

Разработка системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования

Жукова Татьяна Дмитриевна

Содержание

- Актуальность
- Методы борьбы со случайными сбоями
- Система автоматизированного проектирования схем контроля
- Методы аппаратной реализации СФК
 - Метод на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга
 - Метод на основе спектрального R кода
 - Метод на основе низкоплотностного LDPC кода
 - Кластеризация выходов комбинационной схемы
- Характеристики анализа по выбору наилучшей СФК для комбинационной схемы
- Результаты численных экспериментов
- Выводы

Актуальность

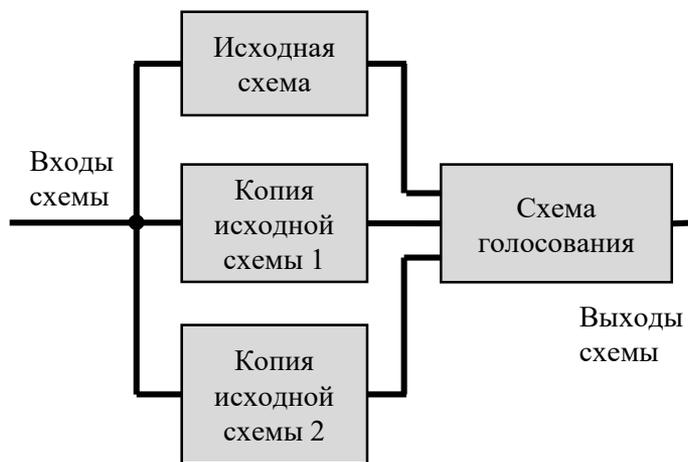
Развитие микроэлектронной промышленности сопровождается повышением сложности, а также снижением энергопотребления и повышением скорости работы разрабатываемых устройств, что в свою очередь влечет снижение надежности и сбоеустойчивости субмикронных интегральных схем. Данные факторы приводят к тому, что на сегодняшний момент в мире складывается ситуация, при которой сбоеустойчивость в микроэлектронике стала **одним из основных и важнейших условий** определения работоспособности проектируемой аппаратуры.

Снижение данных характеристик происходит за счет повышения вероятности возникновения в разрабатываемой аппаратуре кратковременных обратимых сбоев вследствие воздействия на нее у различных дестабилизирующих эффектов таких, как температура, радиационное излучение и т.д., что приводит к изменению состояния элементов памяти или инвертированию сигнала в комбинационных блоках, входящих в состав аппаратуры.

Методы борьбы со случайными сбоями на логическом уровне

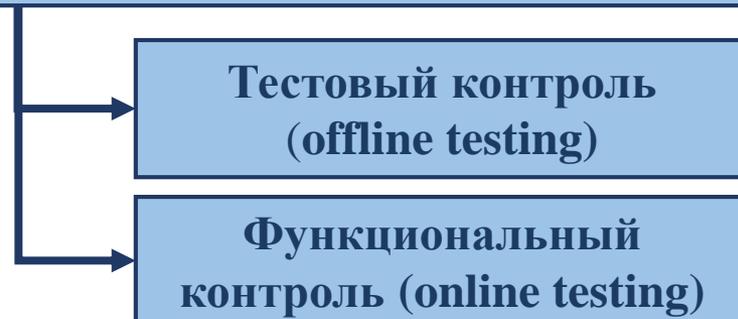
Методы N-кратного резервирования

- Метод тройного модульного резервирования (TMR, Triple Modular Redundancy)
- Метод дублирования
- и т.д.



