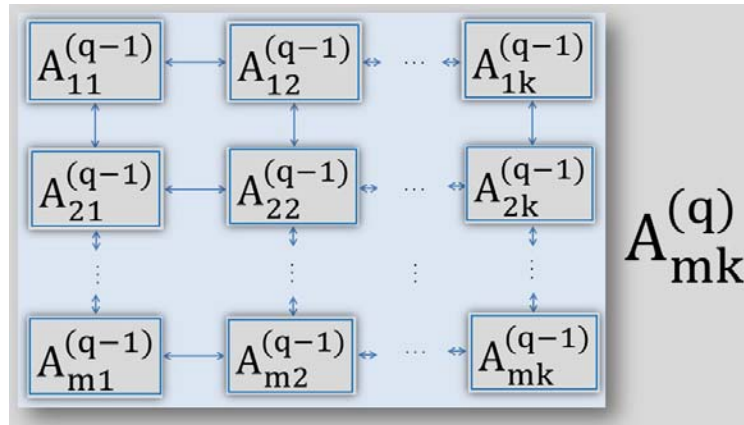


Рис. 8. Рост уровней аппаратной конфигурации

Возможность реконфигурации связей между элементами первого аппаратного уровня позволяет реализовать быстрые тестовые алгоритмы, заключающиеся в построчной диагностике логических вентилей, при переключении необходимых связей.

Кроме того, многоуровневая реконфигурация позволяет создавать дублирующие дискретные элементы контролируемых фрагментов регенеративной системы, функционирование которых можно использовать в качестве эталонного образца для контроля и диагностики элементов аппаратных матриц методом дублирования.

Представим себе следующий пример. Пусть функционирование некоторого элемента второго аппаратного уровня описывается набором функций  $f_k(x), k = \overline{1, K}$ . Для его контроля посредством реконфигурации резервных вентилях создается дублирующий (эталонный) элемент, характеристики которого будут аналогичны контролируемому, и описываются набором функций  $f_k^*(x), k = \overline{1, K}$ .

Подавая на входы диагностируемого и дублирующего элементов тестовый сигнал  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\}$ , на выходе диагностируемого элемента, при его исправном состоянии, будет ожидать получение тех же откликов, что и в дублирующем. Т. е., исправным состоянием контролируемого элемента будет являться условие

$$f_k(x) = f_k^*(x), k = \overline{1, K}.$$

С помощью логических элементов «Исключающее ИЛИ» реализуем операцию сложения по модулю два функций откликов диагностируемого и дублирующего блока, т.е.

$$y_k = f_k(x) \oplus f_k^*(x), k = \overline{1, K},$$

где  $y_k$  — сигнал с выхода элемента «Исключающее ИЛИ», на входы которого поданы  $k$ -е выходы контролируемого и дублирующего элементов.

В случае поступления на вход данного логического элемента разных функций от диагностируемой и дублирующей аппаратуры, т. е.

$$f_k(x) \neq f_k^*(x), k = \overline{1, K},$$

на его выходе сформируется логическая единица, что будет свидетельствовать о неисправности контролируемого блока регенеративной системы.

Можно подать выходы с логических элементов «Исключающее ИЛИ» на многовходовый (количество входов должно быть равным  $K$ ) логический элемент «ИЛИ». Этим мы реализуем общую функцию оценки состояния  $z$  контролируемого элемента регенеративной системы, описываемого функцией  $f(x)$ , причем функция  $z$  будет принимать только два значения: «0» или «1».

Тогда состояние контролируемого элемента регенеративной системы будет описываться с помощью функции  $z$  следующим образом:

$$z = y_1 \vee y_2 \vee \dots \vee y_k = \begin{cases} 0, (f(x) - \text{исправно}), \\ 1, (f(x) - \text{неисправно}). \end{cases}$$

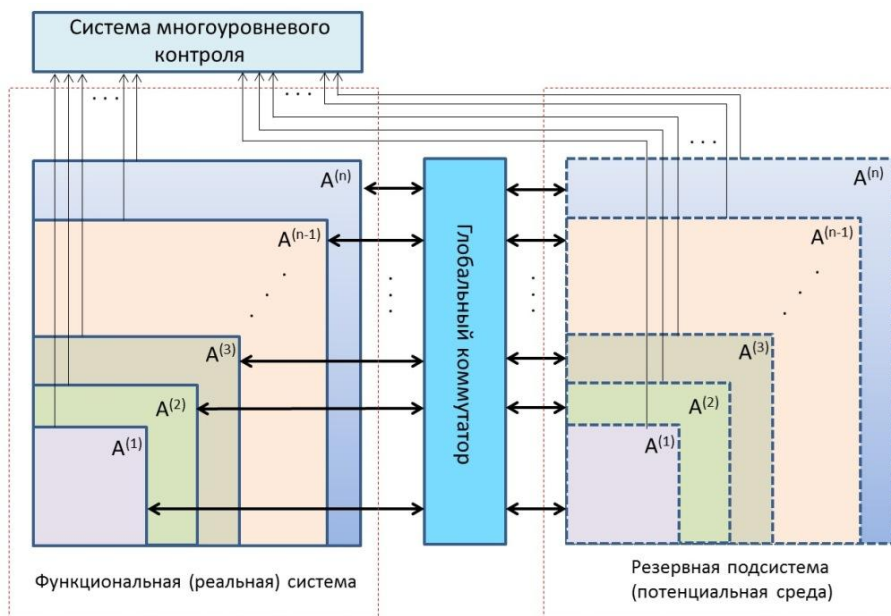
где  $y_1, y_2, \dots, y_k, k = \overline{1, K}$  — сигналы на выходах соответствующих логических элементов «Исключающее ИЛИ».

Приведенный пример является одним из самых простых методов контроля регенеративных элементов, которые можно осуществлять, используя возможности многоуровневой реконфигурации.

