Алгоритмы разбиения логических схем для оптимизации решения задач проверки эквивалентности и функциональной коррекции схем

Г.В. Антюфеев[1], В.В. Жуков[1], Е.Ю. Зенин[2], М.С. Шуплецов[1]

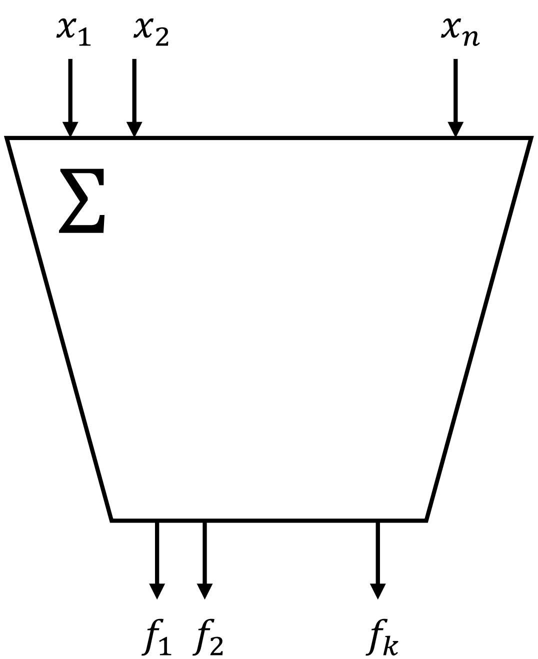
[1]МГУ им. М.В. Ломоносова, ф-т ВМК

[2]ИНЕУМ им. И.С. Брука

План доклада

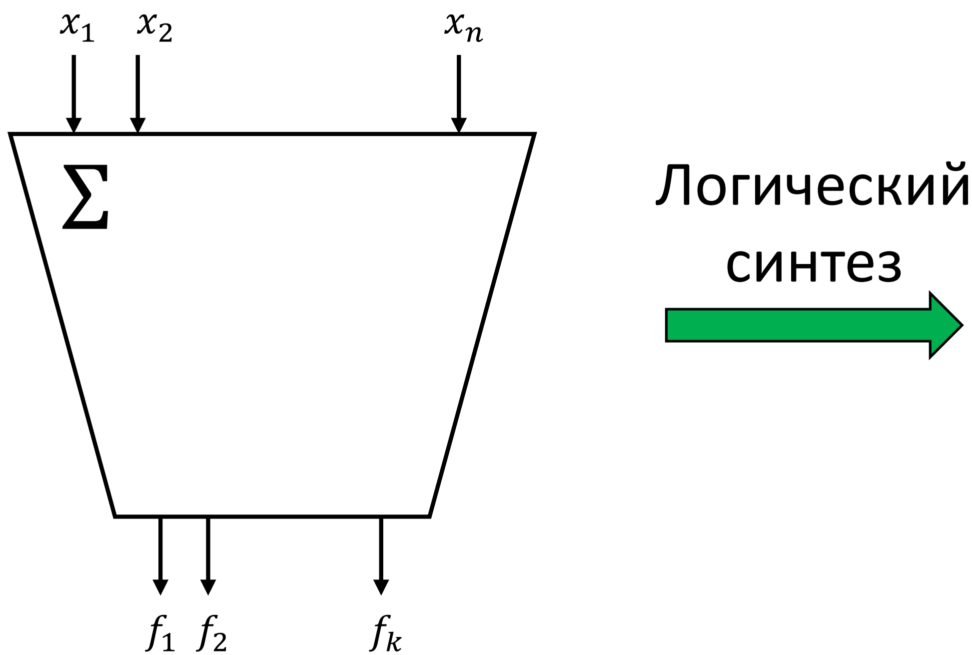
- Задача проверки эквивалентности и функциональной коррекции для схем из функциональных элементов (СФЭ)
- Формальная постановка задачи разбиения СФЭ
- Примеры вставки разрезов
- Соревнование «2015 CAD Contest at ICCAD»
- Схема решения, предоставленного на «2015 CAD Contest at ICCAD»
- Алгоритмы локального разбиения СФЭ
- Верификация решения, предоставленного на «2015 CAD Contest at ICCAD»
- Основные результаты

Задача проверки эквивалентности СФЭ



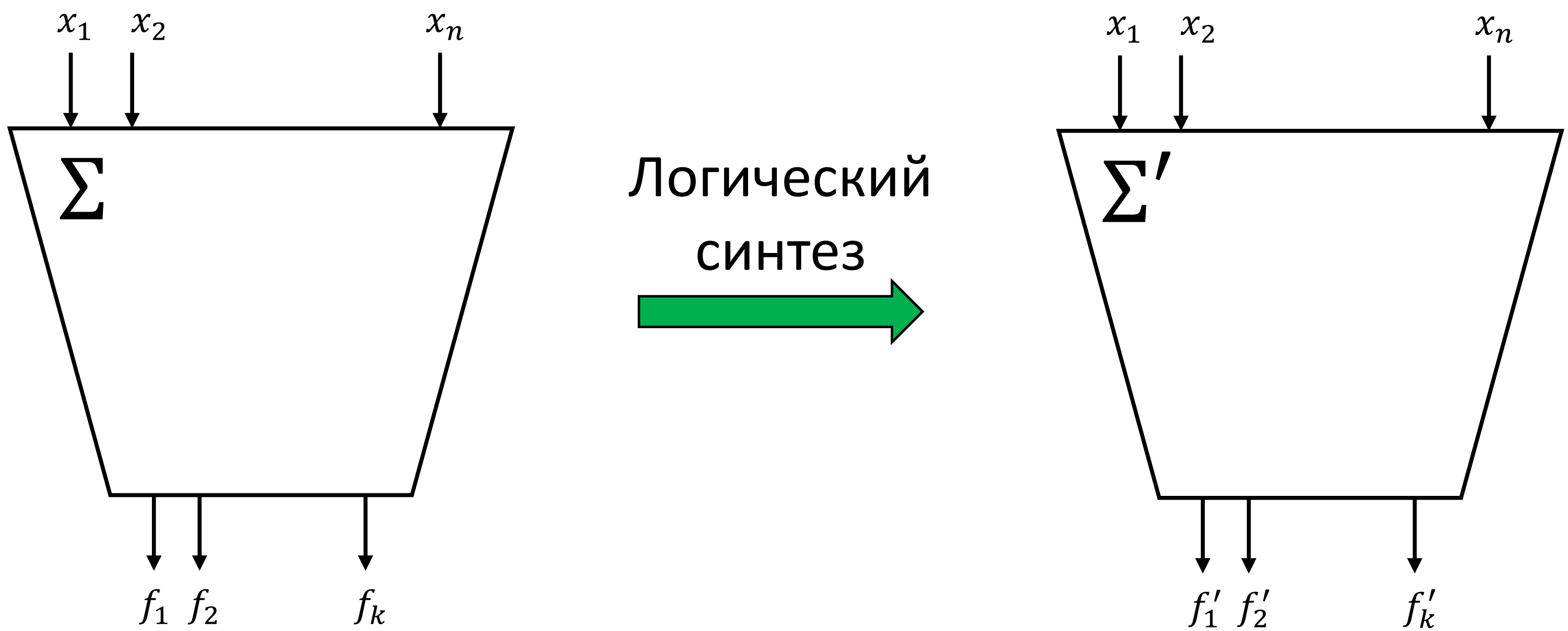
Σ – СФЭ, реализующая систему функций алгебры логики $\{f_1, \dots, f_k\}$ от переменных $x_1, \dots, x_n$.

Задача проверки эквивалентности СФЭ



Σ – СФЭ, реализующая систему функций алгебры логики $\{f_1, \dots, f_k\}$ от переменных $x_1, \dots, x_n$.