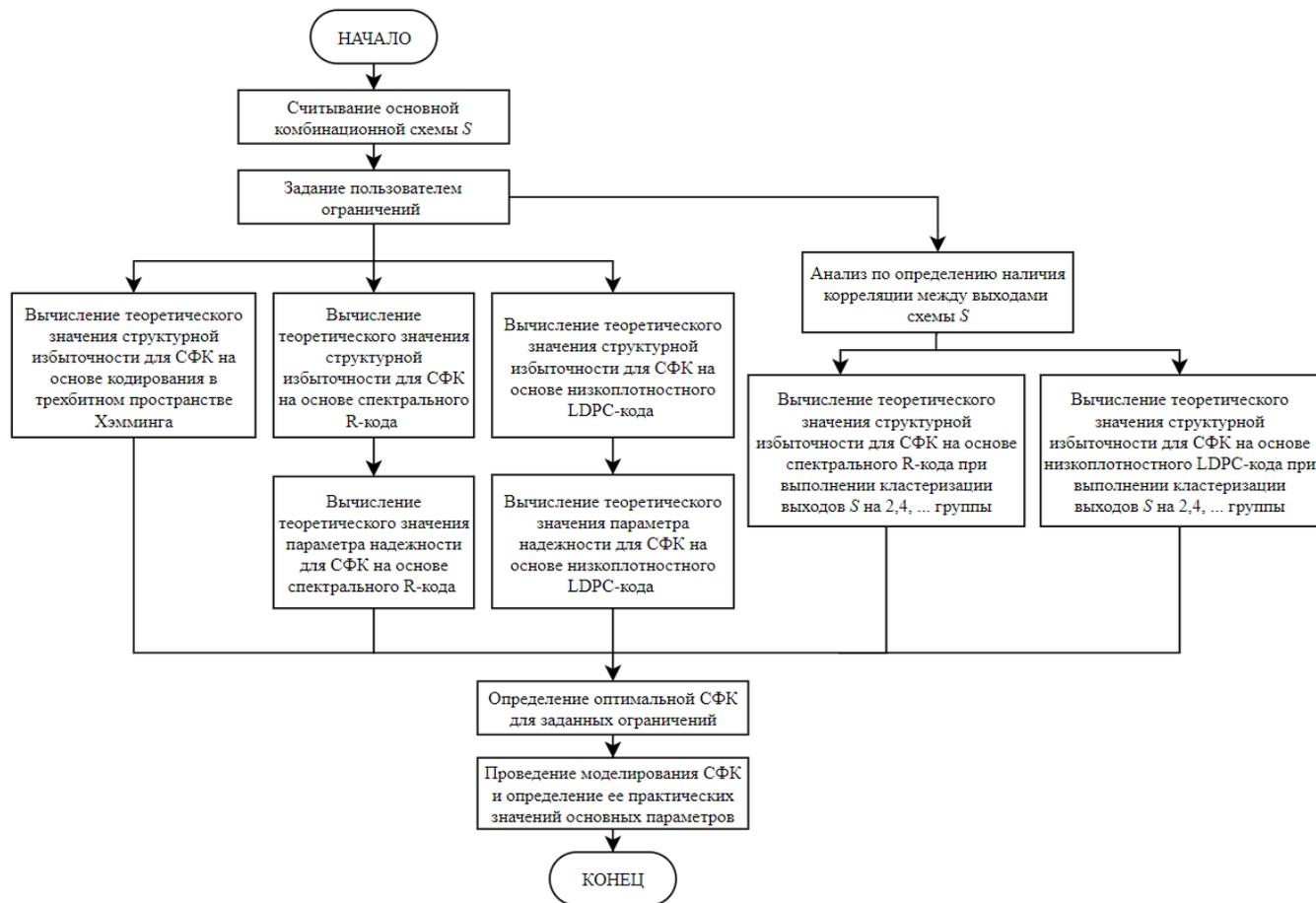
Структура схемы, кодированной методом тройного модульного резервирования

Методы на основе средств контроля



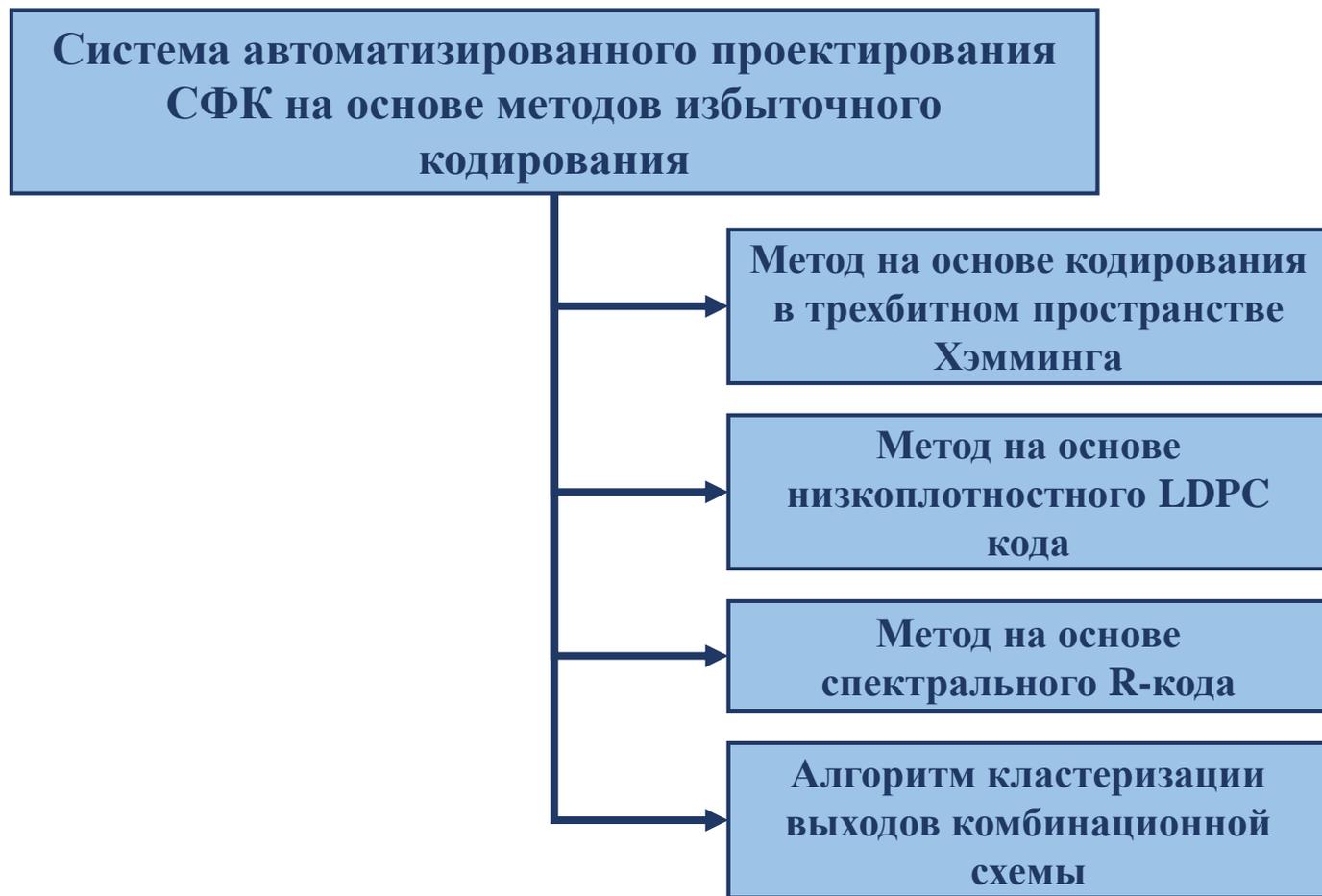
В рамках комбинационных схем реализация функционального контроля производится с помощью добавления дополнительной подсхемы, способной сигнализировать о наличии ошибки, а также в некоторых случаях произвести её исправление.

