

**Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова**

Факультет вычислительной математики и кибернетики

С. А. Ложкин

**ЛЕКЦИИ ПО ОСНОВАМ
КИБЕРНЕТИКИ**

(вариант 2014 г., глава 3)

Москва 2014

Оглавление

Введение	4
3 Синтез и сложность управляющих систем	7
§1 Задача синтеза. Простейшие методы синтеза схем и связанные с ними верхние оценки сложности функций.	7
§2 Нижние оценки сложности ФАЛ, реализация некоторых ФАЛ и минимальность некоторых схем.	13
§3 Каскадные контактные схемы и схемы из функциональных элементов. Метод каскадов и примеры его применения, метод Шеннона	21
§4 Нижние мощностные оценки функции Шеннона	32
§5 Дизъюнктивно-универсальные множества функций. Асимптотически наилучший метод О. Б. Лупанова для синтеза схем из функциональных элементов в базисе $\{\&, \vee, \neg\}$	37
§6 Регулярные разбиения единичного куба и моделирование функций переменными. Синтез схем для некоторых дешифраторов и мультиплексоров.	42
§7 Асимптотически наилучший метод синтеза формул в базисе $\{\&, \vee, \neg\}$. Поведение функции Шеннона для глубины ФАЛ.	48

Оглавление

3

§8 Асимптотически наилучший метод синтеза
контактных схем 51

Литература 58

Введение

Курс «Основы кибернетики» (ранее «Элементы кибернетики»), создателем и основным лектором которого был чл.-корр. РАН С. В. Яблонский, читается на факультете ВМиК МГУ с первых лет его существования. В настоящее время он читается в 6–8 семестрах и является обязательным для всех бакалавров (интегрированных магистров) направления 01400 — «Прикладная математика и информатика». При этом объем и, в некоторой степени, программа курса «Основы кибернетики» варьируются в зависимости от профиля.

Курс «Основы кибернетики» посвящен изложению теории дискретных управляющих систем, которая представляет собой часть дискретной математики и математической кибернетики. В ней разрабатываются и изучаются дискретные математические модели, описывающие функционирование и структуру сложных систем преобразования информации (интегральных схем, программ и т. п.). В основе этих моделей лежат различные способы задания функционирования управляющих систем с помощью дискретных функций и их структурная реализация в тех или иных классах графов (классах схем). При исследовании управляющих систем ставятся и решаются две основные задачи: задача анализа и задача синтеза.

Задача анализа состоит в нахождении функционирования данной схемы, а задача синтеза — в построении схемы, имеющей (реализующей) заданное функционирование. Каждая из этих задач может рассматриваться либо как индивидуальная задача, и тогда ее решением является конкрет-

ное функционирование (схема), либо как массовая задача, и тогда ее решением должен быть алгоритм нахождения функционирования (схемы). Задача синтеза имеет, как правило, множество решений, из которых выбирают решение, оптимальное по какому-либо критерию. Чаще всего в качестве такого критерия выступает сложность схемы, понимаемая как сумма сложностей составляющих ее элементов или задержка схемы, понимаемая как максимальная сумма задержек для последовательно соединенных элементов схемы.

С содержательной точки зрения различные критерии оптимальности отражают различные параметры моделируемых электронных схем или программ. Так, например, сложность может характеризовать стоимость, размеры или потребляемую мощность СБИС, а также время выполнения программы на одном процессоре. При этом задержка схемы характеризует время срабатывания СБИС или время выполнения программы на параллельных процессорах и т. п.

Если задача синтеза решена в одной модели, можно пытаться перенести это решение в другие модели с помощью структурного моделирования. Кроме того, полученное решение можно «улучшить» с помощью эквивалентных преобразований. С другой стороны, если задача синтеза решена для одних функций, можно пытаться «разбить» (декомпозировать) новую функцию на уже рассмотренные и построить из синтезированных для них схем схему для новой функции с помощью операции суперпозиции.

Указанные выше задачи рассматриваются в лекциях для всех основных классов схем (дизъюнктивные нормальные формы, формулы и схемы из функциональных элементов, контактные схемы), а также для некоторых модификаций этих классов.

Первая глава посвящена различным вопросам представления функций алгебры логики с помощью таблиц и дизъюн-

ктивных нормальных форм (минимизация дизъюнктивных нормальных форм).

Вторая глава содержит описание структуры и функционирования схем из основных классов управляющих систем, а также из некоторых классов, представляющих собой их обобщения или модификации. В ней устанавливаются верхние оценки числа схем различных типов, рассматриваются особенности применения операции суперпозиции в различных классах схем и некоторые вопросы их структурного моделирования.

В третьей главе подробно рассматривается задача синтеза управляющих систем. В ней приводится целый спектр методов синтеза схем (от простейших до асимптотически оптимальных), устанавливаются нижние мощностные оценки функций Шеннона и оценки сложности ряда конкретных функций, доказывается минимальность некоторых схем.

В четвертой главе изучаются эквивалентные преобразования схем на основе тождеств во всех основных классах управляющих систем. Для каждого из них приводится система «основных» тождеств, доказывается полнота этой системы и изучаются вопросы ее избыточности.

В пятой главе представлены некоторые вопросы надежности и контроля схем (построение тестов для таблиц, синтез самокорректирующихся контактных схем).

Глава 3

Синтез и сложность управляющих систем

§1 Задача синтеза. Простейшие методы синтеза схем и связанные с ними верхние оценки сложности функций.

В общем виде задача синтеза состоит в построении по заданной системе функций реализующей ее схемы, которая принадлежит заданному классу и на которой достигается минимальное значение заданного функционала сложности. Частным случаем этой задачи является рассмотренная в §7 главы 1 задача минимизации ДНФ. Дадим основные определения, связанные с задачей синтеза схем, и введем необходимые обозначения.

Пусть \mathcal{U} — один из введенных в главе 2 классов схем, который является полным в том смысле, что каждую систему ФАЛ F можно реализовать некоторой его схемой Σ , а Ψ — какой-либо функционал сложности схем класса \mathcal{U} , то есть отображение \mathcal{U} во множество неотрицательных действительных чисел. Будем считать, что функционал сложности Ψ обладает свойством *монотонности*, то есть $\Psi(\Sigma) \geq \Psi(\Sigma')$, если $\Sigma, \Sigma' \in \mathcal{U}$, и Σ' получается из Σ в результате удаления вершин или ребер (ср.с §7 гл. 1). Все введенные в главе 2 функционалы сложности этим свойством обладают. Определим сложность $\Psi(F)$ системы ФАЛ F относительно

функционала Ψ в классе \mathcal{U} как минимальное значение величины $\Psi(\Sigma)$ на множестве тех схем Σ из \mathcal{U} , которые реализуют F . При этом схема Σ , принадлежащая классу \mathcal{U} , которая реализует F и для которой $\Psi(\Sigma) = \Psi(F)$, называется *минимальной схемой* в классе \mathcal{U} относительно функционала Ψ . В силу монотонности функционала Ψ , минимальная схема всегда может быть найдена среди приведенных схем.

Величину $\Psi(F)$, в том случае когда функционал Ψ совпадает с введенным в главе 2 функционалом $L(D, R, \text{и т. д.})$, будем называть *сложностью* (соответственно *глубиной*, *рангом*, и т. д.) *системы ФАЛ F*. Введем функцию

$$\Psi(n) = \max_{f \in P_2(n)} \Psi(f),$$

которая, обычно, называется *функцией Шеннона для класса U относительно функционала сложности* Ψ . В дальнейшем сложность системы ФАЛ F относительно функционала Ψ для любого из введенных классов вида \mathcal{U}_B^A (вида \mathcal{U}^A) будем обозначать через $\Psi_B^A(F)$ (соответственно $\Psi^A(F)$), а функцию Шеннона для этого класса относительно Ψ — через $\Psi_B^A(n)$ (соответственно $\Psi^A(n)$). В обозначениях классов \mathcal{U}_B^C , \mathcal{U}_B^Φ , а также связанных с ними функционалов сложности и функций Шеннона, нижний индекс Б вида B_0 будем, как обычно, опускать.

Отметим некоторые простейшие соотношения между введенными функциями. Очевидно, что для сложностей $\Psi'(F)$ и $\Psi''(F)$ системы ФАЛ F относительно функционала Ψ в классах схем \mathcal{U}' и \mathcal{U}'' соответственно выполняется неравенство

$$\Psi'(F) \leq \Psi''(F),$$

если $\mathcal{U}' \supseteq \mathcal{U}''$. В частности,

$$\Psi_B^C(F) \leq \Psi_B^\Phi(F), \quad \Psi^K(F) \leq \Psi^\pi(F)$$

и т. д. Довольно часто выделение подклассов из основных классов схем происходит за счет наложения различных дополнительных свойств на рассматриваемые схемы. В частности, из класса КС выделяют π -схемы, КС, обладающие свойствами разделительности, и. т. п.

Заметим, что для сложности $L(F)$ системы ФАЛ $F = (f_1, \dots, f_m)$ в любом из рассматриваемых классов схем выполняются неравенства

$$\max_{1 \leq i \leq m} L(f_i) \leq L(F) \leq \sum_{i=1}^m L(f)_i.$$

Задача синтеза допускает тривиальное решение, связанное с использованием переборного алгоритма, который, однако, имеет большую трудоемкость и практически не применим, если число БП больше 5.

Для реализации произвольных ФАЛ и получения верхних оценок их сложности можно использовать другой простейший метод синтеза схем, основанный на моделировании совершенной ДНФ. На основе этого моделирования, в частности, доказывается следующее утверждение.