Ключевым моментом при реализации регенеративной системы на базе ПЛИС FPGA будет являться построение коммутационных каналов, которое будет зависеть от характеристик выбранной ПЛИС.

Выбор конкретного типа ПЛИС должен осуществляться исходя из требуемого количества аппаратных уровней регенеративной системы, функциональных задач и возможности реализовать переключение между базовыми элементами функционирующей системы, которую в постановке и анализе задачи мы называли реальной системой, и базовыми элементами, входящими в состав резервных подсистем (потенциальная среда).

Сам принцип коммутации можно представить в виде схемы, показанной на рис. 9.



**Рис. 9.** Организация коммутации при регенерации системы

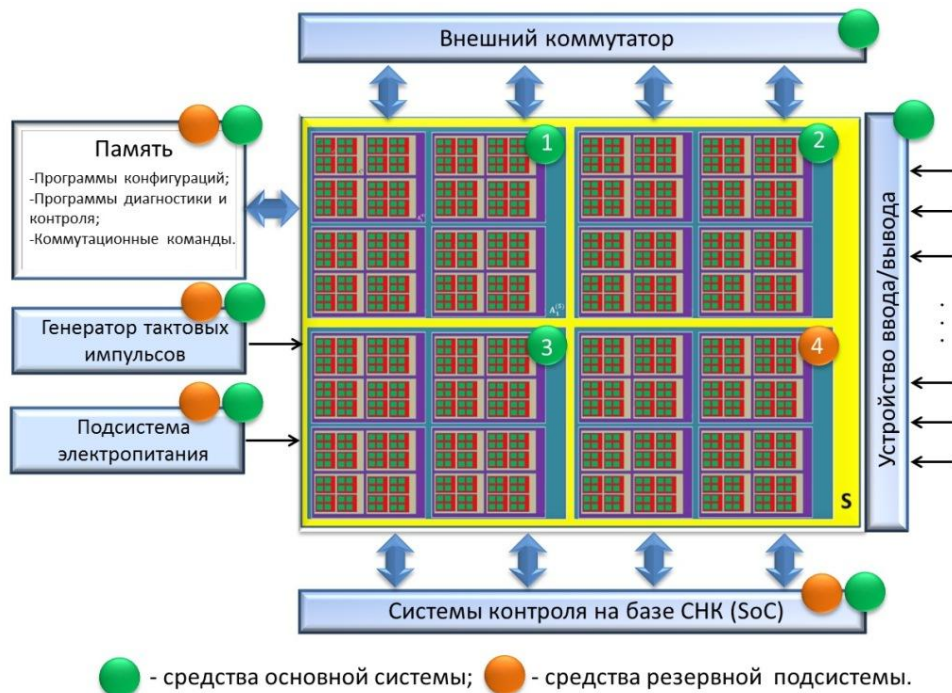
Здесь мы видим, что посредством глобального коммутатора можно осуществлять переключение не только базовых элементов первого аппаратного уровня  $A^{(1)}$ , но и самого верхнего аппаратного уровня  $A^{(n)}$ . Данное свойство особенно важно при необходимости переключать целые комплекты аппаратуры верхнего аппаратного уровня при сложных неисправностях бортовых электронных систем. Таким образом, многоуровневая реконфигурация позволяет осуществлять коммутацию элементов электронной системы на всех ее аппаратных уровнях.

В зависимости от характеристик используемой ПЛИС, глобальный коммутатор регенеративной системы можно реализовать на базе специальных конфигурируемых коммутаторов (программируемых мультиплексоров), входящих в состав большинства ПЛИС FPGA.

Независимо от архитектуры связей в ПЛИС FPGA, которую делят на два вида — островную и иерархическую, все их внутренние коммутаторы представляют собой программируемые мультиплексоры, подключающие между

собой те или иные коммутируемые логические блоки через цепочки проводников на кристалле ПЛИС.

На рис. 10 представлена блок-схема регенеративной системы с полем многоуровневой реконфигурации на базе ПЛИС FPGA, в которой задействован внешний коммутатор и система контроля, которую можно реализовать на базе так называемых систем на кристалле (CHK, Sistem-on-a-Chip, SoC), входящих в состав большинства современных ПЛИС FPGA в качестве встроенных подсистем.



**Рис. 10.** Блок-схема регенеративной системы с полем многоуровневой реконфигурации на базе ПЛИС FPGA

Несмотря на то что в представленной блок-схеме внешний коммутатор и система контроля изображены выделенными из поля многоуровневой реконфигурации, данные подсистемы также могут строиться на базе тех же ПЛИС, основная часть структуры которых задействована под вычислительное поле.

Во внешней памяти хранятся программы конфигураций, за счет которых выполняется реконфигурация системы в зависимости от графов вычислительных задач, а также в процессе ее регенерации. Кроме того, во внешней памяти должны храниться программы диагностики и контроля, посредством которых осуществляется контроль состояния элементов регенеративной системы на всех ее аппаратных уровнях, и коммутационные команды, за счет которых осуществляется работа внешнего коммутатора.

Поле многоуровневой реконфигурации делится на четыре части, три из которых составляют основное вычислительное поле, и одна — резервное.

Синхронизация процесса обработки информации осуществляется за счет тактовых импульсов, формируемых внешним генератором тактовых импульсов.

Таким образом, многоуровневая реконфигурация, реализуемая на базе ПЛИС FPGA, позволяет осуществлять регенерацию аппаратуры на всех аппаратных уровнях.

При построении электронных систем по данному принципу важным моментом является расчет необходимого числа ресурсных подсистем, отведенных в системе  $S$  для замещения ими подсистем, вышедших из строя.