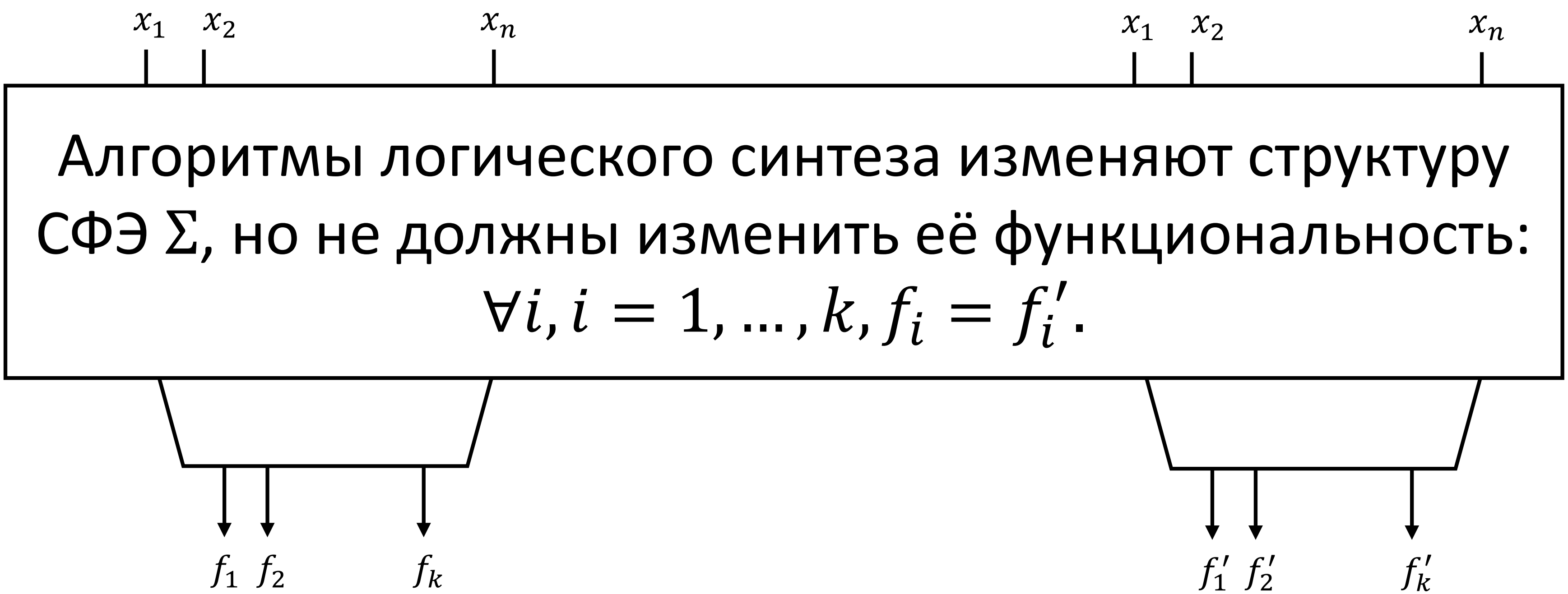
Задача проверки эквивалентности СФЭ



Σ − СФЭ, реализующая систему функций алгебры логики $\{f_1, \dots, f_k\}$ от переменных $x_1, \dots, x_n$.

Σ' − СФЭ, получающаяся в результате применения алгоритмов логического синтеза и реализующая систему $\{f'_1, \dots, f'_k\}$.

Задача проверки эквивалентности СФЭ



Алгоритмы логического синтеза изменяют структуру СФЭ Σ, но не должны изменить её функциональность: $\forall i, i = 1, \dots, k, f_i = f_i'$.

Σ – СФЭ, реализующая систему функций алгебры логики $\{f_1, \dots, f_k\}$ от переменных $x_1, \dots, x_n$.

Σ' – СФЭ, получающаяся в результате применения алгоритмов логического синтеза и реализующая систему $\{f_1', \dots, f_k'\}$.

Задача проверки эквивалентности СФЭ

x_1 x_2 x_n x_1 x_2 x_n

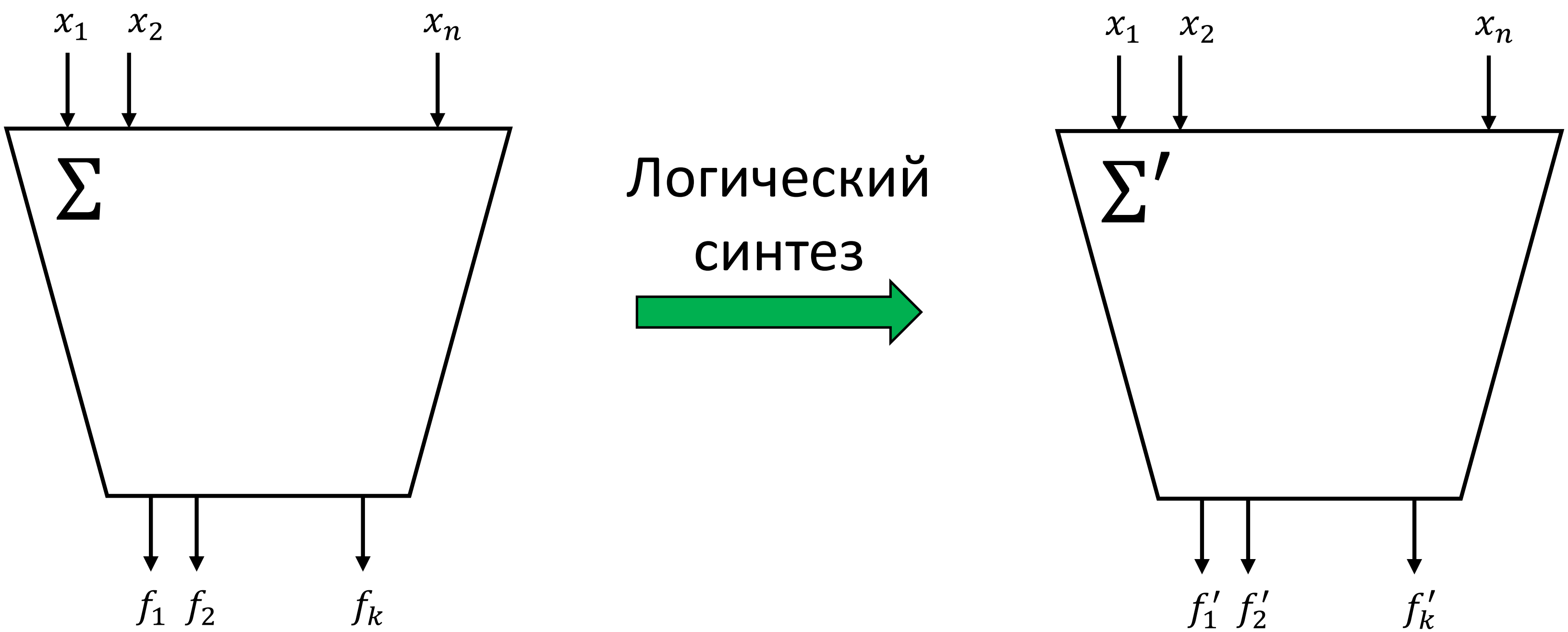
Алгоритмы логического синтеза изменяют структуру СФЭ Σ, но не должны изменить её функциональность:
$\forall i, i = 1, \dots, k, f_i = f_i'$.

Задача проверки эквивалентности для СФЭ Σ и Σ' заключается в том, чтобы установить, что
$\forall i, i = 1, \dots, k, f_i = f_i'$.

от переменных $x_1, \dots, x_n$.

синтеза и реализующая систему $\{f_1', \dots, f_k'\}$.

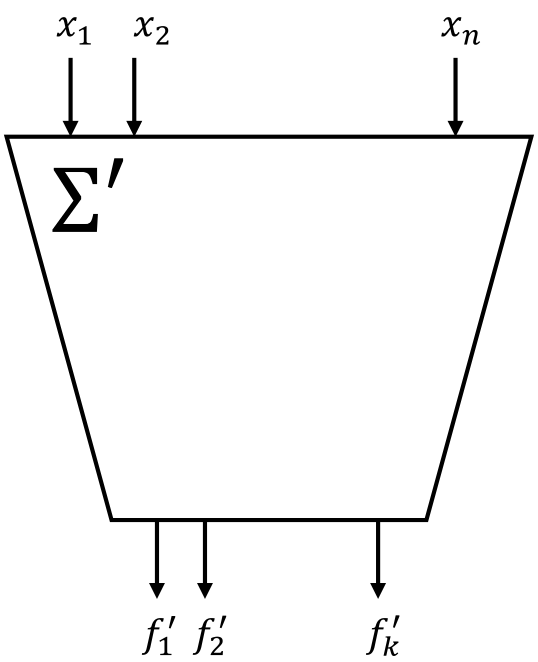
Задача функциональной коррекции СФЭ



Σ – СФЭ, реализующая систему функций алгебры логики $\{f_1, \dots, f_k\}$ от переменных $x_1, \dots, x_n$.