Система автоматизированного проектирования схем контроля

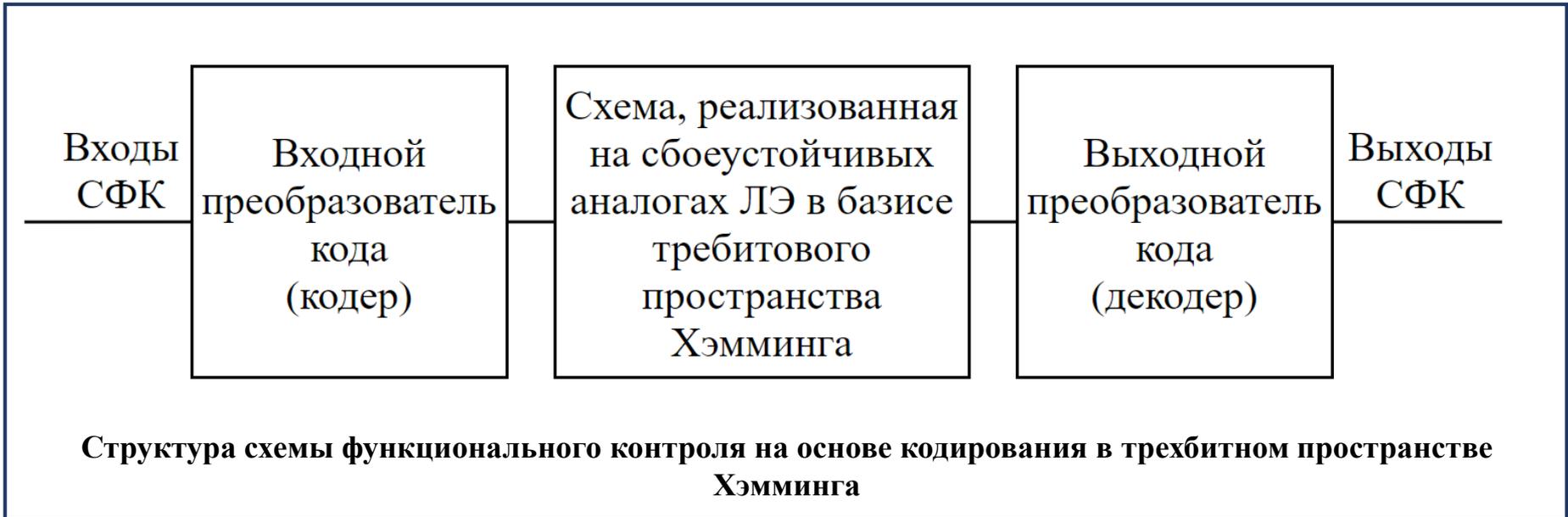


Блок-схема разработанной системы автоматизированного проектирования СФК на основе методов избыточного кодирования