## **2.2. Регенеративные электронные системы на базе ОВС**

Ввиду того, что все ОВС строятся по унифицированному принципу, то на их базе также возможна реализация регенеративных электронных систем. При этом, если ОВС создана на основе вычислительного поля ПЛИС FPGA с многоуровневой реконфигурацией, то сам процесс регенерации можно осуществлять по тому же принципу, который был рассмотрен в п.п. 2.1.

Если же первый аппаратный уровень электронной системы определяется вычислительной ячейкой (ВЯ), то здесь также возможно использовать методы регенерации, но уже более высокого аппаратного уровня.

Одним из недостатков, из-за которого ОВС не находят широкого применения в бортовой аппаратуре космических систем и комплексов, является их аппаратная избыточность.

С другой стороны, одним из современных подходов по повышению надежности бортовых электронных систем является введение избыточности в архитектуру высокого аппаратного уровня: резервируются грани бортовой цифровой вычислительной машины, дублируются платы блоков управления и контроля и т.п.

Поскольку главной особенностью рассматриваемых регенеративных систем является возможность резервирования аппаратуры на базовом аппаратном уровне, то с помощью ОВС предлагается объединить возможность как унифицированного подхода по построению регенеративной аппаратуры с многоуровневой реконфигурацией, так и повысить отказоустойчивость бортовой электронной аппаратуры, используя концепцию ОВС, в основе которой лежат три принципа:

1) *Принцип параллельности операций*, заключающийся в том, что любая сложная вычислительная задача может быть представлена в виде связанных между собой простых подзадач, и для любой сложной вычислительной задачи может быть реализован параллельный алгоритм, допускающий ее более эффективное решение (увеличение производительности за счет параллельной работы устройств);

2) *Принцип переменности логической структуры*, заключающийся в том, что для каждой сложной вычислительной задачи можно составить соответствующую топологическую структуру из обрабатывающих (вычислительных) элементов, связанных между собой определенным образом;

3) *Принцип конструктивной однородности элементов и связей между ними*, заключающийся в том, что система для решения сложной вычислительной задачи может быть построена из одинаковых обрабатывающих элементов (вычислительных ячеек), связанных между собой одинаковым образом.

На рис. 11 показан пример структуры типичной вычислительной ячейки (ВЯ) ОВС, используемой в матричной ОВС. В состав ВЯ входит регистр программы, через который осуществляется ввод и вывод программ управления состоянием ВЯ. От него через дешифратор команды осуществляется управление арифметико-логическим устройством (АЛУ), в котором производятся вычислительные операции над данными, приходящими от соседних ВЯ. Кро-

ме того, посредством АЛУ осуществляется управление переключениями коммутатора ВЯ, данные о состояниях которого хранятся в памяти ячейки.



Рис. 11. Структура вычислительной ячейки ОВС

Для регенеративной электронной системы, построенной на базе ОВС, в состав ВЯ должно входить еще и устройство контроля, которое будет обеспечивать самоконтроль и контроль состояния соседних ВЯ. В случае матричной конфигурации без диагональных связей максимальное число соседних ВЯ для каждой ячейки ОВС  $n = 4$ , с диагональными связями в матричной структуре (рис. 12) максимальное число соседних ВЯ для каждой ячейки ОВС  $n = 8$ .

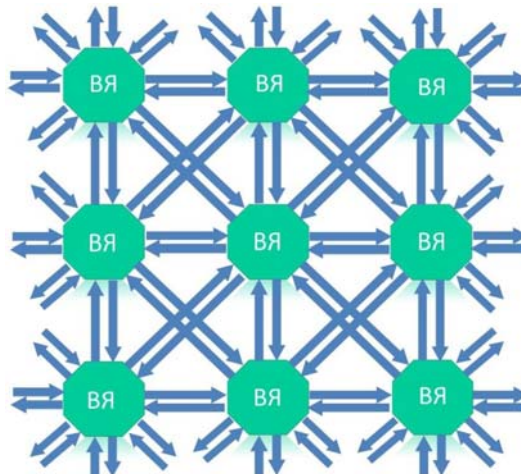


Рис. 12. Диагональные связи в матричной ОВС

Сама идея регенеративной системы подразумевает в некоторой степени автономность каждой ВЯ, поскольку для данных систем предлагается не использовать внешние функционально-контролирующие и управляющие устройства. Данное обстоятельство требует того, что бы в каждой ячейке хранилась информация о каждой ВЯ регенеративной системы, для того, чтобы в процессе регенерации не образовались связи с ранее вышедшими из строя элементами.

Тогда, структура ВЯ регенеративной электронной системы будет включать следующие функциональные блоки (рис. 13): блок вычислений, включающий в себя регистр программы, дешифратор команды и АЛУ; блок коммутации связей с соседними ВЯ; блок контроля, состоящий и самоконтролирующего устройства (СКУ) и устройства контроля соседних ВЯ (УКСВЯ); блок памяти, хранящий данные о коммутации ВЯ с соседними ячейками и данные о состоянии ВЯ ОВС; генератор метки «Задействован»/«Не задействован», с помощью которого непрерывно выдается сигнал на соседние ВЯ, информирующий тем самым ОВС об ее участии в вычислительном процессе в режиме реального времени.



Рис. 13. Функциональные блоки ВЯ регенеративной ОВС

Такая структура ВЯ имеет минимальный набор функциональных элементов, необходимых для создания регенеративной ОВС.

Рассмотрим пример процесса регенерации ВЯ в ОВС. Пусть задано однородное вычислительное поле (ОВС), состоящее из основного вычислительного ресурса и резервного вычислительного ресурса (рис. 14). Основному вычислительному ресурсу соответствует матричный набор ВЯ  $S_v^w, v = \overline{1, 4}, w = \overline{1, 6}$ , где  $v$  — номер ВЯ в столбце матрицы основного вычислительного ресурса, а  $w$  — номер ВЯ в строке матрицы основного вычислительного ресурса. Ре-

зервному вычислительному ресурсу соответствует матричный набор ВЯ  $R_h^q$ ,  $h = 1, 2, q = \overline{1, 6}$ , где  $h$  — номер ВЯ в столбце матрицы резервного вычислительного ресурса,  $q$  — номер ВЯ в строке матрицы резервного вычислительного ресурса.

