

## **ПОСТРОЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ**

Рассмотрены вопросы построения отказоустойчивых цифровых устройств на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) на основе аппаратурно-программных средств самовосстановления. Приведена структурная модель отказоустойчивой СБИС на ПЛИС с аппаратурно-программными средствами самовосстановления, предназначенная для исследования отказоустойчивости и выбора наиболее эффективной структуры. Дана оценка значения выхода годных СБИС на ПЛИС с аппаратурно-программными средствами самовосстановления в зависимости от среднего числа дефектов, коэффициента группирования дефектов и числа резервных элементов.

Необходимость обеспечения отказоустойчивости цифровых устройств, построенных на новой элементной базе – программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [1], обусловлена высокими требованиями к их быстродействию, точности, надежности и безотказности [2, 3]. Одним из перспективных путей обеспечения отказоустойчивости цифровых устройств на ПЛИС является использование при их построении встроенных средств самовосстановления. Обеспечение отказоустойчивости программируемых логических интегральных схем на основе встроенных аппаратурных средств самовосстановления рассмотрено в работе [4]. В данной работе рассмотрено построение отказоустойчивых программируемых цифровых устройств на основе аппаратурно-программных средств самовосстановления.

Программные средства самовосстановления, представляя собой программную избыточность, увеличивают стоимость системы, т.к. требуют дополнительных аппаратурных средств (память, процессор и т.д.). Однако этот недостаток компенсируется тем, что рассматриваемые средства самовосстановления существенно улучшают показатели функционирования и надежности СБИС ПЛИС, которые имеют тенденцию уменьшения стоимости аппаратуры и повышения ее быстродействия.

Аппаратурно-программные средства самовосстановления представляют собой сочетание аппаратурных и программных средств, которые применяются на различных иерархических уровнях системы, обеспечивают исправление широкого класса неисправностей и оперативное восстановление работоспособности цифрового устройства. Эти средства подразделяются на статические и динамические.

Статические аппаратурно-программные средства осуществляют самовосстановление в момент времени, когда устройство не применяется по своему назначению, т.е. при снятии основных задач. В этом случае процесс самовосстановления выполняется поочередно или синхронно всеми ресурсами системы кристалла (цифрового устройства). В устройствах с централизованным управлением восстановление выполняется под управлением единого программного (аппаратурного) управляющего средства, что позволяет достичь оптимального распределения ресурсов. Управляющие средства должны быть самодиагностируемыми и самовосстанавливаемыми, иначе наличие отказа в них приведет к полному отказу всего устройства (СБИС ПЛИС). В устройствах с децентрализованным управлением самовосстановление выполняется либо выделенным в некоторый момент времени управляющим программным (аппаратурным) средством, либо с помощью программных (аппаратурных) управляющих средств, выполняемых каждым микропроцессором самостоятельно (в этом случае необходимо согласование действий микропроцессоров).

Динамические аппаратурно-программные средства самовосстановления применяются во время решения основных задач. При этом наличие или отсутствие того или другого вида аппаратурных и программных средств восстановления работоспособности цифрового устройства (СБИС ПЛИС): дублирования, программной коммутации и т.д.

определяется их назначением, требованиями к надежности при эксплуатации, количеством и сложностью логических схем и экономическими показателями.

Самовосстанавливаемые цифровые устройства должны обладать следующими свойствами: 1) обнаружение неисправности в момент времени ее первого проявления (данное свойство реализуется с помощью самопроверяемых схем встроенного контроля); 2) локализация неисправности с заданной глубиной (свойство реализуется путем применения встроенных средств самотестирования); 3) перестройка-реконфигурация структуры устройства (реализуется с помощью программных средств); 4) восстановление нормального функционирования устройства (реализуется соответствующими встроенными аппаратурно-программными средствами). С учетом данных свойств предлагается следующая упрощенная структурная модель отказоустойчивой СБИС на ПЛИС с аппаратурно-программными средствами самовосстановления (рис.1).