Методы аппаратной реализации СФК



СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга

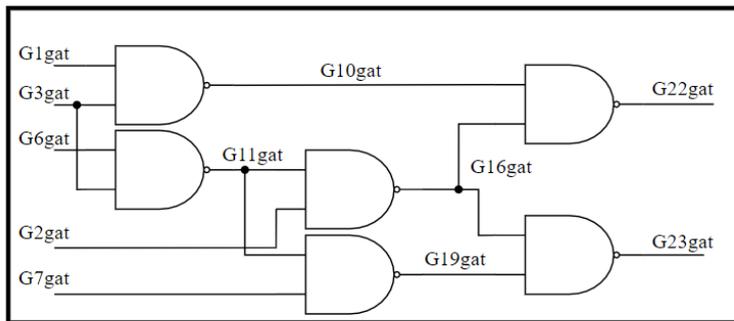


Данная схема контроля основана на реализации булевой алгебры в n битном пространстве Хэмминга, позволяющей выполнить исправление или обнаружение ошибок на расстоянии в один бит.

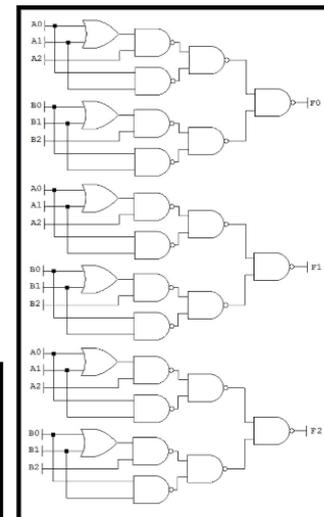
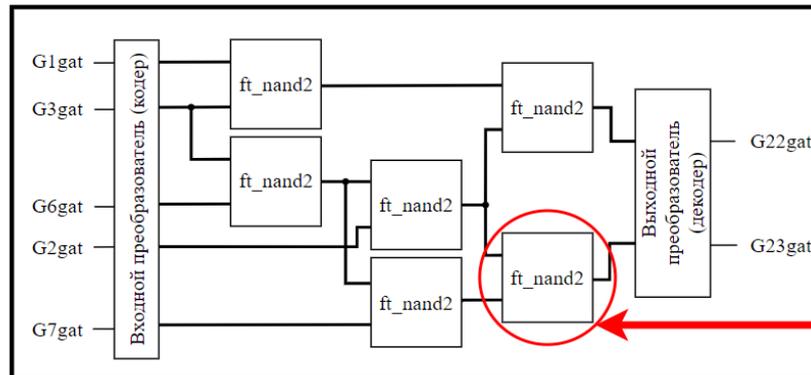
Такая реализация СФК позволяет каждому сбоеустойчивому аналогу ЛЭ выполнить исправление ошибки, возникшей на предыдущем элементе

СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга

Комбинационная схема



СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга



Сбоеустойчивый аналог ЛЭ NAND2 в трехбитном пространстве Хэмминга

Процесс получения СФК для комбинационной схемы с17 из тестового набора ISCAS'85 путем замены ЛЭ на их сбоеустойчивые аналоги в базисе трехбитного пространства Хэмминга

СФК на основе спектрального R-кода



Данная СФК способна выполнить исправление однократной, а также обнаружение двукратной ошибки

Спектральный R-код - блочный систематический код с проверкой на четность.