Σ' – СФЭ, получающаяся в результате применения алгоритмов логического синтеза и реализующая систему $\{f_1', \dots, f_k'\}$.

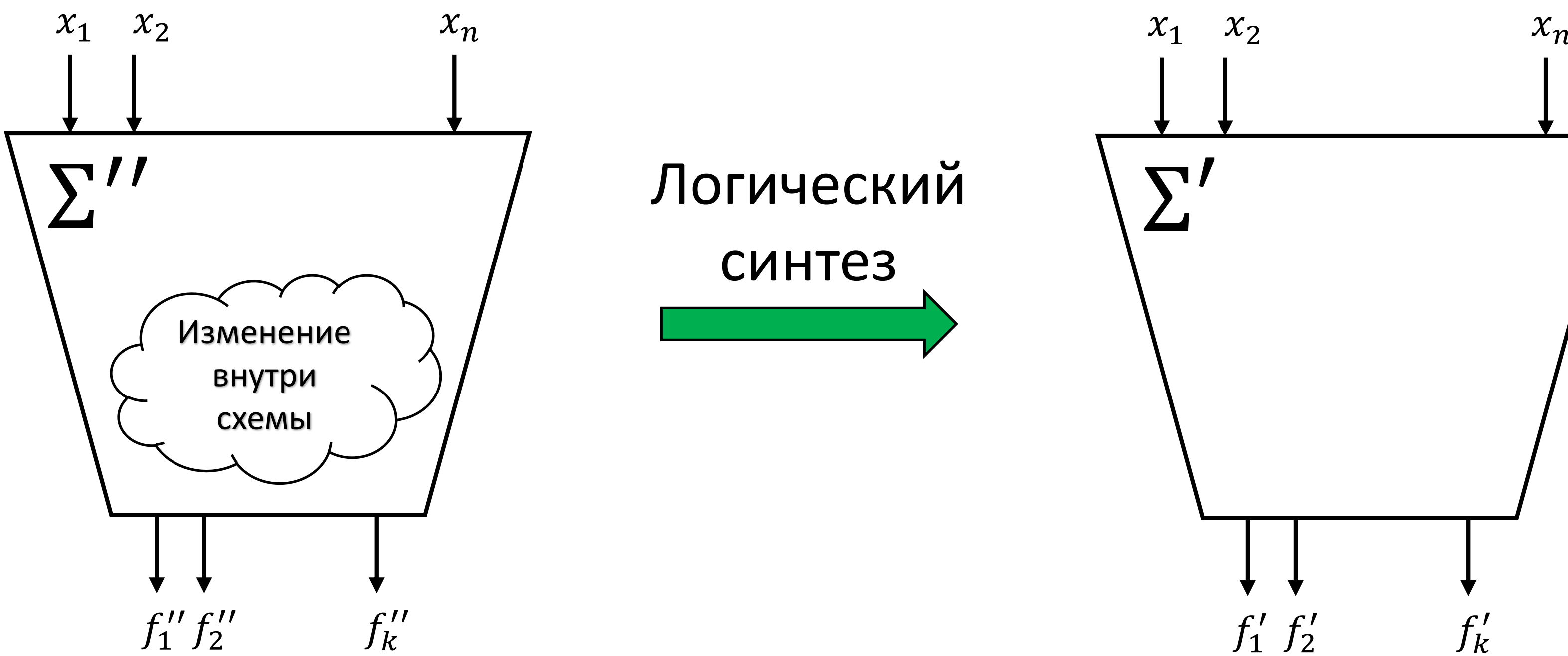
Задача функциональной коррекции СФЭ



Σ'' – СФЭ, полученная в результате изменения спецификации в СФЭ Σ и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$

Σ' – СФЭ, получающаяся в результате применения алгоритмов логического синтеза и реализующая систему $\{f_1', \dots, f_k'\}$.

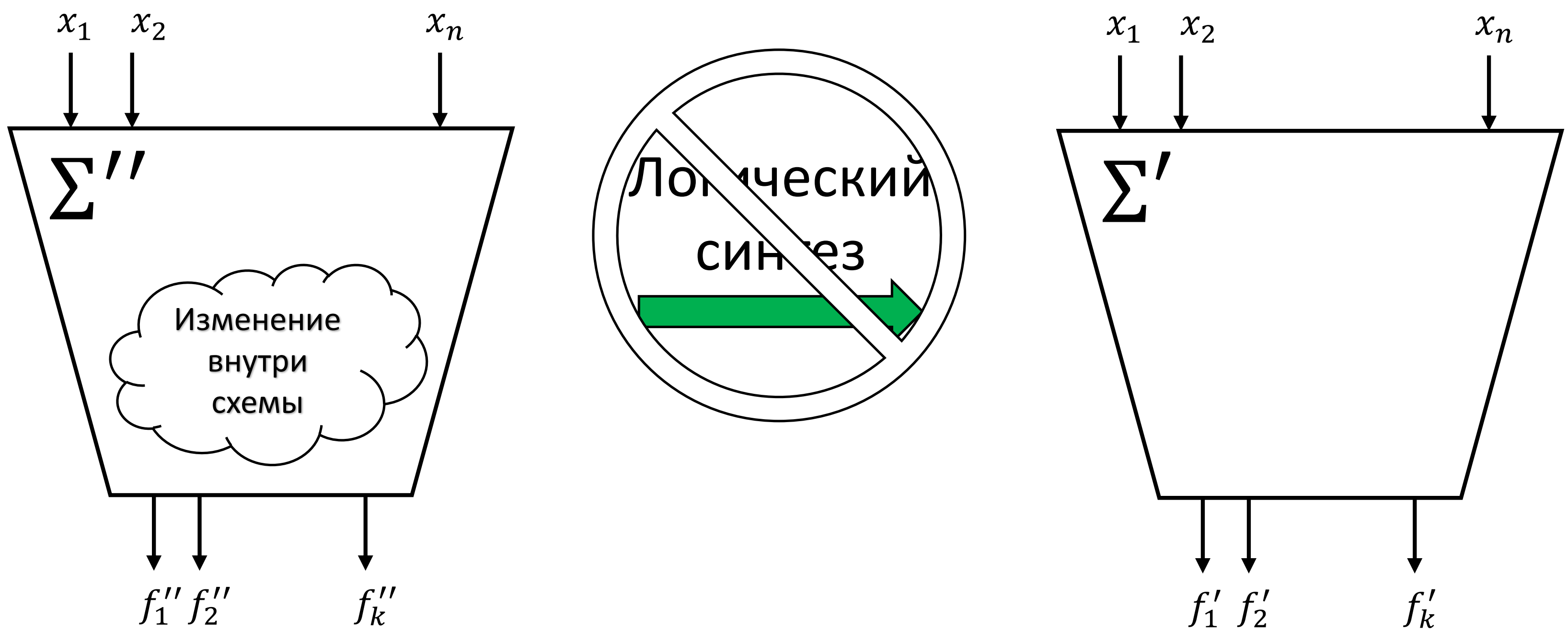
Задача функциональной коррекции СФЭ



Σ'' – СФЭ, полученная в результате изменения спецификации в СФЭ Σ и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$

Σ' – СФЭ, получающаяся в результате применения алгоритмов логического синтеза и реализующая систему $\{f_1', \dots, f_k'\}$.