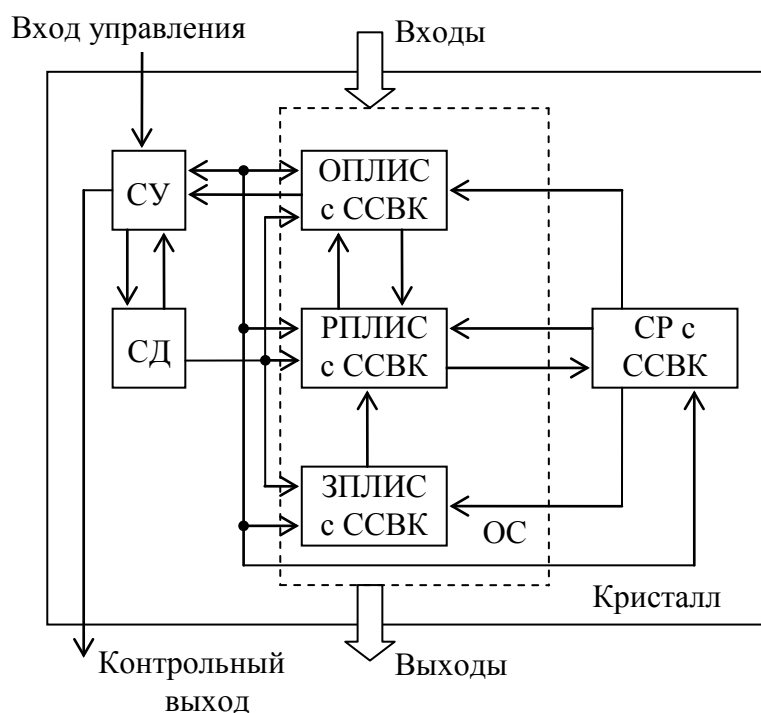


Рисунок 1. Структурная модель отказоустойчивой СБИС на ПЛИС с аппаратурно-программными средствами самовосстановления

Модель содержит: средства управления (СУ) процессом самовосстановления; средства самодиагностирования (СД), включающие генератор тестовой последовательности и (или) контролирующие и локализующие тесты, записанные в ПЗУ; объект самовосстановления (ОС), включающий работоспособные ПЛИС (РПЛИС), запасные ПЛИС (ЗПЛИС) и отказавшие ПЛИС (ОПЛИС) с самопроверяемыми схемами встроенного контроля (ССВК); средства реконфигурации (СР) с ССВК.

Работоспособные ПЛИС с ССВК, выполняющие все рабочие функции СБИС, составляют исходную структуру (вычислительное ядро) устройства. Возникшая неисправность либо маскируется избыточной информацией (в случае сбоя), либо обнаруживается и локализуется средствами самодиагностирования (в случае отказа).

Неисправная ПЛИС средствами реконфигурации исключается из исходной структуры и заменяется на запасную ПЛИС, а отказавшая ПЛИС включается в число ОПЛИС, подлежащих восстановлению. Средства самовосстановления восстанавливают правильное функционирование СБИС. При этом в случае восстановления отказавшей ПЛИС, она пополняет число ЗПЛИС. Если резерв исчерпан, выполняется реконфигурация исходной структуры СБИС без замены ОПЛИС на ЗПЛИС. В этом случае наблю-

дается деградация системы, т.е. понижение ее вычислительных способностей. Однако деградация будет почти не наблюдаться, если учесть то, что в настоящее время число элементарных схем (транзисторов) в одном корпусе интегральной схемы выросло до сотен миллионов и это позволяет создавать достаточный запас для обеспечения высокой отказоустойчивости СБИС.

Приведенная структурная модель позволяет представить различные структуры программируемого цифрового устройства с аппаратурно-программными средствами самовосстановления, моделирование которых на компьютере дает возможность сравнения надежностных характеристик исследуемых отказоустойчивых структур [4, 5], оценки параметров различных топологий, определения оптимальных значений вносимой избыточности и выбора эффективной структуры. Для оценки эффективности отказоустойчивой структуры важным является анализ достигаемого улучшения выхода годных СБИС ПЛИС в зависимости от определенных параметров. Расчеты значения выхода годных ( $Y$ ) СБИС ПЛИС (типа ПЛМ – программируемой логической матрицы) в зависимости от среднего числа дефектов ( $\lambda$ ) на кристалле, коэффициента группирования дефектов ( $\alpha$ ) и числа резервных элементов ( $K_p$ ), выполненные на основе формул (1-3) [6], позволили получить следующие результаты (рис. 2,3,4).