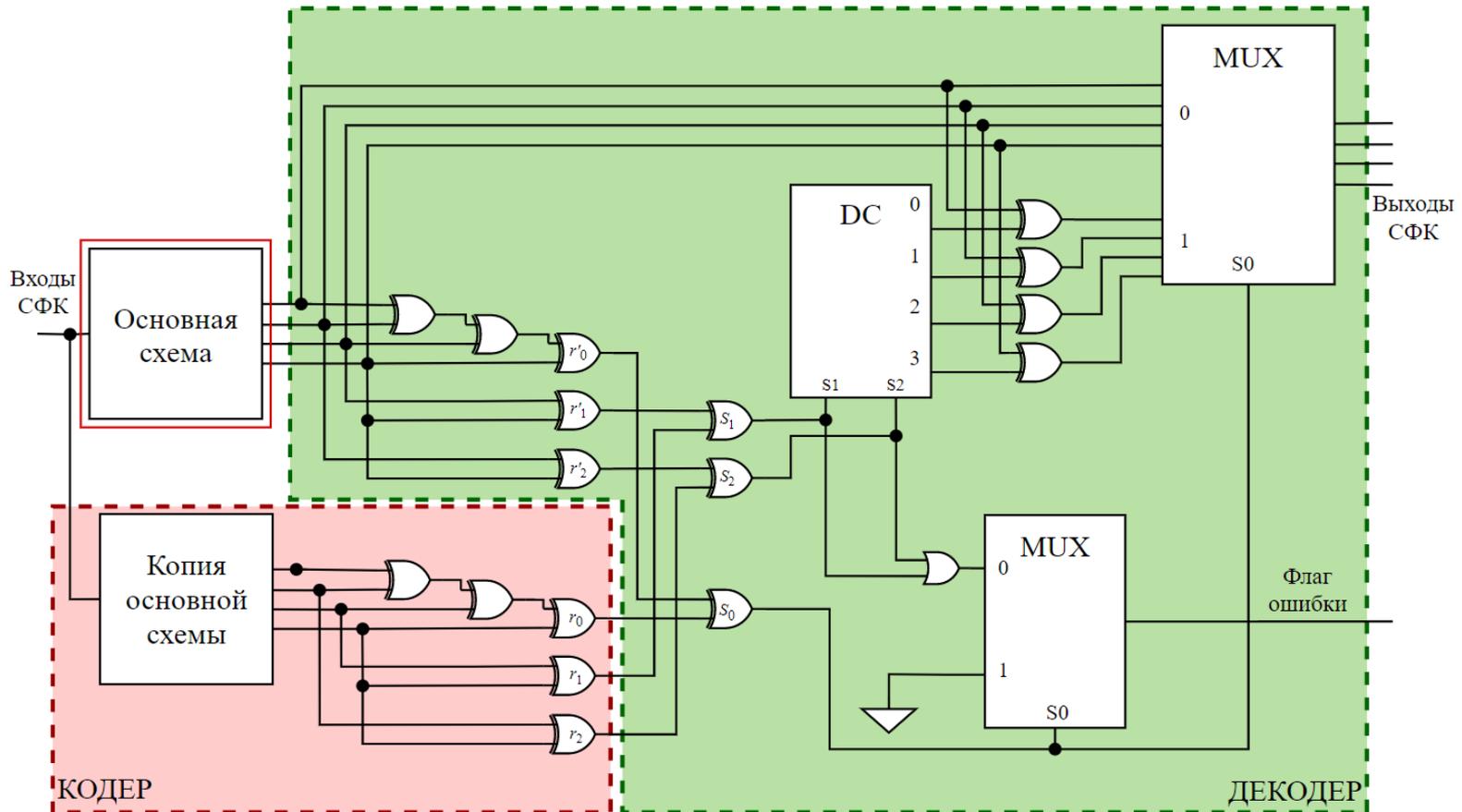
Число проверочных разрядов для кода составляет

$$m = \lceil \log k \rceil + 1.$$

Порождающей матрицей данного кода является единичная матрица k -го порядка с присоединённой $G_{RM}(k, 1)$ кода Рида-Маллера первого порядка длины 2^k .

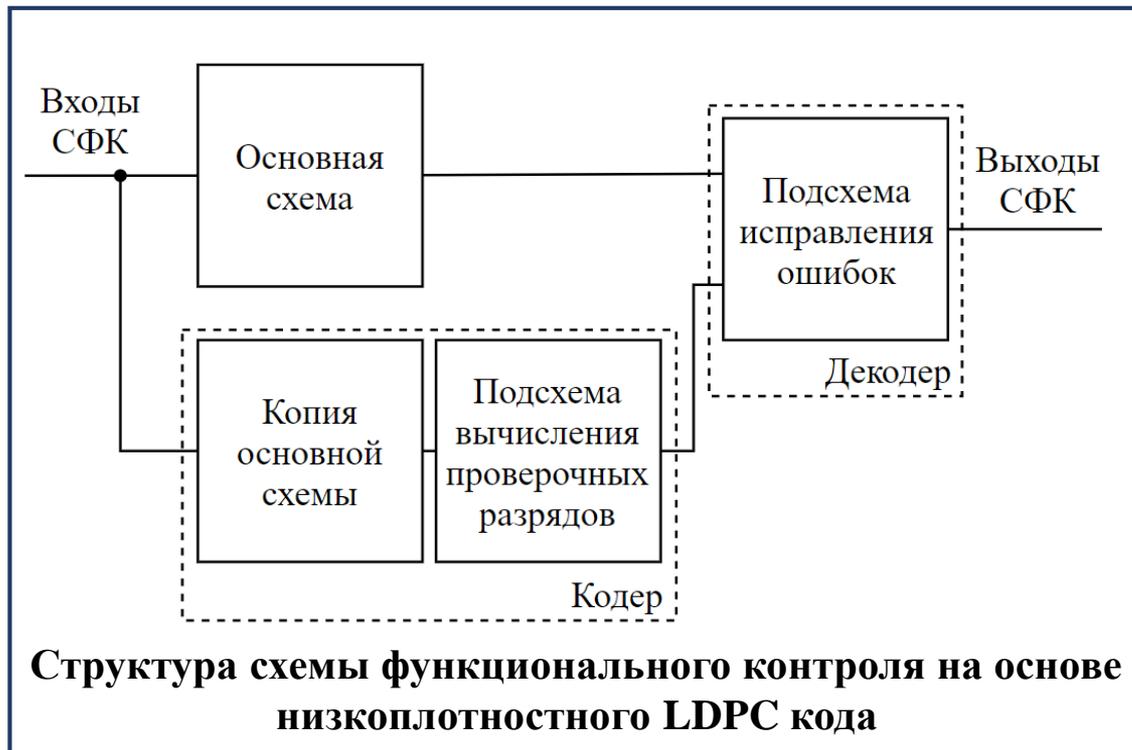
Значения порождающей матрицы можно получить линейным преобразованием аргумента и значений дискретных функций Радемахера.