Лемма 1.1. Для любой функции алгебры логики $f(x_1, \dots, x_n)$, $f \neq 0$, существуют формула \mathcal{F}_f , $\mathcal{F}_f \in \mathcal{U}^\Phi$, и π -схема Σ_f , которые реализуют f и для которых справедливы неравенства:

$$L(\mathcal{F}_f) \leq 2n \cdot |N_f| - 1, \quad L(\Sigma_f) \leq n |N_f|. \quad (1.1)$$

Следствие 1. В силу (1.1), с учетом того, что ФАЛ 0 можно реализовать π -схемой сложности 2, а также формулой из \mathcal{U}^Φ , имеющей сложность 2, выполняются неравенства

$$\begin{aligned} L^C(n) &\leq L^\Phi(n) \leq n \cdot 2^{n+1} - 1, \\ L^K(n) &\leq L^\pi(n) \leq n \cdot 2^n. \end{aligned}$$

Следствие 2. В силу следствия 1 и с учётом следствия 2 из теоремы 2.1 главы 2 справедливо неравенство

$$D(n) \leq n + \lceil \log n \rceil + 2.$$

Следующее утверждение доказывается моделированием совершенной ДНФ с использованием контактного дерева.

Лемма 1.2. Для любой ФАЛ f , $f \in P_2(n)$ и $f \neq 0$, существуют π -схема Σ_f и формула \mathcal{F}_f , $\mathcal{F}_f \in \mathcal{U}^\Phi$, которые реализуют f и для которых, наряду с (1.1), справедливы также неравенства:

$$L(\Sigma_f) \leq 2^n + |N_f| - 2, \quad L(\mathcal{F}_f) \leq 2^{n+1} + |N_f| - 4.$$

Доказательство. В качестве Σ_f можно взять π -схему, которая получается из $(1, 2^n)$ -КД порядка n от БП x_1, \dots, x_n (рис. 1.1) в результате снятия тех его выходов, где реализу-

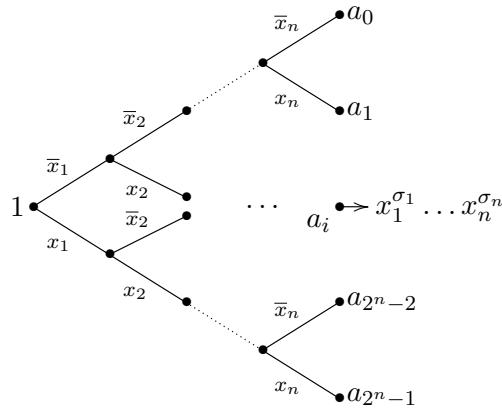


Рис. 1.1: $(1, 2^n)$ -контактное дерево порядка n

ются ЭК, не входящие в совершенную ДНФ ФАЛ f , отождествления остальных выходов КД и перехода к соответствующей приведенной КС. Так как при удалении вершины удаляются и все инцидентные ей контакты, то

$$L(\Sigma_f) \leq 2(2^n - 1) - (2^n - |N_f|) = 2^n + |N_f| - 2.$$

Формула \mathcal{F}_f получается в результате моделирования построенной π -схемы Σ_f в классе формул с поднятыми отрицаниями (см. §2 гл. 2), и поэтому

$$R(\mathcal{F}_f) = L(\Sigma_f), \quad L(\mathcal{F}_f) = R(\mathcal{F}_f) + L^-(\Sigma_f) - 1,$$

где $L^-(\Sigma_f)$ — число размыкающих контактов в схеме Σ . Следовательно,

$$L(\mathcal{F}_f) \leq L(\Sigma_f) + 2^n - 2 \leq 2^{n+1} + |N_f| - 4,$$

так как число размыкающих контактов в КД порядка n равно $2^n - 1$.

Лемма доказана. \square

Следствие.

$$L^\pi(n) \leq 2^{n+1} - 2, \tag{1.2}$$

$$L^\Phi(n) \leq 3 \cdot 2^n - 4. \tag{1.3}$$

К схемам, полученным на основе простейших методов синтеза, полезно применять с целью уменьшения их сложности эквивалентные преобразования и, в частности, следующие операции приведения.

Пусть вершина w СФЭ Σ не достижима из ее вершины v , а СФЭ Σ' получается из СФЭ Σ в результате удаления вершины v , объявления вершины w начальной вершиной всех исходивших из v дуг и переноса в вершину w всех выходных БП, приписанных вершине v . Тогда СФЭ Σ' считается результатом применения к СФЭ Σ операции *присоединения*

вершину v к вершине w . Заметим, что для любых двух вершин схемы одну из них всегда можно присоединить к другой. Две вершины СФЭ называются *эквивалентными*, если в них реализуются равные ФАЛ. Применяя к СФЭ Σ операцию присоединения одной из двух эквивалентных вершин к другой, мы получим СФЭ Σ' , которая, очевидно, эквивалентна Σ .

Приведенная схема называется *строго приведенной*, если в ней нет эквивалентных вершин. Из любой СФЭ можно получить эквивалентную ей строго приведенную СФЭ с помощью операции присоединения эквивалентных вершин и операции удаления висячих вершин.

Аналогичным образом определяется операция присоединения вершин в КС, с той лишь разницей, что на нее не налагаются какие-либо ограничения, связанные с достижимостью вершин.

Для множества ФАЛ G , $G \subseteq P_2(n)$, через \vec{G} будем обозначать систему, состоящую из всех различных ФАЛ множества G , упорядоченных в соответствии с номерами их столбцов значений. При этом систему ФАЛ $\vec{P}_2(n)$ будем называть *универсальной системой* порядка n .

Довольно часто задачу синтеза приходится решать для следующих ФАЛ и систем ФАЛ:

1. линейной ФАЛ порядка n , то есть ФАЛ ℓ_n или ФАЛ $\bar{\ell}_n$;
2. мультиплексорной ФАЛ μ_n порядка n ;
3. дешифратора \vec{Q}_n (дизъюнктивного дешифратора \vec{J}_n) порядка n ;
4. универсальной системы $\vec{P}_2(n)$ порядка n .

Лемма 1.3. Для каждого натурального n в \mathcal{U}_B^C существует СФЭ U_n , которая реализует систему ФАЛ $\vec{P}_2(n)$ и сложность которой равна $2^{2^n} - n$.

Доказательство. В силу полноты базиса, в \mathcal{U}_B^C существует система формул Σ от БП x_1, \dots, x_n , которая реализует систему ФАЛ $\vec{P}_2(n)$. Искомая СФЭ U_n является строго приведенной СФЭ, которая эквивалентна Σ и получается из нее в результате применения операций присоединения эквивалентных вершин, а также операций удаления висячих вершин (см. §4 главы 2). Действительно, из построения следует, что число всех вершин СФЭ U_n , включая n ее входов, равно 2^{2^n} и поэтому

$$L(U_n) = 2^{2^n} - n.$$

Лемма доказана. \square

Следствие.

$$L_B^C(\vec{P}_2(n)) \leq 2^{2^n} - n.$$

§2 Нижние оценки сложности ФАЛ, реализация некоторых ФАЛ и минимальность некоторых схем.

Рассмотрим сначала простейшие нижние оценки сложности ФАЛ и связанные с ними примеры минимальных схем.

Лемма 2.1. *Если ФАЛ $f(x_1, \dots, x_n)$ существенно зависит от всех своих БП, то*

$$L^C(f) \geq n - 1, \quad L^K(f) \geq n. \quad (2.1)$$

Если при этом ФАЛ f не является монотонной ФАЛ (каждая БП x_i , $i \in [1, k]$, не является ни монотонной, ни иномонотонной БП ФАЛ f), то

$$L^C(f) \geq n \quad (\text{соответственно } L^K(f) \geq n + k). \quad (2.2)$$

Доказательство. Пусть Σ_f — минимальная по сложности СФЭ из \mathcal{U}^C , реализующая ФАЛ f . Из существенной зависимости ФАЛ f от БП x_1, \dots, x_n следует, что $R(\Sigma_f) \geq n$, и поэтому, в силу соотношений (2.6) главы 2,

$$L^C(f) \geq L_{\&,\vee}(\Sigma_f) \geq n - 1.$$

Если же, кроме того, ФАЛ f не является монотонной ФАЛ, то схема Σ_f должна содержать хотя бы один ФЭ \neg и, следовательно, в указанном случае

$$L^C(f) = L(\Sigma_f) \geq n.$$

Таким образом, первые из неравенств (2.1) и (2.2) доказаны.

Пусть теперь Σ_f — минимальная по сложности $(1, 1)$ -КС, реализующая ФАЛ f . Из существенной зависимости ФАЛ f от БП x_i , $i \in [1, n]$, следует, что либо контакт вида x_i , либо контакт вида \bar{x}_i встречается в КС Σ_f , и поэтому

$$L^K(f) = L(\Sigma_f) \geq n.$$

Если же, кроме того, БП x_i , $i \in [1, k]$, не является ни монотонной, ни инмонотонной БП ФАЛ f , то как контакт вида x_i , так и контакт вида \bar{x}_i входят в Σ_f , и, следовательно, в данном случае

$$L^K(f) = L(\Sigma_f) \geq n + k.$$

Лемма доказана. □

Следствие.

$$\begin{aligned} L^C(\ell_n) &\geq n, & L^K(\ell_n) &\geq 2n, \\ L^C(\mu_n) &\geq 2^n + n, & L^K(\mu_n) &\geq 2^n + 2n. \end{aligned}$$

Замечание. Нижние оценки сложности ФАЛ $f = s_n^{[0,n-1]}$, вытекающие из леммы 2.1, доказывают минимальность π -схемы, моделирующей ЭД $\bar{x}_1 \vee \dots \vee \bar{x}_n = f$, в классе КС и минимальность формулы $\overline{(x_1 \dots x_n)} = f$ в классе СФЭ, что устанавливает равенства $L^K(f) = n$ и $L^C(f) = n$.