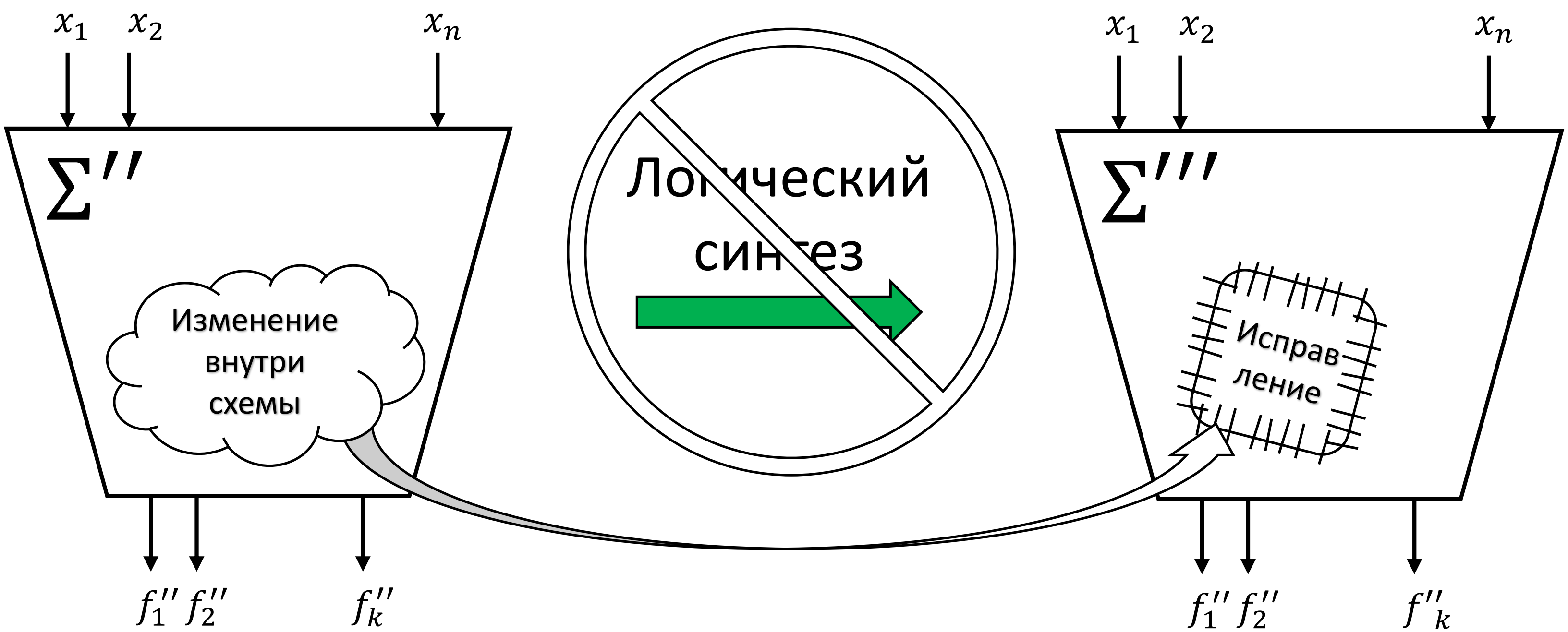
Задача функциональной коррекции СФЭ



Σ'' – СФЭ, полученная в результате изменения спецификации в СФЭ Σ и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$

Σ' – СФЭ, получающаяся в результате применения алгоритмов логического синтеза и реализующая систему $\{f_1', \dots, f_k'\}$.

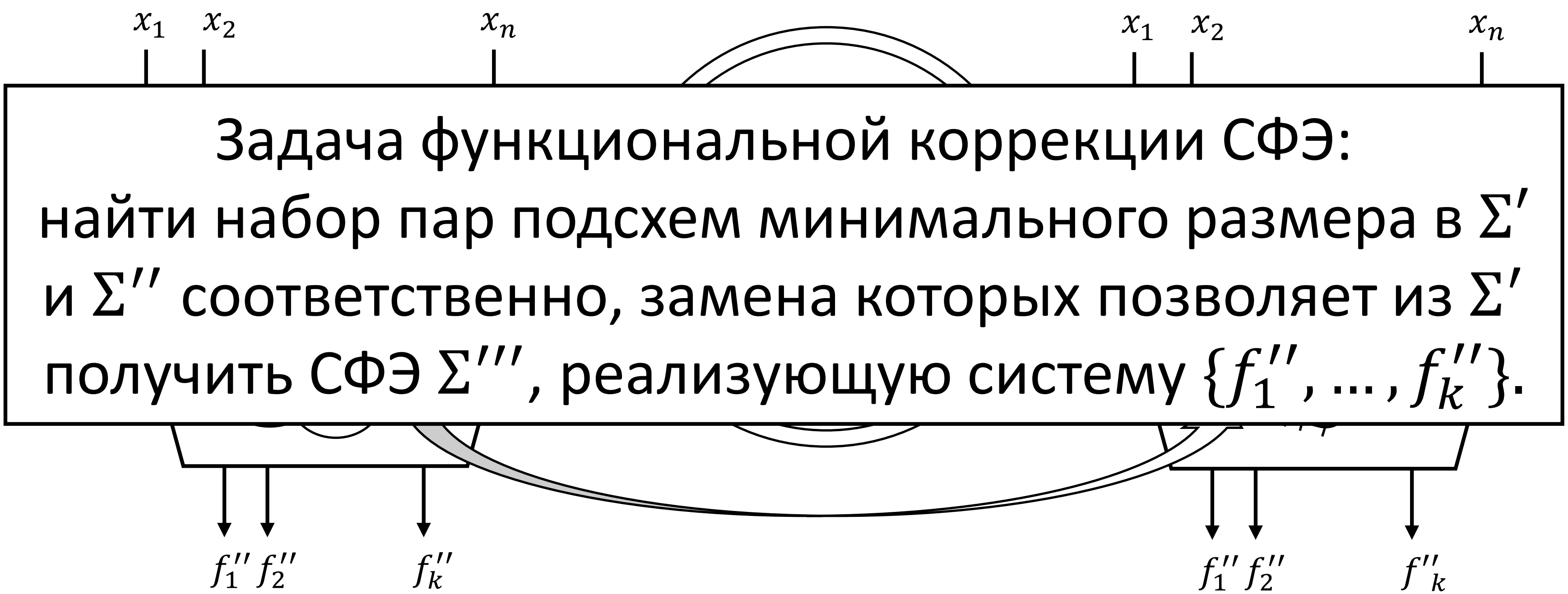
Задача функциональной коррекции СФЭ



Σ''
– СФЭ, полученная в результате изменения спецификации в СФЭ Σ и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$

Σ'''
– СФЭ, получающаяся из СФЭ Σ' в результате локальных замен подсхем
и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$.

Задача функциональной коррекции СФЭ



Задача функциональной коррекции СФЭ:
найти набор пар подсхем минимального размера в Σ' и Σ'' соответственно, замена которых позволяет из Σ' получить СФЭ Σ''', реализующую систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$.

Σ'' – СФЭ, полученная в результате изменения спецификации в СФЭ Σ и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$

Σ''' – СФЭ, получающаяся из СФЭ Σ' в результате локальных замен подсхем и реализующая систему $\{f_1'', \dots, f_k''\}$.

Формальная постановка задачи разбиения СФЭ

Пусть заданы множества функций алгебры логики (ФАЛ):

$$K = \{(x_1 \,\&\dots\; \& \,x_n)^\sigma \mid \sigma \in \{0,1\}, n \geq 2\},$$
$$D = \{(x_1 \vee\; \dots \vee x_n)^\sigma \mid \sigma \in \{0,1\}, n \geq 2\},$$
$$L = \{(x_1 \oplus\; \dots\; \oplus x_n)^\sigma \mid \sigma \in \{0,1\}, n \geq 2\}.$$

Рассматриваются СФЭ Σ_1 и Σ_2 в базисе $B^* = \{x, \overline{x}\} \cup K \cup D \cup L$.

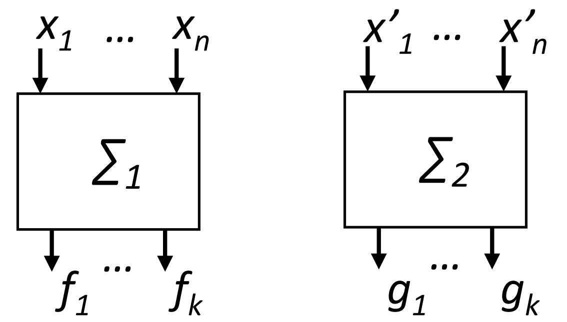
Пусть $X_i, i = 1, 2,$ – множество входов СФЭ Σ_i, а $Y_i, i = 1, 2,$ – множество выходов СФЭ Σ_i. Считается, что $|X_1| = |X_2|, |Y_1| = |Y_2|$. При этом каждому входу Σ_1 взаимно-однозначно сопоставлен вход Σ_2, каждому выходу Σ_1 взаимно-однозначно сопоставлен выход Σ_2.