СФК на основе спектрального R-кода



Структура схемы функционального контроля на основе спектрального R-кода на примере комбинационной схемы с 4 выходами

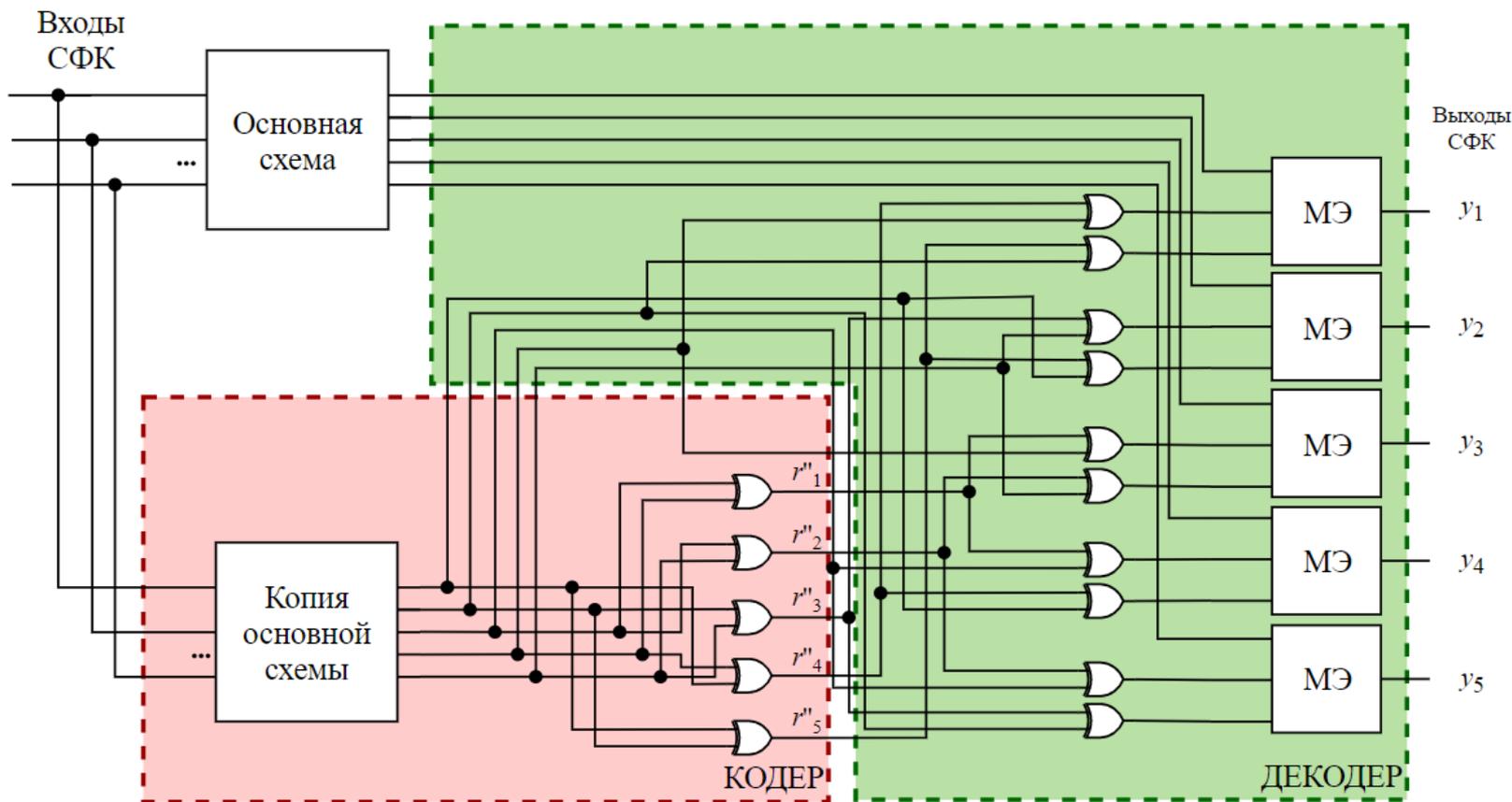
СФК на основе низкоплотного LDPC кода



Данная СФК способна выполнить исправление однократной ошибки

Низкоплотный код (LDPC, low-density parity check code) – частный случай блочного линейного (n, k) -кода с проверкой на четность, в котором проверочная матрица $H_{m \times n}$ является сильно разреженной. В качестве метода декодирования был использован **метод мажоритарного декодирования** за счет легкости и простоты его выполнения. Его идея заключается в составлении для каждого информационного разряда системы проверки, выполняющей сравнение полученных значений по методу большинства с помощью мажоритарных элементов.