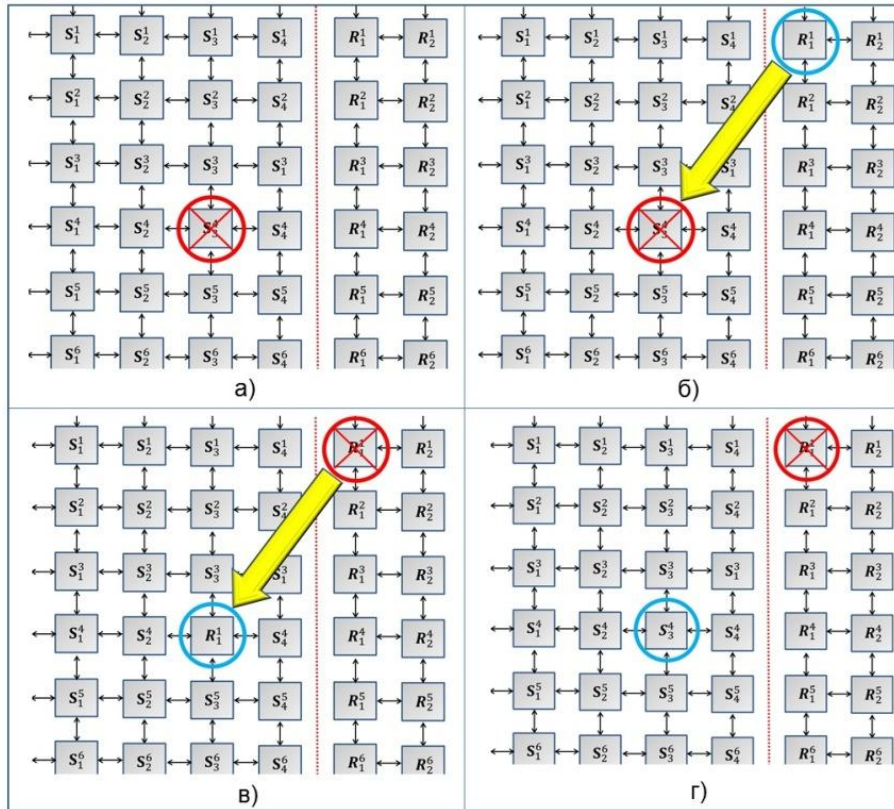


Рис. 14. Регенерация ВЯ ОВС.

(Основному вычислительному ресурсу соответствует матричный набор ВЯ  $S_v^w$ , резервному вычислительному ресурсу соответствует матричный набор ВЯ  $R_h^q$ )

Пусть в процессе выполнения вычислительной операции задействованы все 24 ВЯ матрицы основного вычислительного ресурса ОВС.

В момент времени  $t_1$  ВЯ  $S_3^4$  выходит из строя (рис. 14, а). Данная ВЯ контролируется со стороны четырех ВЯ:  $S_3^3, S_4^4, S_3^5, S_2^4$ . Даже если СКУ ВЯ  $S_3^4$  не выдает сигнала о своем неисправном состоянии, то мы можем, используя простейший мажоритарный алгоритм, сделать вывод о наличии неисправности в ВЯ  $S_3^4$ .

ВЯ  $R_1^1$  резервного вычислительного ресурса, с меткой «Не задействован», получает информацию о неисправности или отсутствии ВЯ  $S_3^4$  в основ-

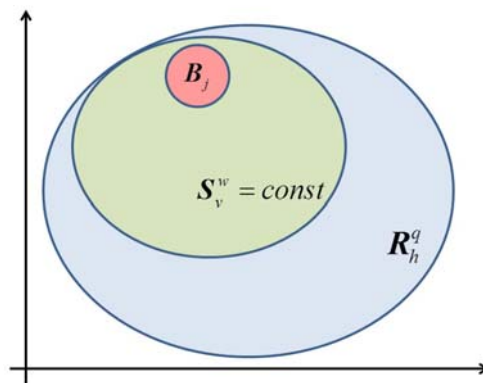
ном вычислительном ресурсе (рис. 14, б). Регенеративная система производит коммутацию выводов от ВЯ  $S_3^4$  к ВЯ  $R_1^1$  (рис. 14, в), в результате чего в ВЯ  $R_1^1$  появляется метка «Задействован». После операции регенерации ВЯ  $R_1^1$  начинает выполнять те же функции, что выполнял ВЯ  $S_3^4$  (рис. 14, г). Операцию регенерации, которая производилась в течение времени от  $t_1$  до  $t_2$  можно представить в виде выражения:

$$[t_1, t_2] \left\{ W_{OBC}^0(p) \xrightarrow{reg} W_{OBC}^1(p) = W_{S_3^4}^0(p) \xrightarrow{reg} W_{R_1^1}^1(p) \right\},$$

где  $W_{OBC}^0(p)$  и  $W_{OBC}^1(p)$  — передаточные функции ОВС, соответствующие неисправному и исправному состоянию ОВС;  $W_{S_3^4}^0(p)$  — передаточная функция неисправной ВЯ  $S_3^4$ ;  $W_{R_1^1}^1(p)$  — передаточная функция исправной ВЯ  $R_1^1$ .

Несмотря на то, что ВЯ  $S_3^4$  в результате регенерации была восстановлена, физически она будет располагаться в поле резервного вычислительного ресурса  $R_h^q$ .