$$Y = \beta Y_{\epsilon} Y_{нв} \frac{A}{A + K_p}; \quad (1)$$

где  $\beta$  - уровень потока дефектов (обычно принимается  $\beta=1$ );  $Y_{\epsilon}$  – выход восстановимой площади, в которой можно устранить до  $S$  дефектов, вычисляется по формуле (2):

$$Y_{\epsilon} = \sum_{n=0}^S \frac{\Gamma(\alpha + n)(\lambda / \alpha)^n}{n! \Gamma(\alpha)(1 + \lambda / \alpha)^{\alpha+n}}; \quad (2)$$

$Y_{нв}$  – выход невозстановимой площади, в которой число устранимых дефектов  $S=0$ , вычисляется с помощью формулы (3):

$$Y_{нв} = (1 + \lambda / \alpha)^{-\alpha}; \quad (3)$$

$A$  – исходная площадь,  $K_p$  – дополнительная площадь (число резервных элементов),  $\Gamma$  – гамма-функция.

График (рис.2.) показывает, что увеличение среднего числа дефектов в структуре СБИС ПЛИС уменьшает выход годных структур.

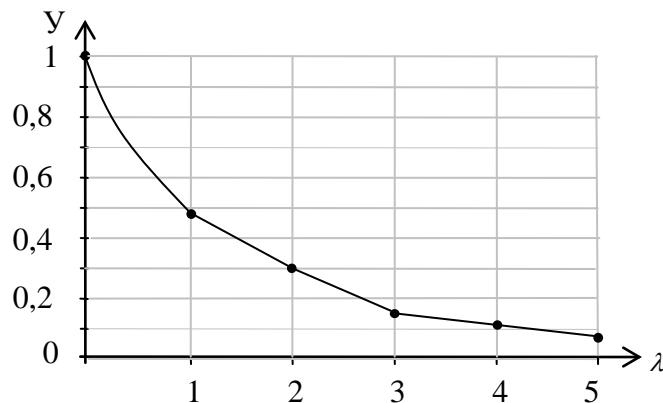


Рисунок 2. График выхода годных структур в зависимости от среднего числа дефектов.

Графики (рис.3.) показывают, что увеличение коэффициента группирования дефектов при постоянном среднем числе дефектов незначительно влияет на выход годных схем, а увеличение числа резервных элементов существенно увеличивает выход годных кристаллов.

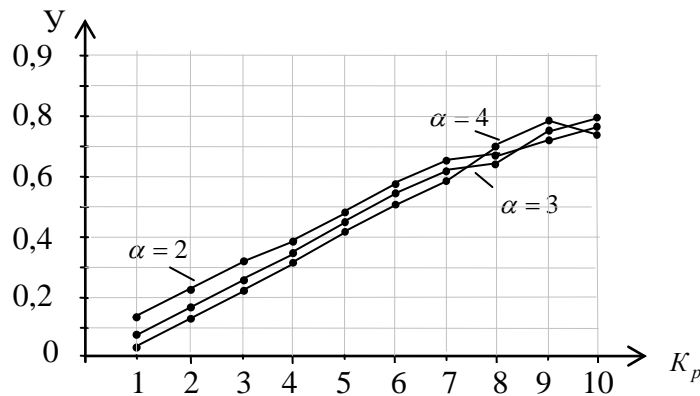


Рисунок 3. Графики выхода годных структур в зависимости от количества резервных элементов и увеличения коэффициента группирования дефектов при постоянном среднем числе дефектов ( $\lambda = 7$ )

Графические зависимости (рис.4) указывают на то, что значение выхода годных структур существенно увеличивается с уменьшением среднего числа дефектов при постоянном коэффициенте группирования дефектов.