Формальная постановка задачи разбиения СФЭ

Подмножества сопоставленных друг другу входов схем Σ_1 и Σ_2 с учетом их поляризации будем называть ***множествами отождествления (МО)*.**

Произвольное подмножество вершин СФЭ Σ_1 и Σ_2, отличных от входов, будем называть ***множеством сравнения (МС).***

МС будем считать ***эквивалентным****,* если оно содержит не менее двух вершин и ФАЛ, реализуемые в вершинах этого множества попарно равны (с учетом существующего сопоставления входов схем). Считается, что изначально заданы k МС, которые содержат соответствующие выходы СФЭ Σ_1 и Σ_2.



МО: (x_1, x'_1)

…

(x_n, x'_n)

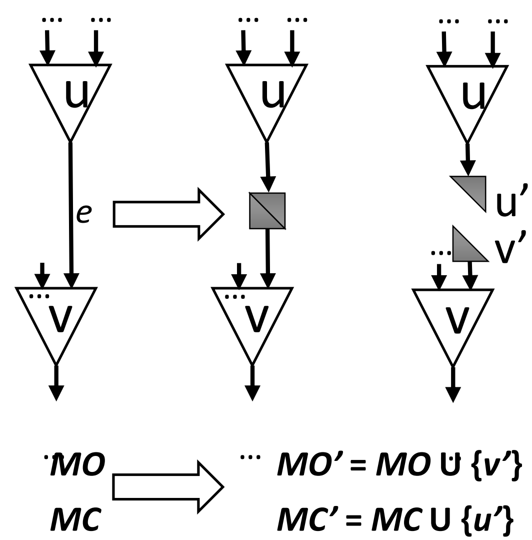
МС: (f_1, g_1)

…

(f_k, g_k)

Формальная постановка задачи разбиения СФЭ

Разрезом ориентированного ребра $e = (u, v)$ будем называть пару вершин (u', v'), порождаемую в результате удаления ребра e и добавления ребер (u, u') и (v, v'). Новая выходная вершина u' реализует ту же ФАЛ, что и вершина u, а новой входной вершине v' приписана новая входная переменная.



Если же в u' реализуется отрицание ФАЛ, реализуемой в u, и вершине v' приписано отрицание новой входной переменной, в этом случае разрез будем называть ***инверсным***.

Отметим, что ребра, введённые после разреза некоторого ребра, также могут содержать разрезы.

Множество всех МС полученных для СФЭ Σ_1 и Σ_2 и будем называть их ***разрезающим множеством (РМ).***

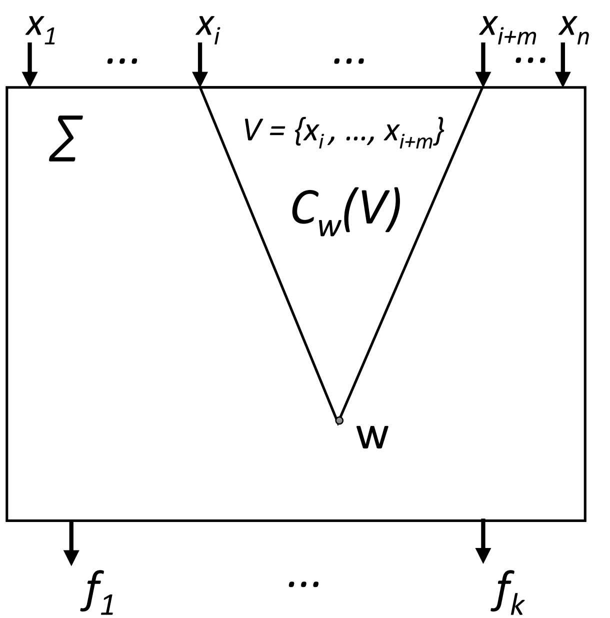
Формальная постановка задачи разбиения СФЭ

Вершина $\boldsymbol{w}$ достижима из вершины $\boldsymbol{u}$, если существует ориентированный (u, w)-путь.

Пусть $\boldsymbol{V}$ – множество всех входов схемы, из которых достижима вершина w.

Максимальный конус $\boldsymbol{C_w(V)}$ вершины $\boldsymbol{w}$ – множество вершин, лежащих на ориентированных путях, соединяющих вершины множества V с вершиной w (за исключением вершин множества V). $|C_w(V)|$ ***- вес конуса***.

Максимальным деревом для вершины $\boldsymbol{w}$ будем называть максимальный конус, все вершины которого имеют исходящую степень, равную 1.



Формальная постановка задачи разбиения СФЭ

Эквивалентное РМ – РМ, которое содержит только эквивалентные МС.

Вес эквивалентного РМ задается упорядоченным по убыванию вектором весов максимальных конусов, порожденных вершинами всех входящих в него МС.

Если РМ не является эквивалентным, то его вес задается суммой весов максимальных конусов, порожденных всеми вершинами, входящими в неэквивалентные МС (при этом, веса максимальных конусов вершин, которые попали в эквивалентные МС, не учитываются).

Если РМ содержит только эквивалентные МС, то такое множество всегда оценивается выше любого РМ, содержащего хотя бы одно неэквивалентное МС.

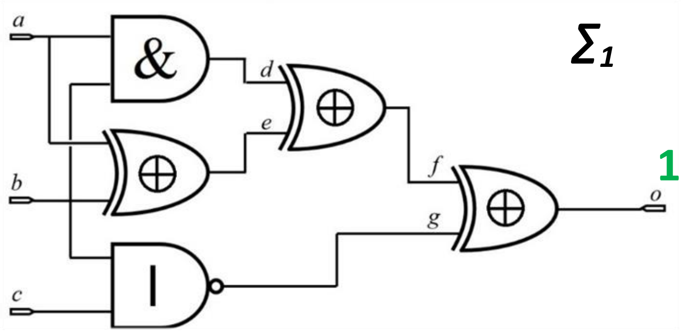
Задача: найти РМ минимального веса.

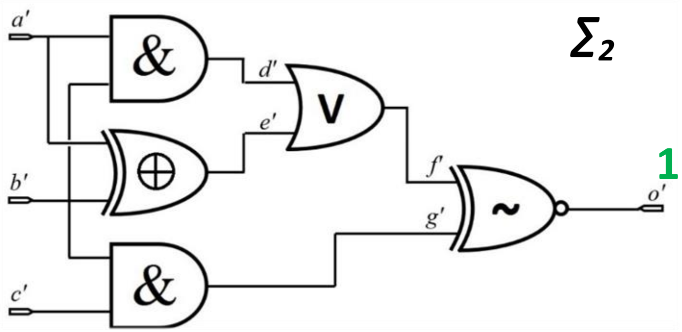
Примеры вставки разрезов

Пусть заданы СФЭ Σ_1и Σ_2, реализующие ФАЛ f и g: $f = (11010001), g = (11010001)$.

Оценка при отсутствии неэквивалентных МС – максимальный вес полного конуса по двум СФЭ.

Оценка без разбиения – 5.