Лемма 2.2. Для системы $F = (f_1, \dots, f_m)$, состоящей из попарно различных ФАЛ отличных от констант (от переменных), справедливо неравенство

$$L^K(F) \geq m \quad (\text{соответственно } L_B^C(F) \geq m). \quad (2.3)$$

Доказательство. Второе из неравенств (2.3) вытекает из того, что все ФАЛ f_i , $i = 1, \dots, m$, реализуются на попарно различных выходах СФЭ, отличных от ее входов.

Пусть теперь Σ_F — приведенная $(1, m)$ -КС, реализующая систему ФАЛ F . Из приведенности Σ_F и условий леммы вытекает, что Σ_F — связный граф с не менее чем $(m+1)$ вершиной, и поэтому, в силу неравенства (1.2) главы 2,

$$L(\Sigma_F) \geq |V(\Sigma_F)| - 1 \geq m.$$

Лемма доказана. \square

Следствие.

$$\begin{aligned} L^C(\vec{Q}_n) &\geq 2^n, & L^K(\vec{Q}_n) &\geq 2^n, \\ L^C(\vec{J}_n) &\geq 2^n, & L^K(\vec{J}_n) &\geq 2^n, \\ L_B^C(\vec{P}_2(n)) &\geq 2^{2^n} - n, & L^K(\vec{P}_2(n)) &\geq 2^{2^n} - 2. \end{aligned}$$

Замечание. В силу следствия универсальная СФЭ U_n , построенная в лемме 1.3, является минимальной по сложности СФЭ в классе \mathcal{U}_B^C .

Рассмотрим некоторые схемные реализации и соответствующие им верхние оценки сложности для некоторых ФАЛ и систем ФАЛ. Будем, как обычно, называть (схемным) мультиплексором, дешифратором, дизъюнктивным дешифратором и универсальным многополюсником любую схему, которая реализует соответствующую систему ФАЛ.

Лемма 2.3. Для любого натурального n выполняются неравенства:

$$L^C(\vec{Q}_n) \leq 2^n + O(n \cdot 2^{\frac{n}{2}}), \quad L^C(\vec{J}_n) \leq 2^n + O(n \cdot 2^{\frac{n}{2}}); \quad (2.4)$$

$$L^K(\vec{Q}_n) \leq 2^{n+1} - 2; \quad (2.5)$$

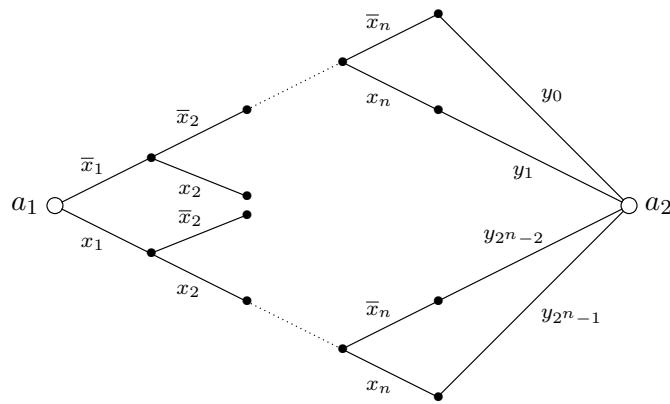
$$L^\pi(\mu_n) \leq 3 \cdot 2^n - 2, \quad L^\Phi(\mu_n) \leq 2^{n+2} - 3; \quad (2.6)$$

$$L^C(\ell_n) \leq 4n - 4, \quad L^C(\bar{\ell}_n) \leq 4n - 4 + \left\lfloor \frac{1}{n} \right\rfloor. \quad (2.7)$$

Доказательство. В классе \mathcal{U}^C построим схемный дешифратор порядка n , удовлетворяющий первому неравенству (2.4), следующим образом:

1. разобьем набор БП $X(n)$ на группы $x' = (x_1, \dots, x_q)$, $x'' = (x_{q+1}, \dots, x_n)$, где $q = \lceil n/2 \rceil$;
2. возьмем дешифраторы Σ' и Σ'' от БП x' и x'' порядка q и $(n-q)$ соответственно, реализующие каждую свою ЭК по лемме 1.1;
3. объединим СФЭ Σ' и Σ'' , после чего конъюнктируем каждый выход Σ' с каждым выходом Σ'' , а выходы всех использованных для этого 2^n ФЭ & (и только их) объявим выходами искомого дешифратора.

Аналогичным образом строится дизъюнктивный схемный дешифратор порядка n , удовлетворяющий второму неравенству (2.4).

Рис. 2.1: примеры π -схем

Искомым контактным дешифратором порядка n является $(1, 2^n)$ -контактное дерево, показанное на рис. 1.1, а искомым контактным мультиплексором порядка n является π -схема, приведенная на рис. 2.1. Заметим, что сложность схем, показанных на рис. 1.1 и 2.1, равна $2^{n+1} - 2$ и $3 \cdot 2^n - 2$ соответственно, то есть удовлетворяет неравенствам (2.5) и (2.6), причем число размыкающих контактов в каждой из них равно $2^n - 1$.

В результате моделирования указанной π -схемы можно построить бесповторную по информационным БП формулу

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_n(x_1, \dots, x_n, y_0, \dots, y_{2^n-1}) &= \\ &= \bigvee_{\sigma_1 \in B} x_1^{\sigma_1} \left(\bigvee_{\sigma_2 \in B} x_2^{\sigma_2} \left(\dots \left(\bigvee_{\sigma_n \in B} x_n^{\sigma_n} y_{\nu(\sigma_1, \dots, \sigma_n)} \right) \dots \right) \right), \end{aligned}$$

которая удовлетворяет второму неравенству (2.6), так как

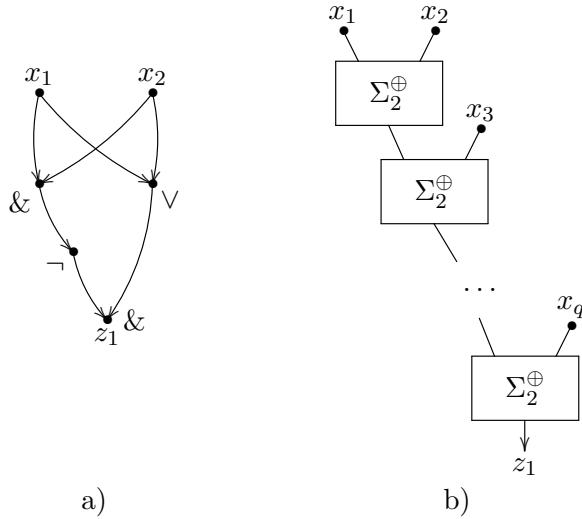


Рис. 2.2: пример суперпозиции СФЭ

реализует ФАЛ μ_n и имеет сложность $4 \cdot 2^n - 3$.

Неравенства (2.7) при $n = 1$, очевидно, выполняются. Искомой СФЭ, реализующей линейную ФАЛ ℓ_n , $n \geq 2$, со сложностью (2.7), является СФЭ Σ_n^{\oplus} , показанная на рис. 2.2а,б. Аналогичная СФЭ для ФАЛ $\bar{\ell}_n$ получается в результате замены $\Phi\Theta \&$ на $\Phi\Theta \vee$ и $\Phi\Theta \vee$ на $\Phi\Theta \&$ в первой подсхеме вида Σ_2^{\oplus} схемы Σ_n^{\oplus} (см. рис. 2.2а).

Лемма доказана.

□

Следствие.

$$L^C(\overrightarrow{Q}_n) \sim L^C(\overrightarrow{J}_n) \sim 2^n.$$

Лемма 2.4. Если система $\Phi\text{АЛ } F = (f_1, \dots, f_m)$ состоит из попарно различных $\Phi\text{АЛ}$ от БП $X(n)$, отличных от 0 и

1, то

$$L^K(F) \geq 2^{1-n} \sum_{j=1}^m |N_{f_j}|.$$

Доказательство. Возьмем приведенную $(1, m)$ -КС Σ , реализующую систему ФАЛ F , и заметим, что при любом α , $\alpha \in B^n$, в сети $\Sigma|_\alpha$ имеется связная компонента, которая содержит вход Σ и те ее выходы, где реализуемые ФАЛ обращаются в 1 на наборе α . Из неравенства (1.2) главы 2 следует, что при этом

$$|E(\Sigma|_\alpha)| \geq f_1(\alpha) + \dots + f_m(\alpha).$$

Суммируя полученное неравенство по всем наборам α , $\alpha \in B^n$, придем (см. доказательство леммы ??) к неравенству

$$2^{n-1} L(\Sigma) \geq \sum_{j=1}^m |N_{f_j}|,$$

из которого вытекает неравенство леммы.

Лемма доказана. \square

Следствие.

$$L^K(J_n) \geq 2^{n+1} - 2.$$

Замечание. В силу следствия $(1, 4)$ -КС с входом a , которая состоит из двух непересекающихся по внутренним вершинам $(a - a)$ -цепей (циклов) с ЭК провеодимости $\bar{x}_1x_2x_1$ и $\bar{x}_1\bar{x}_2x_1$, является минимальным дизъюнктивным контактным дешифратором порядка 2.

Лемма 2.5. *Если для ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, и для любого σ , $\sigma \in B$, ФАЛ $f_\sigma(x_1, \dots, x_{n-1}, \sigma) \not\equiv 0, 1$, то*

$$L_{\&, \vee}^C(f) \geq \min\{L_{\&, \vee}^C(f_0), L_{\&, \vee}^C(f_1)\} + 2. \quad (2.8)$$

Доказательство. Пусть Σ — минимальная по числу $\Phi\mathcal{E} \&$ и \vee СФЭ из класса \mathcal{U}^C , которая реализует ФАЛ f и которая не содержит цепочек из двух последовательно соединенных $\Phi\mathcal{E} \neg$. Из условия леммы следует, что выход $\Phi\mathcal{E} \neg$, присоединённого к входу x_n СФЭ Σ не может быть её выходом.