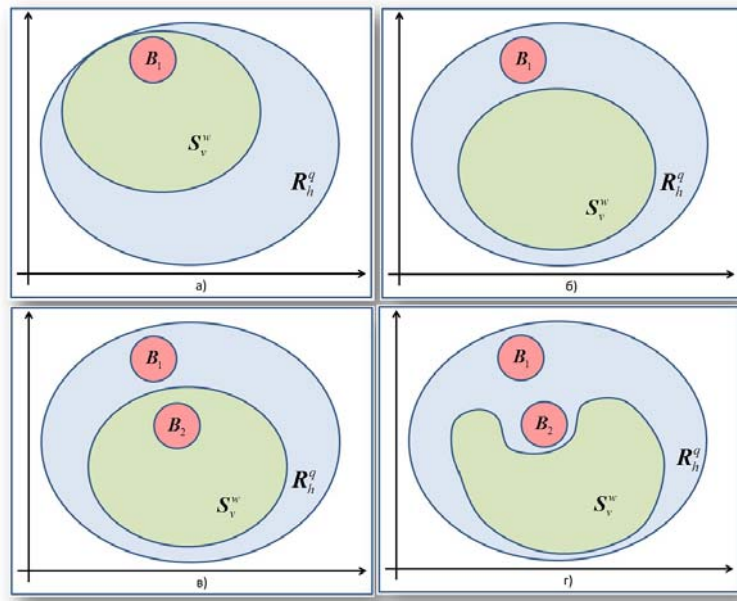
С точки зрения распределения вычислительных ресурсов, возникающих в процессе регенерации ОВС при различных неисправностях ВЯ, ОВС можно представить в виде трех подмножеств (рис. 15): подмножества  $S_v^w$ , представляющего собой вычислительный ресурс регенеративной системы, при выполнении вычислительной задачи; подмножества  $R_h^q$ , представляющего собой резервный вычислительный ресурс, или потенциальную среду регенеративной системы; подмножество неисправностей ВЯ  $B_j, j = \overline{1, n}$ , где  $n$  общее число ВЯ в ОВС.



**Рис. 15.** Представление вычислительных ресурсов регенеративной ОВС в виде подмножеств. ( $S_v^w$  — вычислительный ресурс регенеративной системы при выполнении вычислительной задачи;  $R_h^q$  — резервный вычислительный ресурс или потенциальная среда регенеративной системы;  $B_j$  — подмножество неисправностей ВЯ)

Условием существования регенеративной ОВС будет являться сохранение постоянного набора элементов, образующих подмножество  $S_v^w$ , т.е.  $S_v^w = const$ .

Рис. 16 иллюстрирует деградацию вычислительных ресурсов в процессе функционирования регенеративной электронной системы на базе ОВС из-за возникновения неисправностей в ВЯ. Процесс выхода из строя одной из ВЯ ОВС, возникающий в ходе функционирования ОВС, эквивалентен физическому удалению неисправной ВЯ из состава основного вычислительного ресурса.



**Рис. 16.** Деградация вычислительных ресурсов регенеративной ОВС

Неисправная ВЯ образует элемент  $B_1$  подмножества  $B_j$  (рис. 16, а). В процессе регенерации ОВС, подмножество  $S_v^w$  «перемещается» в подмножество  $R_h^q$ , переключаясь с неисправной ВЯ на исправную (рис. 16, б). При этом элемент  $B_1$  образует на всем вычислительном ресурсе аналог пустого множества, что говорит о том, что независимо от неисправностей ВЯ, которые могут возникнуть в дальнейшем, данный участок подмножества  $R_h^q$  нельзя будет использовать при регенерации ОВС.

Отказ еще одной ВЯ в регенеративной ОВС вызывает появление еще одного элемента подмножества  $B_j$  — элемента  $B_2$  (рис. 16, в). После чего, восстановление элемента подмножества  $S_v^w$  происходит путем присвоения себе одного из оставшихся элементов подмножества  $R_h^q$  (рис. 16, г).

И в первом и во втором случаях после регенерации, подмножество  $S_v^w$  обладает одними и теми же функциональными элементами, а значит  $S_v^w = const$ , что удовлетворяет условию существования регенеративной ОВС.

Как уже было сказано выше, на базе ПЛИС FPGA мы можем реализовать также и ОВС. Из [9] приведем пример структурной организации подобной вычислительной структуры на рис. 17.

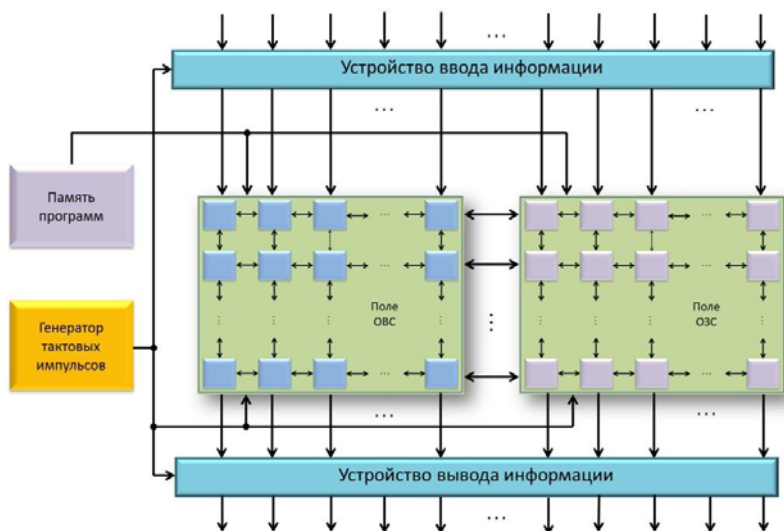


Рис. 17. Вычислительная структура на базе ОВС

Как видно из данного рисунка вся вычислительная структура состоит из двух основных частей: матрицы вычислительных ячеек однородной вычислительной среды (структуры) (ОВС) и матрицы запоминающих ячеек однородной запоминающей среды (ОЗС), связанных между собой через свои периферийные элементы [9].