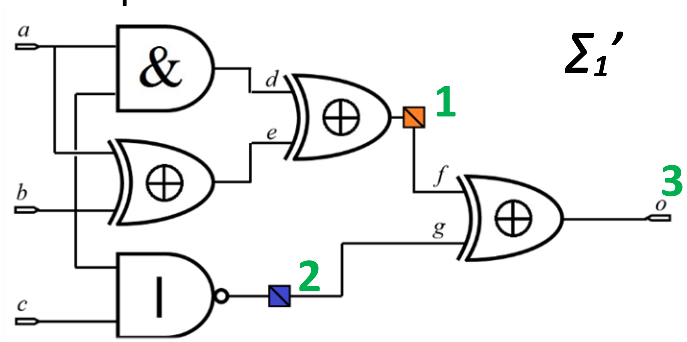
МО:

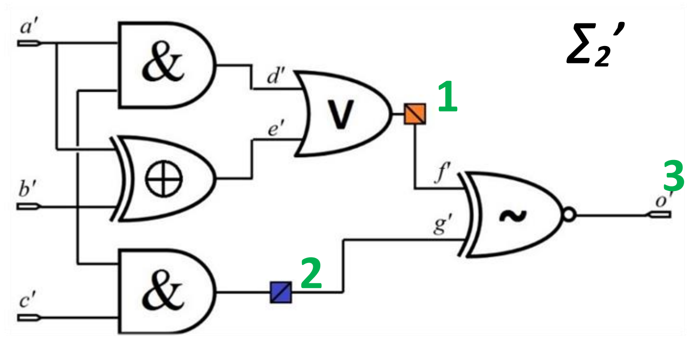
МС: 1 **(o, o')**

Примеры вставки разрезов

Оценка при отсутствии неэквивалентных МС – максимальный вес полного конуса по двум СФЭ.

Оценка данного решения – 4.





МО: **(a, a')** **(b, b')** **(c, c')** **(f, f')** **(g, g')**

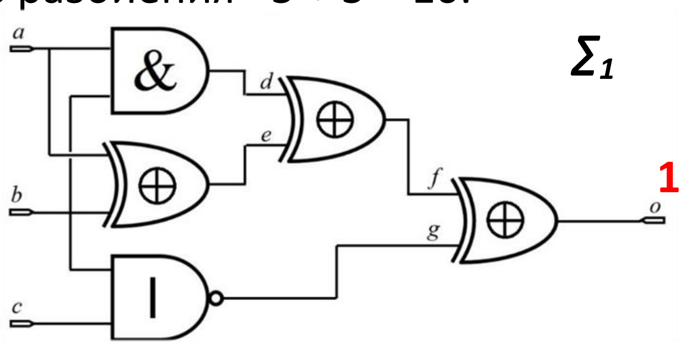
МС: **3 (o, o')** **1 (f, f')** **2 (g, g')**

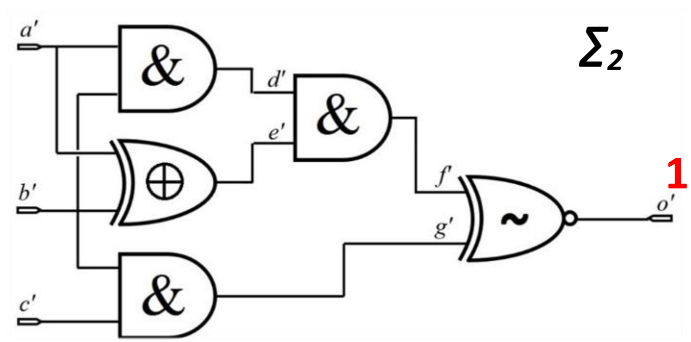
Примеры вставки разрезов

Пусть заданы СФЭ Σ_1 и Σ_2, реализующие ФАЛ f и g: $f = (11010001), g = (11101110)$.

Оценка при наличии неэквивалентных МС – суммарный вес полных конусов, вошедших в неэквивалентные МС.

Оценка без разбиения– 5 + 5 = 10.





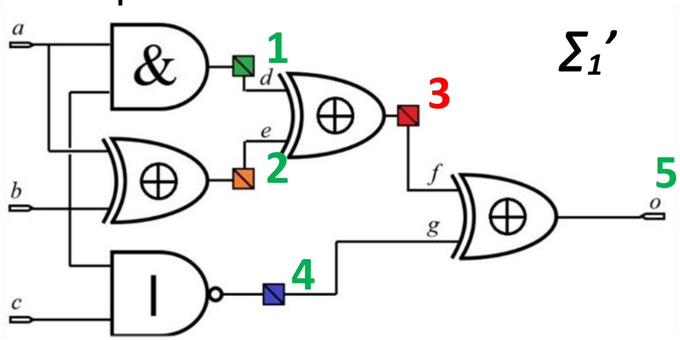
MO: **(a, a’)**
(b, b’)
(c, c’)

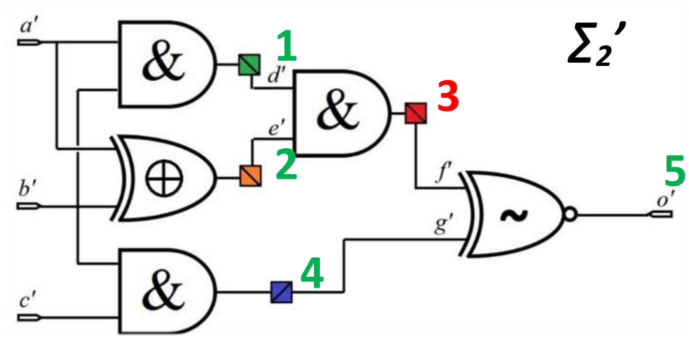
MC: **1 (o, o’)**

Примеры вставки разрезов

Оценка при наличии неэквивалентных МС – суммарный вес полных конусов, вошедших в неэквивалентные МС.

Оценка данного решения – 2 + 2 = 4.





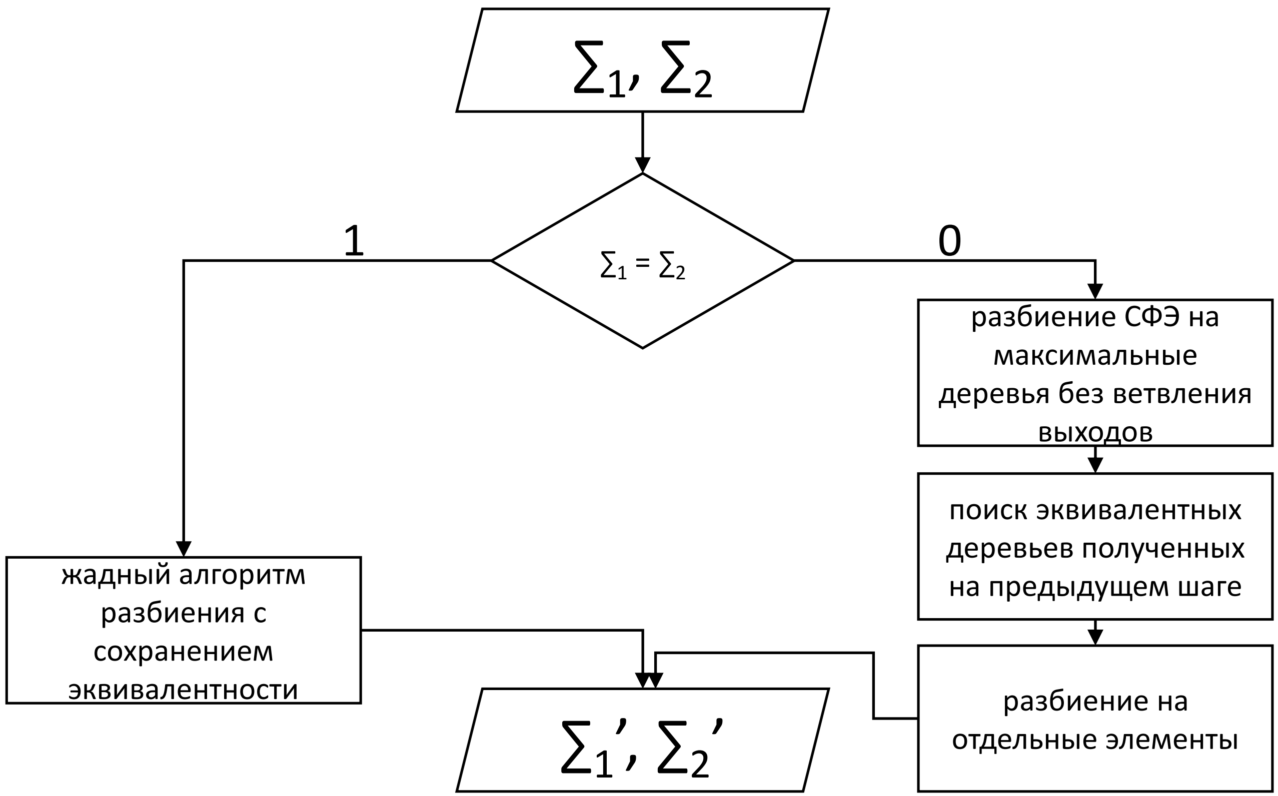
МО: **(a, a')** **1 (d, d')**
(b, b') **2 (e, e')**
(c, c') **3 (f, f')**
4 (g, g')