Пусть цепь C соединяет вход x_n СФЭ Σ с её выходом z_1 и пусть константа σ , $\sigma \in B$, равна 0 тогда и только тогда, когда БП x_n подаётся в C либо на вход $\Phi\mathcal{E} \&$, либо на вход $\Phi\mathcal{E} \neg$, к выходу которого в C присоединён $\Phi\mathcal{E} \vee$.

Рассмотрим СФЭ $\widehat{\Sigma}$, которая реализует ФАЛ f_σ , $f_\sigma \not\equiv 0, 1$, и получена из СФЭ Σ в результате подстановки $x_n = \sigma$, а также последующего ЭП на основе тождеств $\underline{\tau}^{\text{ПК}}$ (см. §5 гл. 2) вплоть до устраниния всех вхождений констант. Убедимся в том, что при указанном ЭП будут удалены по крайней мере два ФЭ типа $\&$ или \vee .

Действительно, в случае $\sigma = 0$ из СФЭ Σ будет удален ФЭ \mathcal{E}' , являющийся первым ФЭ типа $\&$ или \vee цепи C . Заметим, что выход ФЭ \mathcal{E}' не может быть выходом схемы и не может быть входом ФЭ \neg , выход которого является выходом схемы, так как при этом ФАЛ f_σ была бы равна константе. Следовательно, на цепи C СФЭ Σ имеется ФЭ \mathcal{E}'' типа $\&$ или \vee , на вход которого поступает либо выход \mathcal{E}' , либо выход ФЭ \neg , присоединённого к выходу \mathcal{E}' . Легко видеть, что ФЭ \mathcal{E}'' тоже будет удален при переходе от Σ к $\widehat{\Sigma}$ и, следовательно, справедливы неравенства

$$L_{\&, \vee}(f) = L_{\&, \vee}(\Sigma) \geq L_{\&, \vee}(\widehat{\Sigma}) + 2 \geq L_{\&, \vee}(f_\sigma) + 2,$$

из которых вытекает (2.8).

Случай $\sigma = 1$, когда БП x_n подаётся в C либо на вход $\Phi\mathcal{E} \vee$, либо на вход $\Phi\mathcal{E} \neg$, к выходу которого присоединён ФЭ типа $\&$, рассматривается аналогично.

Лемма доказана. \square

Следствие 1.

$$L^C(\mu_n) \geq 2^{n+1} + n - 1. \quad (2.9)$$

Действительно, (2.9) получается в результате применения леммы 2.5 последовательно ко всем информационным БП y_{2^n-1}, \dots, y_1 и учитывая, что получившаяся в результате соответствующих подстановок констант ФАЛ существенно зависит от БП x_1, \dots, x_n, y_0 .

Следствие 2. Из (2.9) в силу леммы 4.1 главы 2 вытекает неравенство

$$D(\mu_n) \geq n + 1.$$

Замечание. В силу следствия 1 формула $\bar{x}_1y_0 \vee x_1y_1$ является минимальной СФЭ, реализующей ФАЛ μ_1 и $L^C(\mu_1) = 4$.

§3 Каскадные контактные схемы и схемы из функциональных элементов. Метод каскадов и примеры его применения, метод Шеннона

Приведенные в §1 простейшие методы синтеза позволяют строить формулы и π -схемы, специфика которых не допускает многократного использования «промежуточных результатов». Метод каскадов [21] является достаточно простым и в то же время довольно эффективным методом синтеза как КС, так и СФЭ, который позволяет это делать. Он связан с последовательным разложением заданных ФАЛ по БП и рекурсивным построением схемы, реализующей эти ФАЛ.

Основу метода каскадов составляет специальный частный случай корректной суперпозиции КС — операция присоединения к выходам одновходовой КС одного или двух противоположных контактов, которая заключается в следующем. Пусть $(1, m)$ -КС Σ получается из $(1, \tilde{m})$ -КС $\check{\Sigma}$ в результате добавления новой выходной вершины v , которая

соединяется с выходными вершинами v_0 и v_1 КС $\check{\Sigma}$ контактами \bar{x}_i и x_i соответственно (см. рис. 3.1а). Тогда в вершинах v_0 и v_1 КС Σ в силу нулевой проводимости между входами присоединяемой $(2, 1)$ -КС реализуются те же самые ФАЛ g_0 и g_1 , что и в КС $\check{\Sigma}$, а в вершине v — ФАЛ g вида

$$g = \mu(x_i, g_0, g_1) = \bar{x}_i g_0 \vee x_i g_1. \quad (3.1)$$

Аналогичные соотношения будут справедливы и тогда, когда вершина v КС Σ связана с вершиной v_σ только одним контактом вида x_i^σ , $\sigma \in \{0, 1\}$ (см. рис. 3.1б). В этом случае в вершине v КС Σ реализуется ФАЛ

$$g = x_i^\sigma g_\sigma, \quad (3.2)$$

а в вершине v_σ по-прежнему реализуется ФАЛ g_σ .

Описанные выше операции присоединения одного или двух противоположных контактов очевидным образом распространяются на случай КС с несколькими входами. Кроме того, они допускают моделирование в классе СФЭ в базисе B_0 . Так, переход от СФЭ \check{U} , $\check{U} \in \mathcal{U}^C$, которая реализует в выходных вершинах v_0 и v_1 ФАЛ g_0 и g_1 соответственно, к СФЭ U , $U \in \mathcal{U}^C$, которая реализует ФАЛ g , удовлетворяющую (3.1) ((3.2)), показан на рис. 3.2а (соответственно 3.2б). Заметим, что при этом разложение (3.1) в случае $g_\sigma \equiv 1$ эквивалентно представлению

$$g = x_i^{\bar{\sigma}} \vee g_\sigma,$$

схемная реализация которого показана на рис. 3.2с.

Определим, далее, *каскадную* КС как приведенную КС без изолированных полюсов, которая может быть получена из системы тождественных вершин в результате ряда операций присоединения одного или двух противоположных контактов и операций переименования выходов. Каскадная КС (ККС) считается *полной*, если она была построена без использования операции присоединения одного контакта. Так,

например, КС, показанная на рис. 4.3с гл. II, является полной ККС, если её входами считать вершины a_1 и v , а выходами — вершины a_2 и a_3 , или наоборот. К числу ККС относятся также контактные деревья, показанные на рис. 4.4 гл. II, причем $(2^n, 1)$ -КД является полной ККС.

Заметим, далее, что, в силу отмеченных выше свойств рассматриваемых операций присоединения контактов, ККС имеет нулевые ФАЛ проводимости между своими входами. Отсюда следует, что в каждой вершине ККС реализуется столбец, в котором никакие две ФАЛ не обращаются в единицу одновременно, причем в случае полной ККС дизъюнкция всех ФАЛ этого столбца дает 1. Так, в частности, в каждой вершине полной ККС с двумя входами реализуется столбец из двух противоположных ФАЛ.

Вершина ККС, введенная в нее с помощью операции присоединения одного контакта, называется *неполной вершиной* этой ККС. Будем говорить, что ККС Σ'' является *дополнением* неполной ККС Σ' , если она получается в результате соединения всех неполных вершин Σ' отсутствующими в них контактами с новым входом, удаления всех «старых» входов и перехода к соответствующей приведенной КС. При этом, очевидно,

$$L(\Sigma'') \leq 2L(\Sigma'), \quad (3.3)$$

а объединение Σ' и Σ'' является полной ККС. Дополнение Σ'' к полной ККС Σ с 1 входом будем называть *инверсной* к Σ' ККС. Заметим, что ККС Σ'' , в силу отмеченных выше свойств полных ККС, реализует систему ФАЛ \bar{F}' , если ККС Σ' реализует систему ФАЛ F' . Таким образом, в силу (3.3) справедливо следующее утверждение

Лемма 3.1. *Если $(1, m)$ -ККС Σ' реализует систему ФАЛ $F' = (f'_1, \dots, f'_m)$, то существует $(1, m)$ -ККС Σ'' , которая*

реализует систему $\Phi\text{АЛ } \overline{F}' = (\overline{f}'_1, \dots, \overline{f}'_m)$ и для которой $L(\Sigma'') \leq 2L(\Sigma')$.

Метод каскадов позволяет по произвольной заданной системе функций алгебры логики $F = (f_1, \dots, f_m)$, $F \in P_2^m(n)$, строить $(1, m)$ -КС Σ_F , $\Sigma_F \in \mathcal{U}^K$, и СФЭ U_F , $U_F \in \mathcal{U}^C$, которые реализуют F . Будем считать, что все ФАЛ f_1, f_2, \dots, f_m системы F различны, отличны от констант, и для каждой БП x_i , $1 \leq i \leq n$, среди них есть ФАЛ, существенно зависящая от x_i .

Разложим ФАЛ f_1, f_2, \dots, f_m сначала по БП x_1 , потом по БП x_2 и так далее. При этом построим последовательности множеств G_i и \widehat{G}_i , состоящих из ФАЛ от БП x_i, x_{i+1}, \dots, x_n , где $i = 1, 2, \dots, n$, такие, что

1. G_i состоит из всех различных ФАЛ $g(x_i, \dots, x_n)$ вида

$$g = f_j(\sigma_1, \dots, \sigma_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n),$$

где $1 \leq j \leq m$, $(\sigma_1, \dots, \sigma_{i-1}) \in B^{i-1}$;

2. \widehat{G}_i состоит из всех различных функций g , $g \in G_i$, которые существенно зависят от x_i .

Легко видеть, что

$$G_1 = \{f_1, \dots, f_m\}, \quad \widehat{G}_n \subseteq \{x_n, \bar{x}_n\},$$

а множества ФАЛ $\widehat{G}_1, \dots, \widehat{G}_n$ не пусты и попарно не пересекаются.