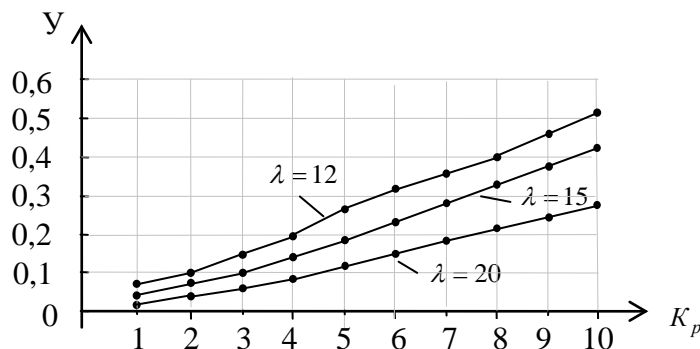


Рисунок 4. Графики выхода годных структур в зависимости от количества резервных элементов и увеличения среднего числа дефектов при постоянном коэффициенте группирования дефектов ( $\alpha = 2$ )

Таким образом, в данной работе предложены аппаратно-программные средства самовосстановления для обеспечения отказоустойчивости цифровых устройств на программируемых логических интегральных схемах. На основе анализа вычисленных значений надежностных характеристик аппаратурных, программных и аппаратурно-программных средств самовосстановления можно сделать вывод о том, что лучшими в обеспечении отказоустойчивости работы СБИС на ПЛИС являются аппаратурно-программные средства самовосстановления.

Приведена упрощенная структурная модель отказоустойчивой СБИС на ПЛИС с аппаратурно-программными средствами самовосстановления, моделирование которой на компьютере позволяет исследовать отказоустойчивость различных программируемых устройств и выбрать наиболее эффективную структуру устройства.

Вычислены значения выхода годных СБИС на ПЛИС (типа ПЛМ) с аппаратурно-программными средствами самовосстановления в зависимости от среднего числа дефектов, коэффициента группирования дефектов и числа резервных элементов.

Аналогично могут быть вычислены и проанализированы надежностные характеристики для программируемых цифровых устройств на ПЛИС других типов (програм-

мируемых пользователем вентиляных матриц, программируемых запоминающих устройств, программируемых матриц логики и сложных логических устройств).

#### Список литературы

1. Соловьев, В.В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / В.В. Соловьев // М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 636 с.
2. Виноградов, В.И. Микро - и наноэлектронные технологии компактных и масштабируемых компьютерных систем высокого быстродействия / В.И. Виноградов // Электроника инфо. – 2007. – № 9. – С. 44 – 46.
3. Согомоян, Е.С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е.С. Согомоян, Е.В. Слабаков // М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
4. Коротаев, Н.А. Обеспечение отказоустойчивости программируемых логических интегральных схем на основе самовосстановления / Н.А. Коротаев, В.И. Попечиц // Электроника инфо. – 2012. – № 1. – С. 99 – 102.
5. Коротаев, Н.А. Повышение отказоустойчивости программируемых логических интегральных схем на основе самовосстановления / Н.А. Коротаев, В.И. Попечиц // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации (РИНТИ-2012): Доклады 11-й Междунар. конф. / Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси. – Минск, 2012. – С. 142 – 157.
6. Ha, D.S. On the design of high – yield reconfigurable PLA's / D.S. Ha, Y.P. Kumar // IEEE Trans. Comput. – 1990 – Vol. ED – 39, № 4. – P. 470 – 479.

Questions of creation of failure-safe digital devices on programmed logic integrated schemes (PLIS) on the basis of equipment-program softwares of self-restoration are considered. The structural model of failure-safe SBIS on PLIS with equipment-program softwares of self-restoration intended for research of fault tolerance and a choice of the most effective structure is given. The assessment of value of an yield of suitable SBIS on PLIS with equipment-program softwares of self-restoration depending on average of defects, factor of grouping of defects and number of reserve elements is given.

*Коротаев Н.А.*, доцент факультета прикладной математики и информатики БГУ, к.ф.-м.н., доцент, Минск, Беларусь, e-mail: [korotaev@bsu.by](mailto:korotaev@bsu.by).

*Попечиц В.И.*, ученый секретарь НИУ "Институт прикладных физических проблем им.А.Н.Севченко" Белорусского государственного университета, д.ф.-м.н., доцент, Минск, Беларусь, e-mail: [papechyts@bsu.by](mailto:papechyts@bsu.by).