МС: **5 (o, o')** **1 (d, d')**
2 (e, e')
3 (f, f')
4 (g, g')

Соревнование «2015 CAD Contest at ICCAD»

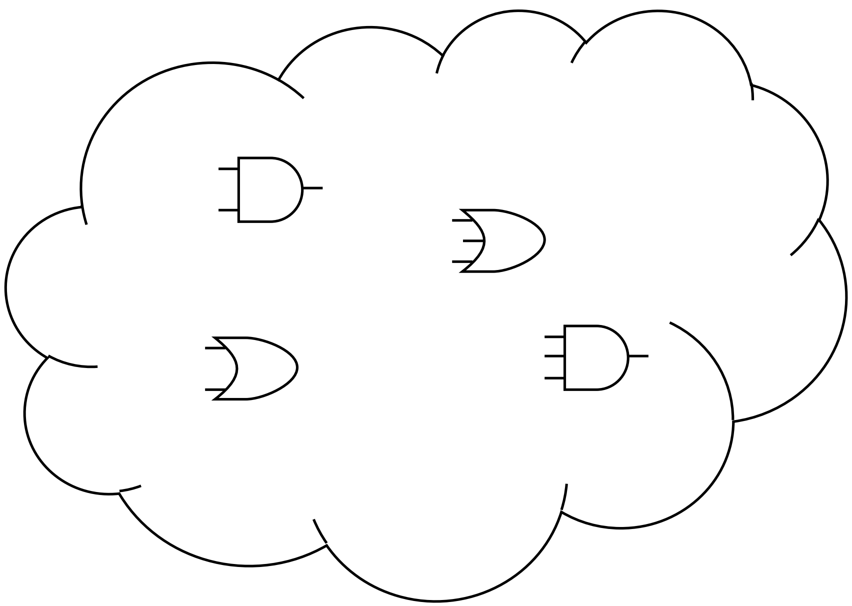
- Рассматриваемая задача разбиения СФЭ была предложена в качестве одной из задач соревнования по разработке алгоритмов автоматизации проектирования, проходящего под эгидой конференции International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD 2015).
- Решение задачи, предложенное авторами заняло первое место по результатам соревнования.

Схема решения, предоставленного на «2015 CAD Contest at ICCAD»

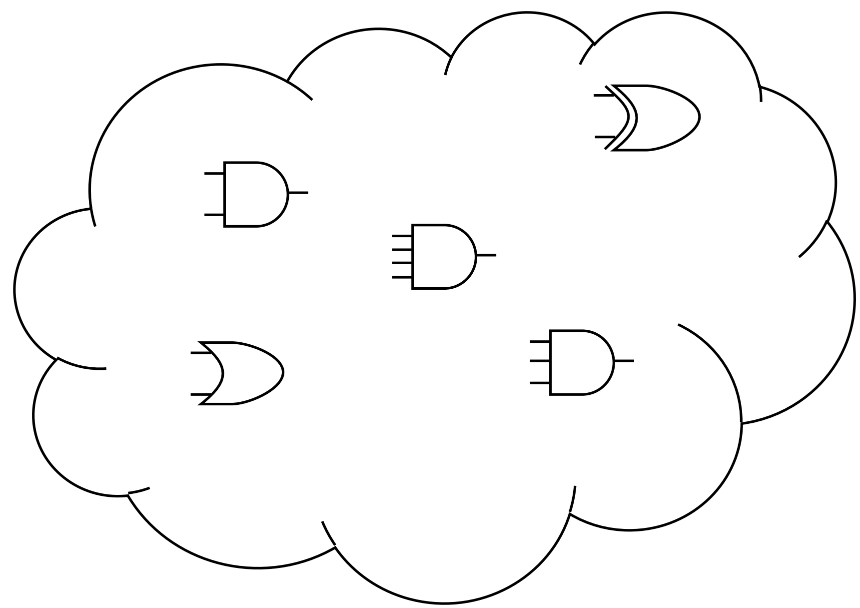


Алгоритмы локального разбиения схем. Алгоритм разбиения на отдельные элементы.

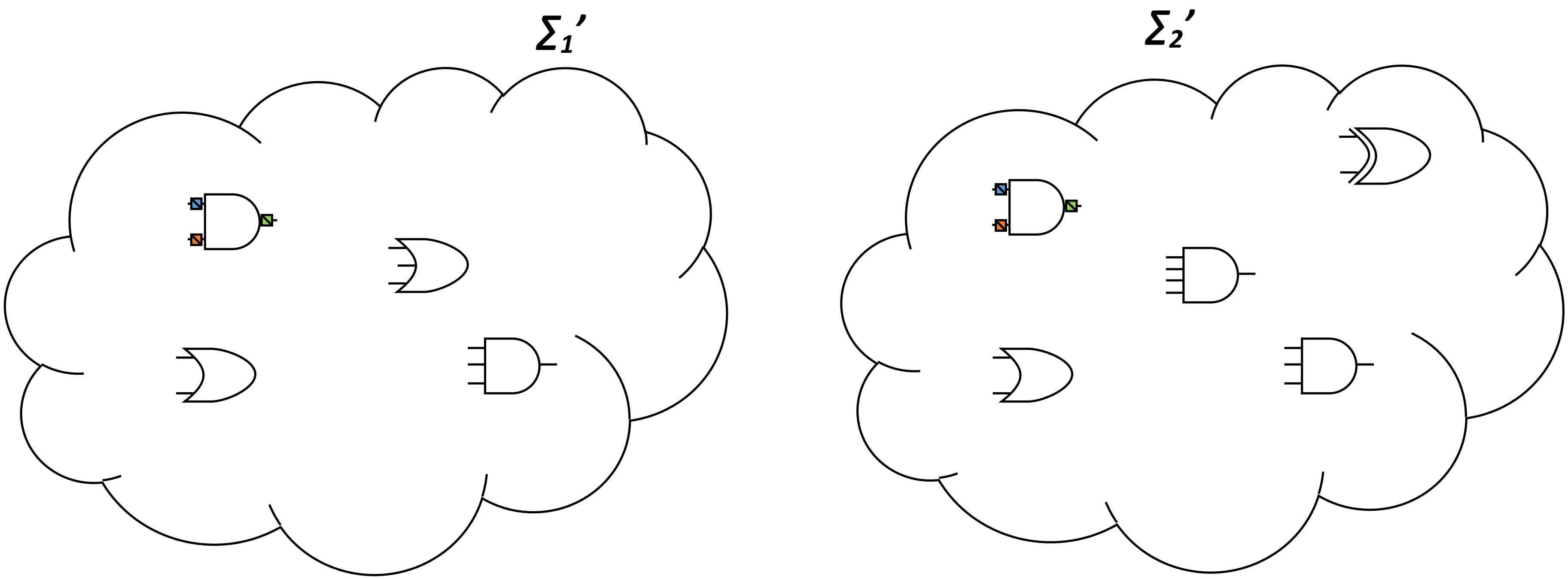
Σ_1'