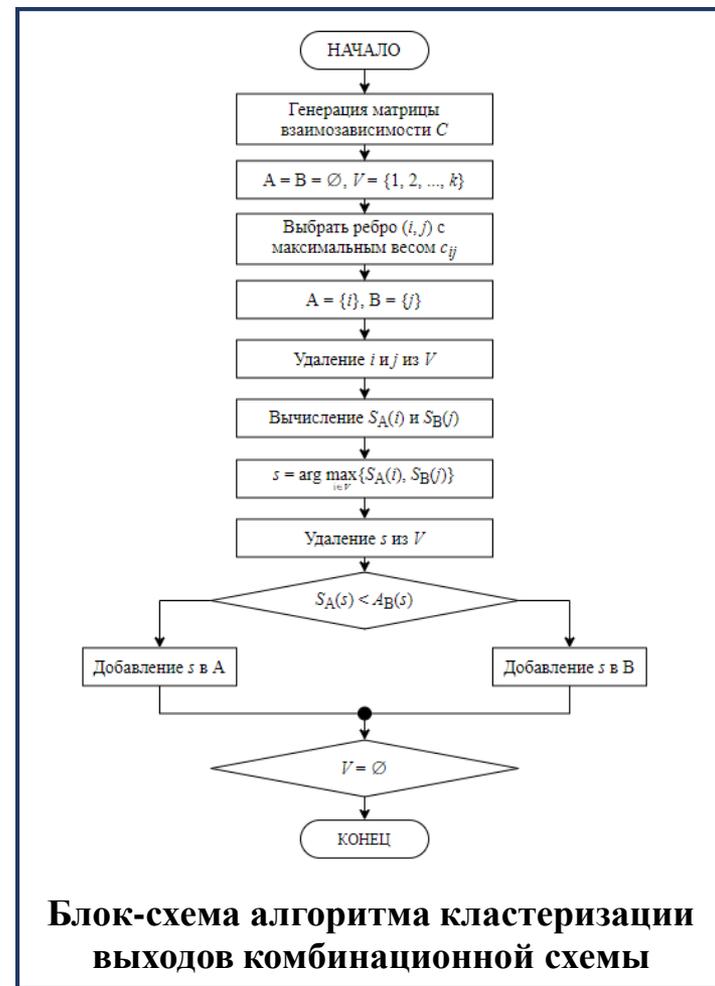
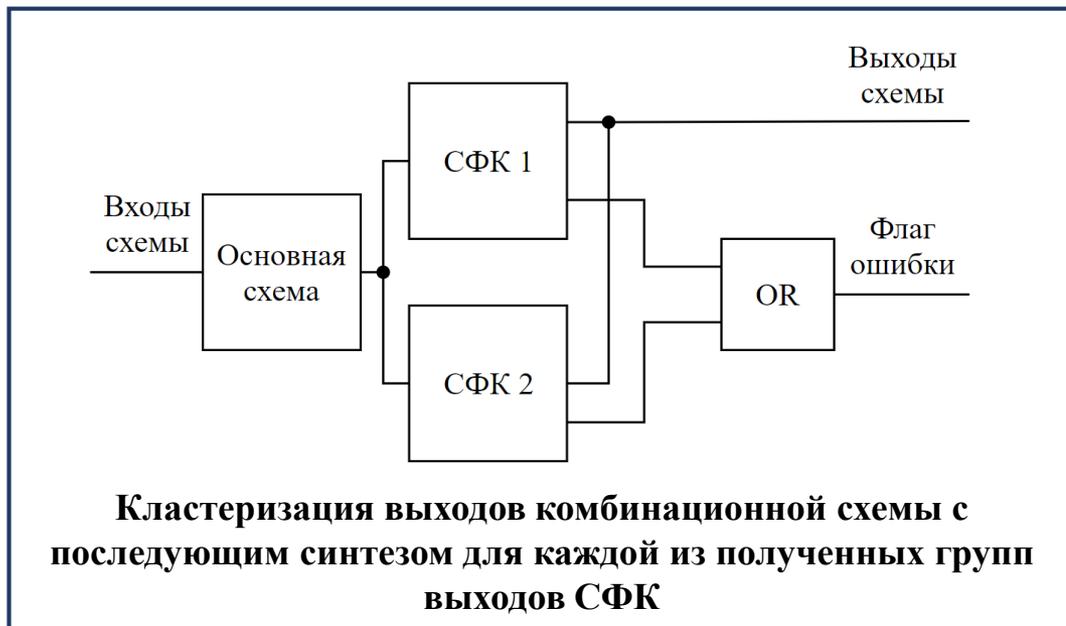
СФК на основе низкоплотного LDPC кода



Структура схемы функционального контроля на основе низкоплотного LDPC кода на примере комбинационной схемы с 5 выходами

Алгоритм кластеризация выходов комбинационной схемы

Для уменьшения вероятности возникновения многократных ошибок в системе автоматизированного проектирования используется алгоритм разбиения выходов основной комбинационной схемы с последующим синтезом СФК для каждой из полученных групп. Применение данного подхода позволяет значительно повысить вероятность обнаружения/исправления ошибок кодами SEC/DED, но при этом приводит к дополнительным структурным затратам.