Перед использованием данной ОВС в вычислительных задачах, производится ее настройка, в процессе которой загружаются регистры команд вычислительных и запоминающих ячеек. После этого запускается поток данных, в процессе которых за счет тактовых импульсов внешнего генератора происходит синхронизация работы элементов ОВС и ОЗС. Таким образом, в данной структуре производится аппаратная реализация алгоритмов обработки входной информации по мультиконвейерной схеме.

Для возможности функционального замещения вышедшей из строя ВЯ на исправную ВЯ достаточно использовать коммутационную восстанавливаемую ОВС, изображенную на рис. 18. В составе данной ОВС можно выделить три канала приема/передачи данных: канал контроля, канал обработки и канал передачи состояния «Задействован»/«Не задействован».

С помощью канала контроля осуществляется передача сигналов с контрольных точек ВЯ на коммутатор, где, исходя из значений принятых контрольных сигналов, происходит автоматическое переключение неисправной ВЯ на незадействованную (резервную) в вычислительном процессе ВЯ.

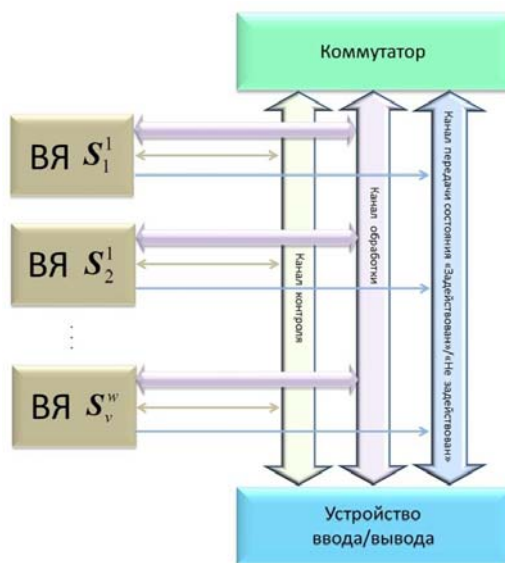


Рис. 18. Коммутационная восстанавливаемая ОВС

В канале обработки происходит обмен данными между ВЯ, задействованными в вычислительном процессе. Данные поступают с устройства ввода/вывода и с помощью коммутатора распределяются между ВЯ.

Через канал передачи состояния «Задействован»/«Не задействован» осуществляется выдача на коммутатор информации об участии ВЯ в вычислительном процессе. Не смотря на то, что на рис. 18 данный канал является независимым, выдачу информации о состоянии каждой ВЯ на коммутатор можно осуществлять и по каналу контроля. Тогда коммутационная восстанавливаемая ОВС будет представлять собой взаимодействие матрицы ВЯ, коммутатора и устройства ввода/вывода по двум каналам: каналу контроля и каналу обработки.

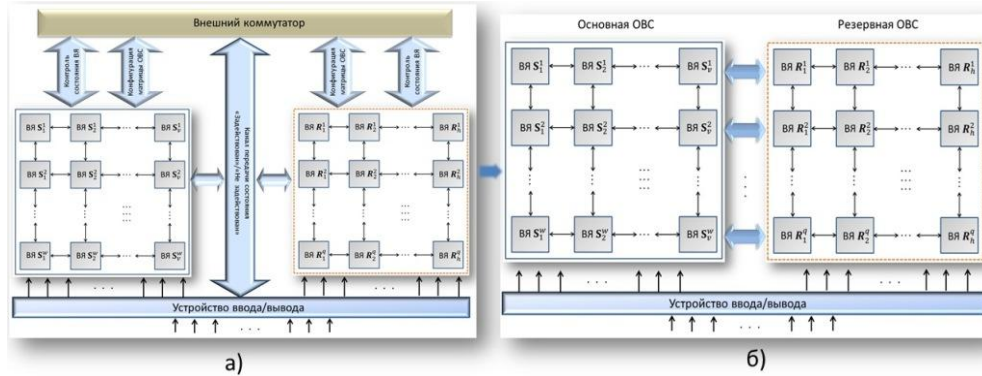
На основе построения коммутационной восстанавливаемой ОВС можно предложить принцип построения регенеративной ОВС, изображенной на рис. 19, а.

Здесь, в отличие от коммутационной восстанавливаемой ОВС, добавляется матрица  $R_h^q$ , состоящая из набора резервных ВЯ. По количеству элементов матрица  $R_h^q$  может отличаться от матрицы  $S_v^w$ .

То обстоятельство, что надежность всей регенеративной ОВС будет складываться из надежности не только основной  $S_v^w$  и резервной  $R_h^q$  матриц ВЯ ОВС, но еще и из надежности внешнего коммутатора, каналов управления конфигурацией матриц, канала передачи информации о задействовании ВЯ в вычислительном процессе (канал передачи состояния «Задействован»/«Не задействован») и устройства ввода/вывода, указывает нам на неэффективность использования такой системы в качестве регенеративной.

Избавиться от данной проблемы представляется возможным лишь при перераспределении функций периферийных элементов ОВС, не входящих в состав матриц  $S_v^w$  и  $R_h^q$ , между всеми ВЯ регенеративной ОВС.

В этом случае структура регенеративной ОВС будет иметь вид, показанный на рис. 19, б.



**Рис. 19.** Регенеративная ОВС:  
а) с внешним коммутатором; б) без внешнего коммутатора

Она будет состоять из двух взаимодействующих между собой матриц ВЯ ОВС (основной  $S_v^w$  и резервной  $R_h^q$ ) и устройства ввода/вывода. При этом управление конфигурацией основной матрицы  $S_v^w$  должно будет выполняться через устройство ввода/вывода, поскольку требуемая топология связей между ВЯ будет зависеть только от количества обрабатываемых параметров и функций обработки, присваиваемых каждой ВЯ в процессе решения той или иной вычислительной задачи.