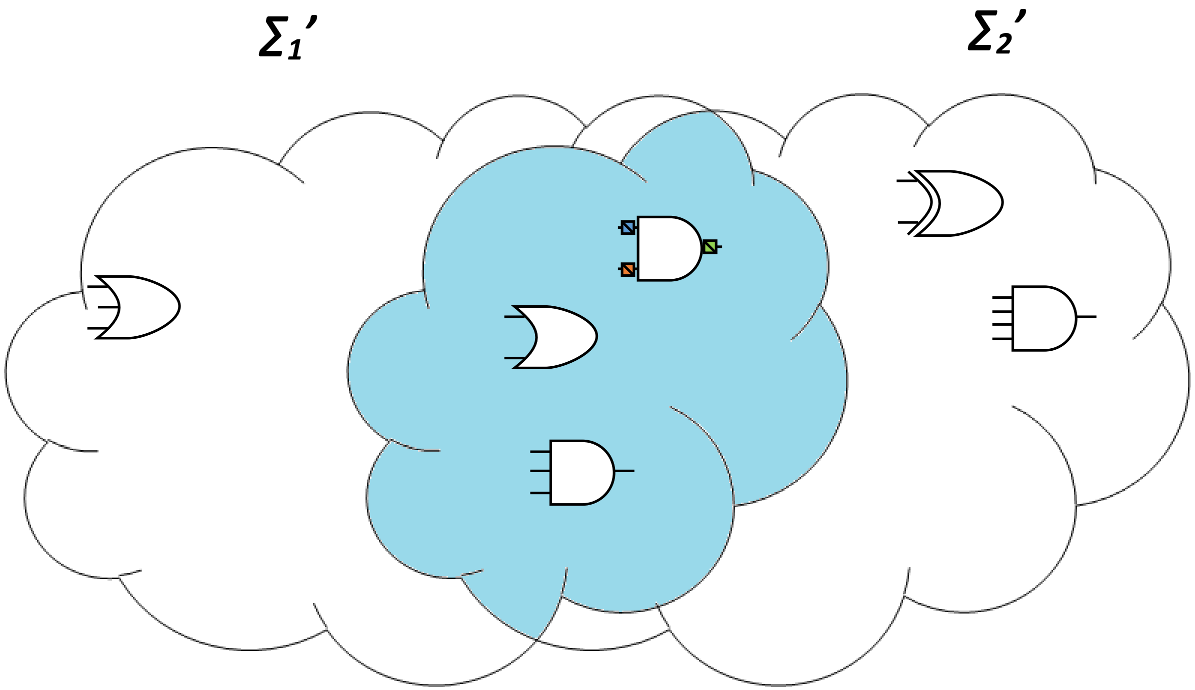
Σ_2'



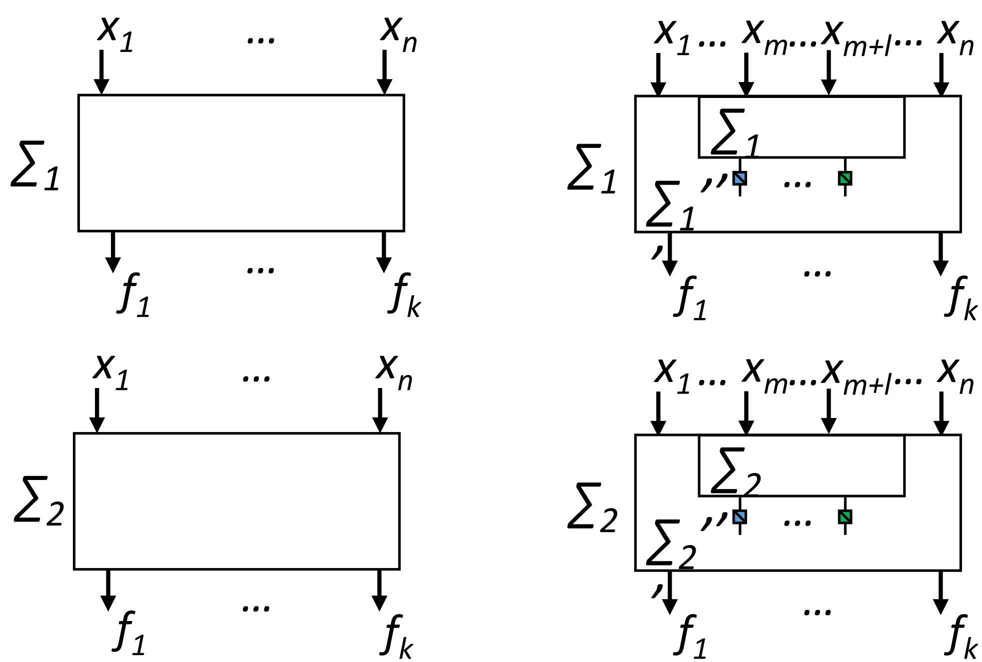
Алгоритмы локального разбиения схем. Алгоритм разбиения на отдельные элементы.



Алгоритмы локального разбиения схем. Алгоритм разбиения на отдельные элементы.



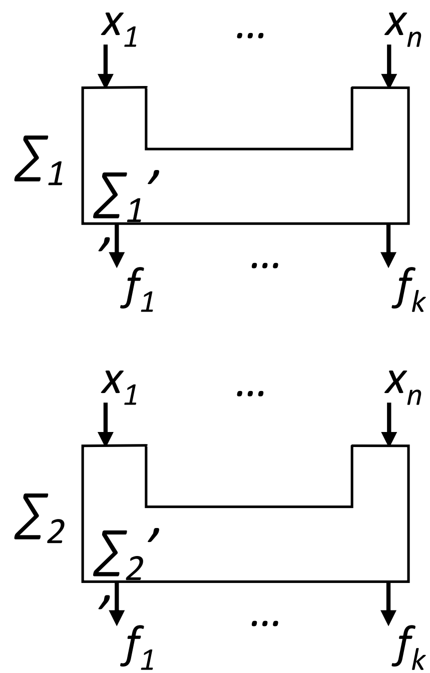
Алгоритмы локального разбиения схем. Жадный алгоритм разбиения с сохранением эквивалентности.



Алгоритмы локального разбиения схем. Жадный алгоритм разбиения с сохранением эквивалентности.

Если:

1. $\sum_1' = \sum_2'$.
2. На выходах $\sum_1'$и $\sum_2'$ реализуются всевозможные вектора.



Тогда:

$\sum_1'' = \sum_2''$.

Верификация решения, предоставленного на «2015 CAD Contest at ICCAD»

- Проверка на сохранение эквивалентности. Если $\sum_1 = \sum_2$, то и $\sum_1'$, $\sum_2'$ должны быть функционально эквивалентны.
- Проверка на сохранение структуры. Структура схем не должна меняться. В схему могут вноситься только разрезы.
  Проверка:

1. Удаление разрезов из verilog описания схем $\sum_1'$, $\sum_2'$.
2. Использование diff.

Результаты тестирования для пар схем, содержащих неэквивалентные МС

Имя	Число входов	Число выходов	Число ФЭ в 1	Число ФЭ в 2	Суммарный вес неэквивалентных МС				
					Б.р.	A	B	C	D
ut2	249	914	13876	10063	503826	318661	470050	41550	33819
ut4	1364	5397	78169	52219	1064521	832430	988829	230280	167985
ut8	2282	2726	51439	91236	14582834	3557143	14577666	267054	125682
ut9	650	2474	59886	48061	1363736	400296	1174440	188662	111966
ut11	56	129	14409	14600	1524769	86813	1513138	57660	20581
ut13	99	128	28993	28052	2590770	271694	2483103	113618	57010
ut15	99	128	7323	17572	1516255	1246862	1516188	49356	26566
ut17	128	256	82408	46395	9029081	3021783	8856532	256658	91325
ut19	160	385	147784	74617	NA	60868791	24821951	NA	199749
ut21	80	288	213224	200217	48463859	3051084	48463162	48463859	194477
ut23	80	192	94707	101754	NA	476021	NA	NA	100934

Результаты тестирования для пар схем, содержащих только эквивалентные МС

Имя	Число входов	Число выходов	Число ФЭ в 1	Число ФЭ в 2	Максимальный вес максимального входного конуса		
					A	B	C
ut1	249	914	13877	10063	4675	4124	3240
ut3	1364	5397	78169	52219	2247	1996	2004
ut5	650	2474	59886	48061	7494	7043	7361
ut7	2282	2726	51439	91236	8134	8020	8134
ut10	56	129	10083	14409	13607	13610	13611
ut12	99	128	17498	28993	27748	27053	27748
ut14	99	128	7323	16643	15794	15793	15794
ut16	128	256	41474	82408	76931	76910	76931
ut18	160	385	74889	147784	108158	NA	108158
ut20	80	288	78181	213224	208487	208486	208488
ut22	80	192	87239	94707	90673	90672	90673