Построим КС $\check{\Sigma}_F$, которая реализует систему ФАЛ \vec{G}_F , где $G_F = \widehat{G}_1 \cup \dots \cup \widehat{G}_n$ с помощью операций присоединения одного или двух противоположных контактов. При этом для каждого i , $i = n, (n-1), \dots, 1$, каждая ФАЛ g , $g \in \widehat{G}_i$, реализуется согласно (3.1) ((3.2)) на выходе v , который при $\alpha = 0, 1$ (соответственно $\alpha = \sigma$) соединен контактом вида x_i^α с тем выходом v_α , где реализуется ФАЛ $g_\alpha = g(\alpha, x_{i+1}, \dots, x_n)$,

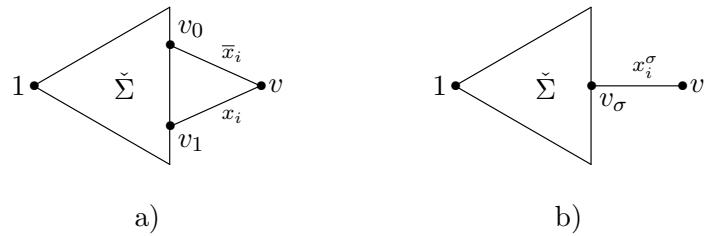


Рис. 3.1: присоединение одного или двух противоположных контактов

принадлежащая множеству G_{i+1} , так, как это показано на рис. 3.1а (соответственно рис. 3.1б).

Заметим, что указанное присоединение одного или двух противоположных контактов не изменяет ФАЛ, реализуемые в вершинах v_α , $\alpha \in \{0, 1\}$.

Для получения искомой КС Σ_F достаточно «снять» пометки с тех выходных вершин КС $\check{\Sigma}_F$, в которых реализуются ФАЛ, отличные от f_1, \dots, f_m .

Аналогичным образом по методу каскадов строится и СФЭ \check{U}_F , реализующая систему ФАЛ \vec{G}_F , с той лишь разницей, что:

1. сначала реализуются все ФАЛ вида \bar{x}_i , $1 \leq i \leq n$, которые встречаются в КС Σ_F ;
2. для всех i , $i = (n-1), \dots, 1$, разложение (3.1), где $g \in \hat{G}_i$ и $g_0, g_1 \in \check{G}_{i+1}$, реализуется так, как показано на рис. 3.2а, а разложение (3.2), применяемое в случае $g_{\bar{\sigma}} = 0$ (разложение

$$g = x_i^{\bar{\sigma}} \vee g_\sigma x_i^\sigma = x_i^{\bar{\sigma}} \vee g_\sigma \quad (3.4)$$

в случае $g_{\bar{\sigma}} = 1$), — так, как показано на рис. 3.2б (соответственно 3.2с);

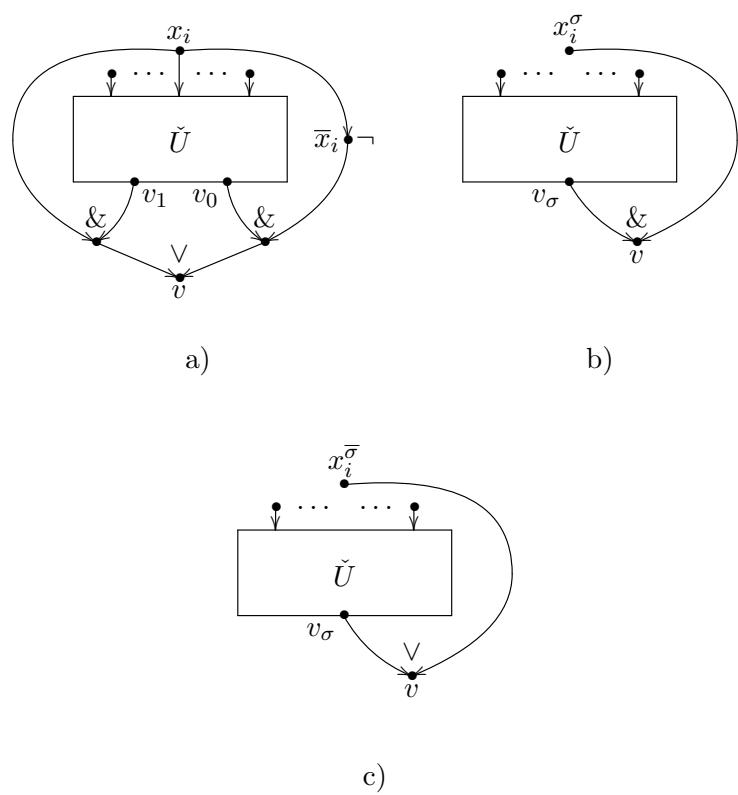


Рис. 3.2: к моделированию операций присоединения контактов в классе СФЭ

3. каждая ФАЛ вида $g_\sigma x_i^\sigma$, используемая в предыдущем пункте при реализации разложений вида (3.1) или (3.2) для различных ФАЛ g , реализуется только один раз.

Как и в случае КС, СФЭ U_F , реализующая систему ФАЛ F и построенная по методу каскадов, получается из СФЭ \check{U}_F в результате «снятия» тех выходов, в которых реализуются ФАЛ, отличные от ФАЛ из F .

Пусть, например, $F = (f_1, f_2)$, где

$$\begin{aligned} f_1 &= \bar{x}_1 x_2 (x_3 \oplus x_4) \vee x_1 (x_2 \vee x_3 \bar{x}_4), \\ f_2 &= x_1 (x_3 \oplus x_4) \vee \bar{x}_1 x_4. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \hat{G}_1 &= G_1 = \{f_1, f_2\}; \\ \hat{G}_2 &= \{x_2 (x_3 \oplus x_4), x_2 \vee x_3 \bar{x}_4\}, \quad G_2 = \hat{G}_2 \cup \{x_3 \oplus x_4, x_4\}; \\ \hat{G}_3 &= \{x_3 \oplus x_4, x_3 \bar{x}_4\}, \quad G_3 = \hat{G}_3 \cup \{x_4\}; \\ \hat{G}_4 &= \{x_4, \bar{x}_4\}. \end{aligned}$$

На рис. 3.3 показана построенная для данной системы ФАЛ КС $\check{\Sigma}_F$, вершины которой помечены сопоставленными им ФАЛ, на рис. 3.4 — соответствующая ей КС Σ_F , а на рис. 3.5 — СФЭ U_F .

Другим примером КС, построенной по методу каскадов для линейной ФАЛ ℓ_n , где $n \geq 2$, является известная схема Кардо [32], показанная на рис. 3.6. Заметим, что эта КС имеет сложность $(4n - 4)$ и является минимальной. В то же время СФЭ, построенная для ℓ_n , $n \geq 2$, по методу каскадов имеет сложность $(7n - 9)$ и не является минимальной, так как имеет большую сложность по сравнению со схемой Σ_n^\oplus сложности $(4n - 4)$, показанной на рис. 2.2. Аналогичные оценки справедливы для ФАЛ $\bar{\ell}_n$ (см. лемму 2.3).

При построении по методу каскадов $(1, 2^n)$ -КС, реализующей систему функций алгебры логики \overrightarrow{Q}_n , мы получим

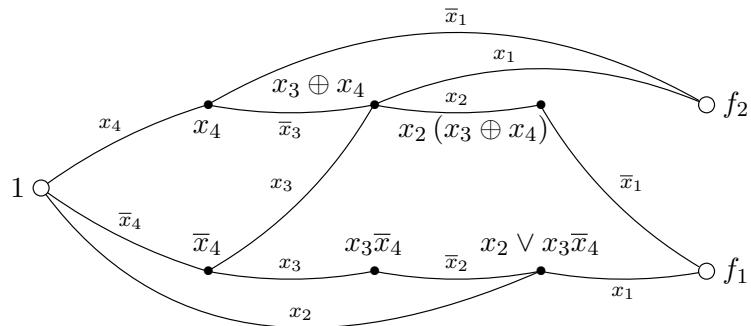


Рис. 3.3: пример КС с помеченными вершинами, построенной методом каскадов

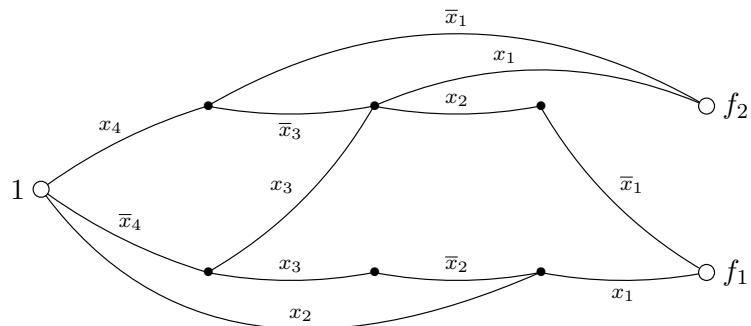


Рис. 3.4: пример КС, построенной методом каскадов

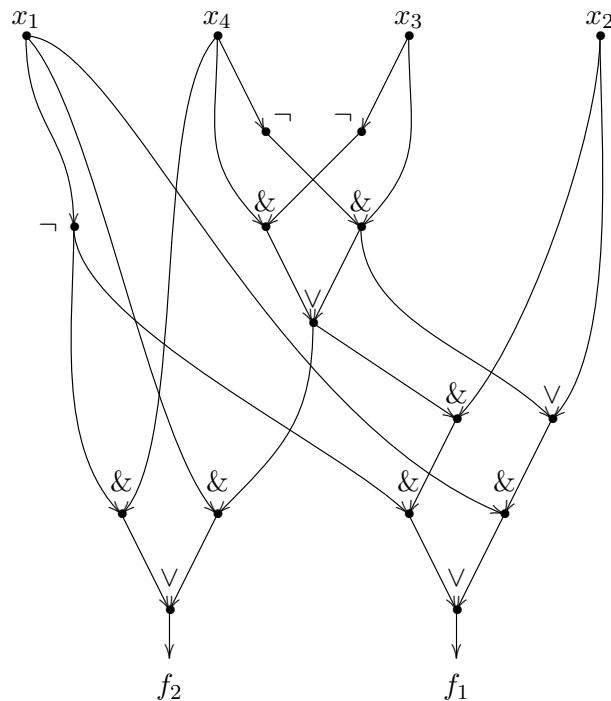


Рис. 3.5: СФЭ для системы ФАЛ F , построенная методом каскадов

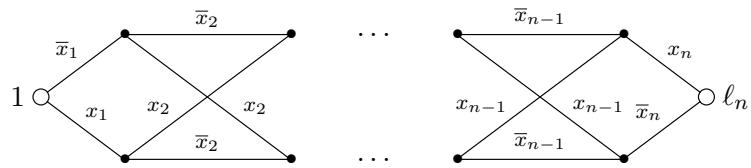


Рис. 3.6: схема Кардо для линейной функции ℓ_n

контактное дерево порядка n , показанное на рис. 4.4 гл. II. Как будет показано далее это КД не является минимальным контактным дешифратором.