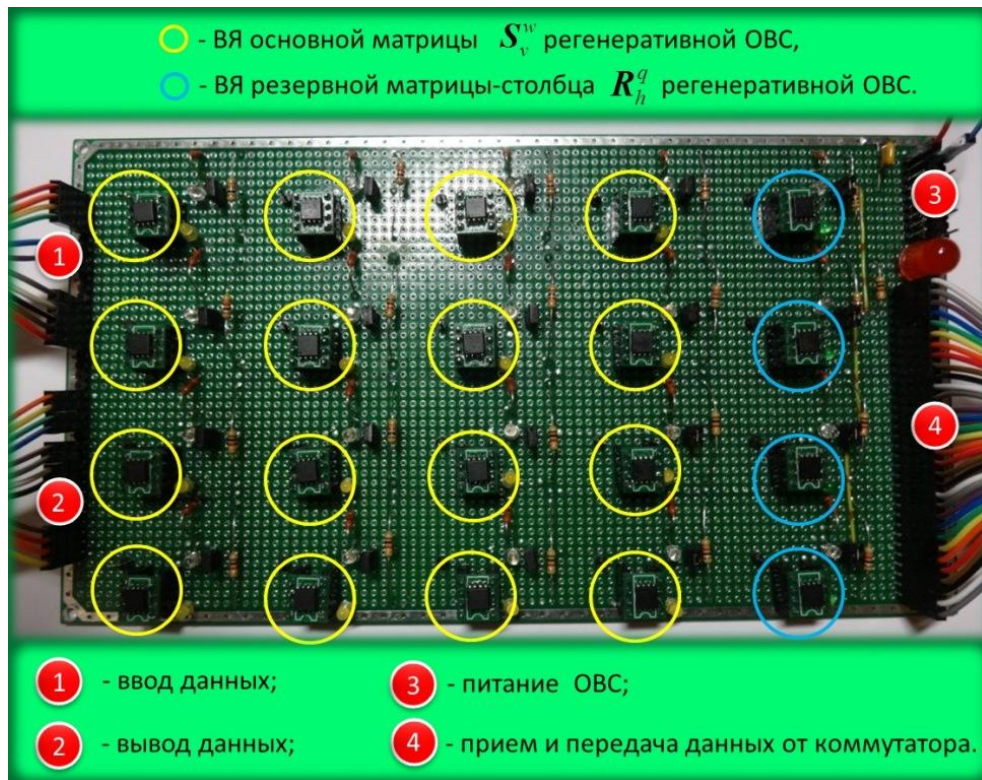
Регенерация такой системы будет заключаться в том, что в случае выхода из строя одной из ВЯ основной ОВС, данная ВЯ будет отключаться из функционирующей схемы, и на ее место будет подключаться ВЯ из состава резервной ОВС.

В предлагаемой регенеративной ОВС, каждая ВЯ собирает информацию о состоянии всех ВЯ в основной и резервной ОВС, контролируя при этом функционирование окружающих ее (соседних) ВЯ. Отключение неисправной ВЯ и подключение резервной ВЯ возможно реализовать за счет использования мультиплексорных каналов обмена данными, на базе которых строятся связи между элементами матриц  $S_v^w$  и  $R_h^q$ .

Если ОВС реализуется на базе реконфигурируемых систем, построенных на базе ПЛИС FPGA, пример которой приводился на рис. 17, то в качестве коммутаторов связей между элементами можно задействовать те же программируемые мультиплексоры, посредством которых выполняется реконфигурация вычислительного поля ОВС.

На рис. 20 приведена фотография экспериментального образца регенеративной ОВС, полученного в ходе макетирования принципиальной электрической схемы регенеративной электронной системы, состоящей из основной матрицы ВЯ  $S_v^w$  и резервной матрицы-столбца ВЯ  $R_h^q$ .

В качестве ВЯ использовался микроконтроллер ATtiny13 семейства AVR. Основная матрица ОВС представляла собой 16 микроконтроллеров, соединенных в виде матрицы размерностью  $4 \times 4$ , резервная матрица-столбец ОВС состояла из 4-х микроконтроллеров.



**Рис. 20.** Макетирование регенеративной ОВС с ВЯ на базе микроконтроллера ATtiny13

В ходе эксперимента обрабатывались алгоритмы переключения схемы с неисправными ВЯ на исправные резервные ВЯ с помощью внешнего коммутатора, выполненного на базе матричного переключателя. В качестве имитации неисправностей в ВЯ, использовались отключение питания на микроконтроллере и блокировка его гальванических связей с соседними ВЯ.

Также был разработан ряд алгоритмов контроля соседних ВЯ каждым отдельным ВЯ, входящим в состав основной и резервной матриц ОВС.

Полученные результаты показали необходимость повышения количества контролируемых параметров каждой ВЯ.

Кроме того, первый прототип регенеративной системы обладает существенным недостатком, который заключается в невозможности осуществления контроля с высокой степенью точности составных элементов ВЯ, т. е. элементов низкого аппаратного уровня.

Данный недостаток планируется устранить, используя построение регенеративной электронной системы на базе ПЛИС FPGA.

Таким образом, при построении регенеративных электронных систем на базе ОВС, восстановление вышедшей из строя ВЯ может быть достигнуто двумя способами.

Первый способ заключается в полном замещении (переключении ОВС) вышедшей из строя ВЯ на резервную ВЯ. При этом, если система контроля состояния соседних ВЯ и позволит локализовать неисправность низкого аппаратного уровня с высокой степенью точности, то устранить данную неисправность мы сможем лишь путем снятия неисправного ВЯ из состава задейство-

ванных в вычислительном процессе ВЯ, и установки на его место исправного ВЯ за счет коммутации.