Характеристики анализа по выбору наилучшей СФК для комбинационной схемы

Система автоматизированного проектирования за счет вводимых пользователем ограничений проводит анализ для определения наилучшей для рассматриваемого логического устройства СФК.

Для вычисления теоретического значения структурной избыточности для каждого из методов синтеза схем контроля, входящих в состав разработанной системы, были выведены аналитические формулы, которые позволили получить предварительные значения структурной избыточности схемы без ее реального синтеза.

Для оценки вероятности пропуска ошибки была выведена формула, позволяющая выполнить предварительный расчет для метода синтеза СФК на основе спектрального R-кода:

$$P = \sum_{i=3,5,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i + \sum_{i=4,6,\dots}^{rate_{max}} \beta p_i f_i + \frac{k}{M_{СФК} - M_K} + \left(1 - \frac{2^{2k+1} - 1}{2^{3k+1} - 1} \right) \left(\frac{3k + 1}{M_{СФК} - M_K} \right)$$

где $rate_{max}$ – максимальная кратность ошибки, которая может возникнуть в ОС,

$\beta = \frac{M}{M_{СФК} - M_K}$ – вероятность того, что однократная ошибка попадет в ОС, входящую в СФК,

p_i – вероятность возникновения в ОС ошибки i кратности,

f_i – вероятность возникновения $flag = 0$ при возникновении четной ошибки,

k – число информационных разрядов (выходов ОС),

$M_{СФК}$ и M_K – число элементов схемы контроля и защитного конуса соответственно.

Оценка эффективности разработанной системы автоматизированного проектирования



Выводы по результатам проведенного сравнительного анализа:

- Наибольшую структурную избыточность вносит метод синтеза СФК на основе кодирования в трехбитном пространстве Хэмминга. Полученные результаты структурной избыточности подтвердил тот факт, что применение данного метода на всю комбинационную схему не является рациональным решением.
- Наименьшей структурной избыточностью из рассматриваемых методов обладает СФК на основе низкоплотностного LDPC кода.
- Проведение минимизации кодера и декодера в схеме контроля на основе спектрального R-кода с помощью программы Yosys позволяет снизить структурную избыточность схем в среднем на 34%.
- СФК на основе спектрального кода с минимизацией и LDPC кодов позволяют получить сбоеустойчивые комбинационные схемы с меньшей структурной избыточностью, чем при использовании метода TMR.

Результаты сравнительного анализа полученной формулы расчета пропуска ошибки с экспериментальным значением СФК на основе спектрального R-кода для схем из тестовых наборов ISCAS'85 и LGSynth'89

Benchmark	Число выходов	Число элементов	Предполагаемая вероятность пропуска	Экспериментальная вероятность пропуска
ISCAS'85				
c1355	32	590	13,46	11,17
c17	2	6	32,22	33,02
c1908	25	1057	8,76	8,05
c3540	22	1983	5,67	7,78
c432	7	216	6,63	7,05
c499	32	246	14,12	12,75
c880	26	435	9,28	8,75
LGSynth'89				
apex7_synth	37	227	15,15	13,53
b1_synth	4	13	25,88	23,83
bw	28	195	15,01	13,91
f51m_synth	8	111	11,43	12,15
misex2	18	134	14,88	14,86
vg2	8	215	7,27	6,92
rd53	3	64	14,17	12,81

Выводы

Была разработана система автоматизированного проектирования, позволяющая по вводимым пользователем ограничениям на структурную избыточность и характеристики надежности провести выбор наилучшей СФК для конкретной комбинационной схемы.

- По мере необходимости система позволяет проводить предварительную кластеризацию выходов комбинационного устройства для снижения вероятности возникновения многократных ошибок в схеме функционального контроля.
- Проведенные эксперименты по оценке эффективности разработанной системы показали, что каждый из методов синтеза СФК, входящий в основу разработанной системы, обладает своим рядом достоинств и недостатков. При этом система позволяет точно вычислить значение структурной избыточности получаемых схем, а также оценить вероятность пропуска ошибки.
- Для оценки погрешности приближенного вычисления вероятности пропуска ошибки для СФК на основе спектрального R-кода был проведен ряд численных экспериментов, которые показали, что теоретическое значение отличается от моделирования не более чем на 1,5 процента. Погрешность теоретического значения можно объяснить тем, что в формуле использовались усредненные вероятности возникновения ошибки кратности i .

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**