Аналогичным образом с помощью метода каскадов можно построить контактный дизъюнктивный дешифратор порядка n и сложности не больше, чем $2^{n+2} - 6$, контактный универсальный многополюсник порядка n и сложности не больше, чем $2 \cdot 2^{2^n}$, а также контактный мультиплексор порядка n и сложности $3 \cdot 2^n - 2$, показанный на рис. 2.1 (см. лемму 2.3). Заметим, что указанный мультиплексор получается при разложении ФАЛ μ_n сначала по адресным, а затем по информационным БП. В то же время, контактный мультиплексор порядка n , построенный по методу каскадов при разложении ФАЛ μ_n сначала по информационным, а затем по адресным БП, содержит КД порядка 2^n от информационных БП и поэтому имеет сложность не меньше, чем 2^{2^n+1} . Это показывает, что выбор «правильного» порядка переменных при разложении ФАЛ может существенно уменьшить сложность КС, построенной по методу каскадов.

Учитывая все сказанное выше, дополним леммы 1.3 и 2.3 следующим утверждением.

Лемма 3.2. Для любого натурального n и $\sigma \in B$ выполняются неравенства:

$$\begin{aligned} L^K(\ell_n^\sigma) &\leq 4n - 4 + \left\lfloor \frac{1}{n} \right\rfloor, & L^K(\vec{P}_2(n)) &\leq 2 \cdot 2^{2^n}, \\ L^K(\vec{J}_n) &\leq 2^{n+2} - 6. \end{aligned}$$

Рассмотрим, в заключение, метод Шеннона для синтеза КС и СФЭ (см. [33, 14]), который позволяет установить порядок роста функций Шеннона $L^K(n)$ и $L^C(n)$.

Метод Шеннона заключается в выборе некоторого параметра q , $1 \leq q \leq n$, и построении схемы Σ_f , реализующей

произвольную ФАЛ $f(x_1, \dots, x_n)$ на основе ее разложения по части переменных (см. равенство (2.5) из гл. 1):

$$f(x', x'') = \bigvee_{\sigma''=(\sigma_{q+1}, \dots, \sigma_n)} x_{q+1}^{\sigma_{q+1}} \cdots x_n^{\sigma_n} \cdot f_{\sigma''}(x'), \quad (3.5)$$

где $x' = (x_1, \dots, x_q)$, $x'' = (x_{q+1}, \dots, x_n)$ и $f_{\sigma''}(x') = f(x', \sigma'')$ при всех $\sigma'', \sigma'' \in B^{n-q}$. При этом схема Σ_f представляет собой суперпозицию вида $\Sigma''(\Sigma')$, где Σ'' — мультиплексор порядка $(n - q)$ от адресных БП x'' , информационные входы которого при выполнении указанной суперпозиции присоединяются к выходам универсального многополюсника Σ' порядка q от БП x' в соответствии с (3.5).

Полагая

$$q = \lfloor \log(n - 2 \log n) \rfloor,$$

построим для ФАЛ $f(x_1, \dots, x_n)$ указанным выше способом КС (СФЭ в базисе B_0) Σ_f , где Σ'' — $(2^{n-q}, 1)$ -КД порядка $(n - q)$ (соответственно формула \mathcal{F}_{n-q} из леммы 2.3), а Σ' — универсальный многополюсник из леммы 3.2 (соответственно леммы 1.3). Корректность построенной суперпозиции, т.е. реализация схемой Σ_f ФАЛ f в случае СФЭ очевидна, а в случае КС обеспечивается тем, что её можно представить в виде результата многократной операции присоединения двух противоположенных контактов, корректность которой была отмечена выше (см. рис. 3.1). Для сложности полученной схемы Σ_f будут справедливы оценки

$$L(\Sigma_f) \leq 2 \cdot 2^{2q} + 2 \cdot 2^{n-q} \leq \frac{2^{n+2}}{n - 2 \log n} + O\left(\frac{2^n}{n^2}\right),$$

если $\Sigma_f \in \mathcal{U}^K$, и

$$L(\Sigma_f) \leq 2^{2q} + 4 \cdot 2^{n-q} \leq \frac{8 \cdot 2^n}{n - 2 \log n} + O\left(\frac{2^n}{n^2}\right),$$

если $\Sigma_f \in \mathcal{U}^C$. Таким образом, доказано следующее утверждение.

Теорема 3.1. Для функций Шеннона $L^K(n)$ и $L^C(n)$ выполнены соотношения:

$$L^K(n) \lesssim 4 \frac{2^n}{n}, \quad L^C(n) \lesssim 8 \frac{2^n}{n}.$$

§4 Нижние мощностные оценки функции Шеннона

Установим теперь ряд нижних оценок для введенных в §1 функций Шеннона. Все эти оценки получены с помощью мощностного метода, предложенного Шенном [33, 14], который основан на том, что число ФАЛ от БП x_1, \dots, x_n не может быть меньше числа тех попарно не эквивалентных схем, сложность которых не превосходит значения соответствующей функции Шеннона от аргумента n .

Пусть \mathcal{U} — один из рассмотренных в главе 2 классов схем, Ψ — введенный там функционал сложности, а $\Psi(n)$ — функция Шеннона для класса \mathcal{U} относительно Ψ . Обозначим через $\mathcal{U}(\Psi, n)$ множество тех схем Σ , $\Sigma \in \mathcal{U}$, которые реализуют одну ФАЛ из $P_2(n)$ и для которых $\Psi(\Sigma) \leq \Psi$. Следующее «мощностное» равенство вытекает непосредственно из определений:

$$\|\mathcal{U}(\Psi(n), n)\| = 2^{2^n}. \quad (4.1)$$

Заметим также, что если для некоторого натурального n и действительных $\hat{\Psi}$, δ , где $0 < \delta < 1$, выполняется неравенство

$$\|\mathcal{U}(\hat{\Psi}, n)\| \leq \delta \cdot 2^{2^n}, \quad \text{то } \Psi(f) \geq \hat{\Psi} \quad (4.2)$$

для не менее чем $(1 - \delta) \cdot 2^{2^n}$ ФАЛ f из $P_2(n)$.

Верхние оценки величины $\|\mathcal{U}(\Psi, n)\|$, установленные в главе 2 для различных классов схем и функционалов сложности, а также соотношения (4.1)–(4.2) служат основой для

получения нижних мощностных оценок соответствующих функций Шеннона и сложности почти всех ФАЛ. Напомним, что (см. леммы 4.3, 4.4, 6.2, 6.3 из главы 2) для любых натуральных n и L справедливы неравенства:

$$\|\mathcal{U}^C(L, n)\| \leq (8(L+n))^{L+1}, \quad (4.3)$$

$$\|\mathcal{U}^\Phi(L, n)\| \leq (8n)^{L+1}, \quad (4.4)$$

$$\|\mathcal{U}^K(L, n)\| \leq (8nL)^L, \quad (4.5)$$

$$\|\mathcal{U}^\pi(L, n)\| \leq (12n)^L, \quad (4.6)$$

$$\|\mathcal{U}^\Phi[L, n]\| \leq (8n)^{2^D}. \quad (4.7)$$

Лемма 4.1. Для положительных действительных чисел a , y , q из неравенств

$$a \log q > 1, \quad (ay)^y \geq q, \quad (4.8)$$

следует неравенство

$$y \geq \frac{\log q}{\log(a \log q)} \left(1 + \frac{\log \log(a \log q)}{\log(e \log q)} \right), \quad (4.9)$$

где e — основание натуральных логарифмов, а из неравенств $a > 1$, $a^y \geq q$ — неравенство

$$y \geq \frac{\log q}{\log a}. \quad (4.10)$$

Доказательство. Рассмотрим сначала случай, когда $a = 1$ и $\log q > 1$. В этом случае неравенство (4.9) следует из того, что левая часть (4.8) монотонно возрастает по y , и для

$$y' = (1 + \varepsilon) \frac{\log q}{\log \log q},$$

где

$$\varepsilon = \frac{\log \log \log q}{\log(e \log q)},$$

справедливы соотношения

$$\begin{aligned}
 y' \log y' &= \\
 &= (1 + \varepsilon) \frac{\log q}{\log \log q} (\log \log q - \log \log \log q + \log e \ln(1 + \varepsilon)) \leqslant \\
 &\leqslant \log q (1 + \varepsilon) \left(1 - \frac{\log \log \log q}{\log \log q} + \frac{\varepsilon \log e}{\log \log q} \right) = \\
 &= \log q (1 + \varepsilon) (1 - \varepsilon) = \log q (1 - \varepsilon^2) \leqslant \log q.
 \end{aligned}$$

Заметим, что в случае $a > 0$ неравенство (4.8) эквивалентно неравенству

$$(ay)^{ay} \geqslant q^a,$$

и поэтому неравенство (4.9) получается из неравенства $y \geqslant y'$ в результате замены y на ay и $\log q$ на $a \log q$, если выполнено условие $a \log q > 1$.