Второй способ заключается в восстановлении работоспособности ВЯ путем замещения (коммутации) вышедшего из строя элемента низкого аппаратного уровня на соответствующий ему исправный элемент. Данный способ возможен лишь при реализации многоуровневой реконфигурации посредством ПЛИС FPGA.

### **Выводы**

Предложен подход по повышению надежности электронной аппаратуры космических систем и комплексов, заключающийся в использовании так называемых регенеративных электронных систем, способных резервировать и тем самым восстанавливать элементы электронной аппаратуры на самом низком аппаратном уровне.

Показано, что практическая реализация регенеративных электронных систем требует унифицированного подхода по построению электронной аппаратуры космических систем и комплексов.

Проведен анализ принципов функционирования регенеративной электронной системы, учитывающий возможности контроля и диагностики неисправностей базовых элементов электронной аппаратуры.

Показаны основные отличительные особенности регенеративных электронных систем от систем, с резервированием на высоких аппаратных уровнях.

Предложены два метода практической реализации данных систем. Первый метод заключается в использовании многоуровневой реконфигурации электронной аппаратуры, которой можно достигнуть, используя единую концепцию построения электронной аппаратуры на базе ПЛИС FPGA. Второй метод заключается в использовании свойств ОВС, которые также можно реализовать как на базе ПЛИС FPGA, так и посредством специализированной ЭКБ (цифровые сигнальные процессоры (DSP), СБИС, СНК (SoC), микроконтроллеры и др.).

В качестве примеров возможной структурной организации регенеративной электронной системы приводятся блок-схема регенеративной системы с полем многоуровневой реконфигурации на базе ПЛИС FPGA и структурная схема регенеративной ОВС.

Показано, что возможность использования многоуровневой реконфигурации, реализуемой на базе ПЛИС FPGA, позволяет осуществлять регенерацию аппаратуры на всех аппаратных уровнях.

Предложены два способа регенерации электронных систем на базе ОВС. Первый способ заключается в полном замещении (переключении ОВС) вышедшей из строя ВЯ на резервную ВЯ. Второй способ заключается в восстановлении работоспособности ВЯ путем замещения (коммутации) вышедшего из строя элемента низкого аппаратного уровня на соответствующий ему исправный элемент. При этом последний способ возможен лишь при построении электронной аппаратуры с использованием многоуровневой реконфигурации посредством ПЛИС FPGA.

В настоящее время разрабатывается отладочная плата для разработки и исследования сложной регенеративной системы на базе ПЛИС FPGA. С помощью нее планируется также исследовать возможности многоуровневой реконфигурации для решения широкого круга вычислительно трудоемких задач. Исследуются другие методы практической реализации регенеративных электронных систем, включающие элементы функциональной электроники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алехин М.Д., Клабуков И.Д., Мусиенко С.В.* Интеллектуальные авиаконструкционные материалы и микросистемная техника. М.: Sky Shell. 2012 / Сб. мат-лов конф. «Будущее индустрии» за 2012 год, 2012. 32 с.
2. *Dabydeen S.L.* An Introduction to intellectual property: essays and materials. / iUniverse, 2004.
3. *Barrett M.* 2004 Supplement To Cases And Materials On Intellectual Property /American Casebook Series, 2004;
4. *Гришин Ю.И., Мандрыка Е.А., Мельникова Н.Е.* Биологическая регенерация веществ: Основные процессы, системы, оборудование. М.: У Никитских ворот, 2014. 496 с.
5. *Алексеев А.А., Кораблев Ю.А., Шестопалов М.Ю.* Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 352 с.
6. *Давыдов П.С.* Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.;
7. *Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др.* Бортовые системы управления космическими аппаратами / Под ред. проф. А.С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
8. *Шкляр В.Н.* Надежность систем управления: учебное пособие/Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. 126 с.
9. *Каляев И.А., Левин И.И., Семерников Е.А., Шмойлов В.И.* Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные структуры /Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под общ. ред. *И.А. Каляева.* Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2009. 344 с.
10. *Каляев А.В., Левин И.И.* Модульно-наращиваемые многопроцессорные системы со структурно-процедурной организацией вычислений. М.: Янус-К, 2003. 380 с.
11. *Баран Е.Д.* LabVIEW FPGA. Реконфигурируемые измерительные и управляющие системы. М.: ДМК Пресс. 488 с.
12. *Евреинов Э.В.* Однородные вычислительные системы, структуры и среды. М.: Радио и связь, 1981. 208 с.
13. *Кульба В.В., Е.А. Микрин, Павлов Б.В., Платонов В.Н;* под ред. *Микрина Е.А.* Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов. М.: Наука, 2006. 579 с.
14. *Трубочкина Н.К.* Моделирование 3D наносхемотехники. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 499 с.
15. *Колмаков А.Г., Баринов С.М., Алымов М.И.* Основы технологий и применение наноматериалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 208 с.
16. *Смирнов Ю.А., Соколов С.В., Титов Е.В.* Основы нано- и функциональной электроники: Учебное пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2013. 320 с.

*г. Калуга, Филиал ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»  
android4.1@mail.ru*

*Savkin L.V.*

### *Regenerative electronic systems in space systems and complexes*

*Introduce the concept of regenerative electronic system. We propose a method for increasing the reliability of the electronic equipment space systems and complexes using regenerative electronic systems. The analysis of their operating principles.*

*Two methods of practical implementation of these systems. The first method is to use a multi-level reconfiguration of electronic equipment based on programmable logic device (PLD). The second method is to use a homogeneous computing structures.*

*It is shown that each of these methods requires a unified approach to the construction of the electronic equipment space systems and complexes.*

***Regenerative system, reservation, programmable logic device (PLD), multi-level reconfiguration, homogeneous computing structure.***