Неравенство (4.10) в случае $a > 1$ получается в результате логарифмирования неравенства $a^y \geqslant q$ и деления обеих частей полученного неравенства на $\log a$.

Лемма доказана. □

Теорема 4.1. Для некоторых последовательностей $\varepsilon_i = \varepsilon_i(n)$, где $i = 1, \dots, 5$ и $n = 1, 2, \dots$, таких, что $\varepsilon_i(n) \geqslant 0$ при $n \geqslant n_0$ и $\varepsilon_i(n)$ стремится к 0 при n стремящемся к бесконечности, для почти всех ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, выполняются

неравенства

$$L^C(f) \geq (1 + \varepsilon_1(n)) \frac{2^n}{n}, \quad (4.11)$$

$$L^\Phi(f) \geq (1 - \varepsilon_2(n)) \frac{2^n}{\log n}, \quad (4.12)$$

$$L^K(f) \geq (1 - \varepsilon_3(n)) \frac{2^n}{n}, \quad (4.13)$$

$$L^\pi(f) \geq (1 - \varepsilon_4(n)) \frac{2^n}{\log n}, \quad (4.14)$$

$$D(f) \geq n - \log \log n - \varepsilon_5(n). \quad (4.15)$$

Доказательство. Неравенства (4.11)–(4.14) выводятся из соответствующего рассматриваемому классу схем \mathcal{U} с функционалом сложности L неравенства (4.3)–(4.6) на основе мощностного неравенства (4.2), где $\delta = 1/n$ с использованием леммы 4.1, где $q = 2^{2^n}/n$, и

- 1) $a = 8, \quad y = L^C(n) + n, \quad \text{если } \mathcal{U} = \mathcal{U}^C;$
- 2) $a = 8n, \quad y = L^\Phi(n) + 1, \quad \text{если } \mathcal{U} = \mathcal{U}^\Phi;$
- 3) $a = 8n, \quad y = L^K(n), \quad \text{если } \mathcal{U} = \mathcal{U}^K;$
- 4) $a = 12n, \quad y = L^\pi(n), \quad \text{если } \mathcal{U} = \mathcal{U}^\pi.$

Действительно, подставляя указанные значения в (4.9) по-

лучим, что доля тех ФАЛ $f, f \in P_2(n)$, для которых

$$\begin{aligned} 1) L^C(f) &\geq \frac{2^n}{n+3} \left(1 + \frac{\log(n+3) - o(1)}{n+5} \right) - n \geq \\ &\geq \frac{2^n}{n} \left(1 + \frac{\log n - 3 - o(1)}{n} \right); \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$2) L^\Phi(f) \geq \frac{2^n - \log n}{\log n + 3} - 1 \geq \frac{2^n}{\log n} \left(1 - \frac{3 + o(1)}{\log n} \right); \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} 3) L^K(f) &\geq \frac{2^n}{n+3+\log n} \left(1 + \frac{\log(n+3+\log n) - o(1)}{n+5+\log n} \right) \geq \\ &\geq \frac{2^n}{n} \left(1 - \frac{3 + o(1)}{n} \right), \end{aligned} \quad (4.18)$$

не меньше, чем $(1 - 1/n)$. Следовательно, неравенство (4.11) ((4.12), (4.13)) будет справедливо для достаточно больших n при $\varepsilon_1(n) = \frac{\log n - 4}{n}$ (соответственно $\varepsilon_2(n) = \frac{4}{\log n}$, $\varepsilon_3(n) = \frac{4}{n}$).

Аналогичным образом устанавливается справедливость (4.14) и (4.15) при $\varepsilon_4(n) = \frac{6}{\log n} = \varepsilon_5(n)$.

Теорема доказана. \square

Следствие 1.

$$\begin{aligned} L^C(n) &\gtrsim \frac{2^n}{n}, \quad L^\Phi(n) \gtrsim \frac{2^n}{\log n}, \quad L^K(n) \gtrsim \frac{2^n}{n}, \\ L^\pi(n) &\gtrsim \frac{2^n}{\log n}. \end{aligned}$$

§5 Дизъюнктивно-универсальные множества функций. Асимптотически наилучший метод О. Б. Лупанова для синтеза схем из функциональных элементов в базисе $\{\&, \vee, \neg\}$

Рассмотрим метод синтеза схем из класса \mathcal{U}^C , который был предложен О.Б. Лупановым [14] и позволил впервые установить асимптотику функции Шенна $L^C(n)$. Этот метод, как и метод Шенна (см. §3), основан на представлении реализуемой ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, в виде (3.5) и построении искомой СФЭ Σ_f , реализующей ФАЛ f , как суперпозиции схем вида $\Sigma_f = \Sigma''(\Sigma')$. При этом схема Σ'' по-прежнему является мультиплексором порядка $(n - q)$ от адресных БП $x'' = (x_{q+1}, \dots, x_n)$, а схема Σ' реализует все ФАЛ вида $f_{\sigma''}(x')$, где $x' = (x_1, \dots, x_q)$, $\sigma'' \in B^{n-q}$, и $f_{\sigma''}(x') = f(x', \sigma'')$. Однако, в отличие от метода Шенна, каждая ФАЛ $f_{\sigma''}(x')$ берется не с выхода универсального многополюсника от БП x' , а реализуется на выходе Σ' как дизъюнкция некоторых ФАЛ, выбранных из специального множества G , $G \subseteq P_2(q)$, реализованного на выходах соответствующей подсхемы схемы Σ' .

Множество ФАЛ G , $G \subseteq P_2(m)$, называется *дизъюнктивно-универсальным множеством (ДУМ) порядка t и ранга p* , если любая ФАЛ g , $g \in P_2(m)$, может быть представлена в виде

$$g = g_1 \vee \dots \vee g_p,$$

где $g_i \in G$ при всех i , $i = 1, \dots, p$. Стандартный способ построения таких множеств связан с разбиениями единичного куба.

Пусть $\Pi = (\pi_1, \dots, \pi_p)$ — разбиение куба B^m , и пусть для всех i , $i = 1, \dots, p$, ФАЛ $\psi_i(x_1, \dots, x_m)$ — характеристическая ФАЛ множества π_i , а $G^{(i)}$ — множество всех тех ФАЛ

$g, g \in P_2(m)$, которые обращаются в 0 вне π_i . Заметим, что множество ФАЛ G вида

$$G = G^{(1)} \cup \dots \cup G^{(p)}$$

является ДУМ порядка m и ранга p . Действительно, любая ФАЛ $g, g \in P_2(m)$, может быть представлена в виде

$$g = g_1 \vee \dots \vee g_p, \quad (5.1)$$

где $g_i = \psi_i g$ и, следовательно, $g_i \in G^{(i)}$ для всех $i, i = 1, \dots, p$. Заметим также, что мощность множества $G^{(i)}, i = 1, \dots, p$, равна 2^{s_i} , где $s_i = |\pi_i|$, и что множество $G^{(i)} \cap G^{(j)}$ состоит из ФАЛ, тождественно равной 0, если $1 \leq i < j \leq p$. Следовательно,

$$\lambda = |G| = \sum_{i=1}^p |G^{(i)}| - (p-1) \leq \sum_{i=1}^p 2^{s_i} \leq p2^s,$$

где

$$s = \max_{1 \leq i \leq p} s_i.$$

Указанное ДУМ G будем называть ДУМ, *связанным с разбиением* Π . Компоненты разбиения Π будем при этом называть *полосами* ДУМ G , а ФАЛ $\psi_1 = \chi_{\delta_1}, \dots, \psi_p = \chi_{\delta_p}$ — его *характеристическими* ФАЛ. Заметим, что характеристические ФАЛ попарно ортогональны, то есть одновременно в 1 не обращаются, и принадлежат G . Заметим также, что представление (5.1) в случае рассматриваемого ДУМ G равносильно представлению:

$$g = \psi_1 g_1 \vee \psi_2 g_2 \vee \dots \vee \psi_p g_p \quad (5.2)$$

Будем считать *стандартным* ДУМ порядка m и высоты s , где

$$s \leq 2^m, \quad (5.3)$$

	$x_1 \ x_2 \dots x_{m-1} \ x_m$	$\mathbf{g}_1 \ \mathbf{g}_2 \dots \mathbf{g}_{2^s}$	$\mathbf{g}_{2^s+1} \dots \mathbf{g}_{2^s+1-1}$	\dots	$\mathbf{g}_{(p-1)(2^s-1)+2} \dots \mathbf{g}_\lambda$	
π_1	{ 0 0 ... 0 0 0 0 ... 0 1 }	0 1 ... 1 0 0 ... 1 ... 0 0 ... 1	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	... ... ... 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	$s=s_1$
	...	0 0 ... 0 0 0 ... 0 ... 0 0 ... 0	1 ... 1 0 ... 1 ... 0 ... 1	... ... ... 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	$s=s_2$
	...	0 0 ... 0 0 0 ... 0 ... 0 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	... ... ... 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	$s=s_{p-1}$
	...	0 0 ... 0 0 0 ... 0 ... 0 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	... ... ... 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	$s_p \leq s$
	
	...	0 0 ... 0 0 0 ... 0 ... 0 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	... ... ... 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	$s=s$
	...	0 0 ... 0 0 0 ... 0 ... 0 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	... ... ... 0 ... 0	1 ... 1 0 ... 1 ... 0 ... 0	$s_p \leq s$
	...	0 0 ... 0 0 0 ... 0 ... 0 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	... ... ... 0 ... 0	0 ... 0 0 ... 0 ... 0 ... 0	$s_p \leq s$

Рис. 5.1: к определению дизъюнктивно-универсального множества

ДУМ ранга p , $p = \lceil 2^m/s \rceil$, связанное с разбиением $\Pi = (\pi_1, \dots, \pi_p)$ куба B^m на последовательные отрезки, для которого номер любого набора из множества π_i меньше номера любого набора из множества π_j , если $i < j$, и выполнены соотношения

$$\begin{aligned} s_1 &= s_2 = \dots = s_{p-1} = s, \\ s_p &= 2^m - (p-1)s \leq s. \end{aligned} \quad (5.4)$$

Таблица значений ФАЛ ДУМ G приведена на рис. 5.1.

Из проведенных построений и отмеченных выше свойств стандартного ДУМ вытекает справедливость следующего утверждения.

Лемма 5.1. Для любых натуральных p , m и s , где $p = \lceil \frac{2^m}{s} \rceil$, существует стандартное ДУМ G порядка m и высоты s , которое является ДУМ ранга p и для которого:

- 1) $\lambda = |G| \leq p2^s$;
- 2) система из p характеристических ФАЛ ψ_1, \dots, ψ_p ДУМ G обладает тем свойством, что для любой ФАЛ g , $g \in P_2(m)$, и соответствующих ФАЛ g_1, \dots, g_p из G справедливо не только представление (5.1), но и представление (5.2).

Теорема 5.1. Для любой ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, существует реализующая ее СФЭ Σ_f , $\Sigma_f \in \mathcal{U}^C$, такая, что

$$L(\Sigma_f) \leq \frac{2^n}{n} \left(1 + \frac{5 \log n + O(1)}{n} \right). \quad (5.5)$$

Доказательство. Пусть $x' = (x_1, \dots, x_q)$, $x'' = (x_{q+1}, \dots, x_n)$ и $f_{\sigma''}(x') = f(x', \sigma'')$ для всех σ'' из B^{n-q} . Пусть, далее, Σ'' — мультиплексор порядка $(n-q)$ от адресных БП x'' и информационных БП $y = (y_0, \dots, y_{2^{n-q}-1})$, который построен в соответствии с леммой 2.3, представляет собой формулу \mathcal{F}_{n-q} и реализует мультиплексорную ФАЛ $\mu_{n-q}(x'', y)$.

Пусть s — некоторый параметр, удовлетворяющий (5.3), а G — стандартное ДУМ порядка $m = q$ и высоты s , удовлетворяющее требованиям леммы 5.1. Обозначим через Σ_G СФЭ, которая реализует систему ФАЛ \vec{G} и представляет собой объединение схем, построенных для каждой из них в соответствии с леммой 1.2. Заметим, что, в силу леммы 2.3, (1.3) и леммы 5.1, выполнены неравенства

$$\begin{aligned} L(\Sigma'') &\leq 4 \cdot 2^{n-q}, \\ L(\Sigma_G) &\leq 3p2^{s+q}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Схема Σ' содержит СФЭ Σ_G в качестве подсхемы и реализует каждую ФАЛ $f_{\sigma''}(x')$, где $\sigma'' \in B^{n-q}$, на одном из своих выходов как ФАЛ $g(x')$ вида (5.1) с помощью СФЭ из $(p-1)$ ФЭ \vee , входы которой присоединены к соответствующим выходам Σ_G . Искомая СФЭ Σ_f имеет вид $\Sigma_f = \Sigma''(\Sigma')$ и реализует ФАЛ f в соответствии с разложением (3.5). Для нее, в силу (5.6), будут выполняться неравенства

$$\begin{aligned} L(\Sigma_f) &\leq 2^{n-q}(p-1) + L(\Sigma'') + L(\Sigma_G) \leq \\ &\leq 2^{n-q}(p-1) + 4 \cdot 2^{n-q} + 3p2^{s+q}, \end{aligned}$$

из которых, выбрав значения параметров

$$\begin{aligned} s &= \lceil n - 5 \log n \rceil, \\ m = q &= \lceil 2 \log n \rceil, \end{aligned}$$

удовлетворяющие (5.3), в соответствии с леммой 5.1 получим

$$\begin{aligned} L(\Sigma_f) &\leq \frac{2^n}{n - 5 \log n} + O\left(\frac{2^n}{n^2}\right) = \\ &= \frac{2^n}{n} \left(1 + \frac{5 \log n + O(1)}{n}\right). \end{aligned}$$

Теорема доказана. \square

Следствие. Из (5.5) с учётом следствия из теоремы 4.1 вытекает, что

$$L^C(n) \sim \frac{2^n}{n}.$$

Отметим, в заключение, что в соответствии с (5.5) и теоремой 4.1 сложность $L^C(f)$ для почти всех ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, асимптотически равна функции Шеннона $L^C(n)$, то есть сложности самой сложной ФАЛ из $P_2(n)$. Тем самым, в отличие от класса ДНФ (см. §7 главы 1), в классе схем

\mathcal{U}^C имеет место т. н. эффект Шеннона — асимптотическое равенство сложности почти всех ФАЛ и сложности самой сложной ФАЛ от заданного числа БП, стремящегося к бесконечности.

§6 Регулярные разбиения единичного куба и моделирование функций переменными. Синтез схем для некоторых дешифраторов и мультиплексоров.

Множество δ , $\delta \subseteq B^q$, называется *m-регулярным* множеством наборов куба B^q , если $m < q$, $|\delta| = 2^m$ и все префиксы¹ длины m наборов из δ различны. Заметим, что *m*-регулярному множеству δ , $\delta \subseteq B^q$, можно взаимнооднозначно сопоставить систему ФАЛ $\psi = (\psi_1, \dots, \psi_{q-m})$ из $P_2^{q-m}(m)$ так, что набор $\alpha = (\beta, \gamma)$, где $\beta \in B^m$ и $\gamma \in B^{q-m}$, принадлежит δ тогда и только тогда, когда $\psi(\beta) = \gamma$. Заметим также, что любая ФАЛ g , $g \in P_2(q)$, совпадает на *m*-регулярном множестве наборов δ , $\delta \subseteq B^q$, с некоторой ФАЛ из $P_2(m)$, если рассматривать $P_2(m)$ как множество всех ФАЛ из $P_2(q)$ с несущественными БП x_{m+1}, \dots, x_q . При этом любая ФАЛ из связанной с δ системы функций совпадает на δ с соответствующей БП куба B^q .

Для наборов $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_q)$ и $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_q)$ через $\beta \oplus \alpha$ будем обозначать набор вида $(\beta_1 \oplus \alpha_1, \dots, \beta_q \oplus \alpha_q)$. Для множества δ , $\delta \subseteq B^q$, и набора α , $\alpha \in B^q$, определим множество $\delta \oplus \alpha$ как множество различных наборов вида $\beta \oplus \alpha$, где $\beta \in \delta$, то есть множество, получающееся из множества δ сдвигом (параллельным переносом) на набор α . Заметим, что для *m*-регулярного множества δ , $\delta \subseteq B^q$, и любого набора α , $\alpha \in B^q$, множество $\delta \oplus \alpha$ также является *m*-регулярным. Если при этом $\nu(\alpha) < 2^{q-m}$, то есть

¹ Для слова (набора) α вида $\alpha = \beta\gamma$ слово β (γ) считается его *префиксом* (соответственно *суффиксом*).

$$\alpha = (\underbrace{0, \dots, 0}_m, \gamma),$$

где $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_{q-m})$ и $\nu(\gamma) = \nu(\alpha)$, а множество наборов δ соответствует системе ФАЛ $g = (g_1, \dots, g_{q-m})$, то множество наборов $\delta \oplus \alpha$ будет соответствовать системе ФАЛ $(g_1 \oplus \gamma_1, \dots, g_{q-m} \oplus \gamma_{q-m})$, получающейся из системы g инвертированием некоторых ФАЛ.

Лемма 6.1. Для любых натуральных m , λ и $q = m + \lambda$ и для любой системы ФАЛ $g = (g_1, \dots, g_\lambda)$ из $P_2^\lambda(m)$ существует m -регулярное разбиение $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_{2^{q-m}})$ куба B^q такое, что любая ФАЛ g_i на любой компоненте δ_j совпадает либо с одной из БП x_{m+1}, \dots, x_q , либо с её отрицанием.

Доказательство. Пусть $\delta = \delta_1$ — m -регулярное множество, соответствующее системе ФАЛ $g = (g_1, \dots, g_\lambda)$, и пусть $\delta_i = \delta_1 \oplus \alpha$, где $\nu(\alpha) = i - 1$, для всех i , $i = 1, \dots, 2^{q-m}$. Из построения системы множеств $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_{2^{q-m}})$ следует, что каждое из них обладает требуемым свойствами, связанными с моделированием ФАЛ из g с помощью БП.

Покажем теперь, что Δ — покрытие куба B^q . Для этого возьмем произвольный набор из B^q вида (β, γ) , где $\beta \in B^m$ и $\gamma \in B^{q-m}$, а по нему найдем в множестве δ набор вида $(\beta, \hat{\gamma})$, который имеется в δ в силу m -регулярности этого множества. Следовательно,

$$(\beta, \gamma) = (\beta, \hat{\gamma}) \oplus (\underbrace{0, \dots, 0}_m, \hat{\gamma} \oplus \gamma) = (\beta, \hat{\gamma}) \oplus \alpha,$$

где $\nu(\alpha) < 2^{q-m}$. Таким образом, система Δ образует покрытие куба B^q .

С другой стороны, из m -регулярности δ следует m -регулярность любого из множеств δ_i , $i = 1, \dots, 2^{q-m}$, и поэтому

$$\sum_{i=1}^{2^{q-m}} |\delta_i| = 2^m 2^{q-m} = 2^q.$$

Следовательно, система Δ образует разбиение куба B^q .

Лемма доказана. \square

Применим технику моделирования ФАЛ переменными для синтеза некоторых дешифраторов и мультиплексоров.

Лемма 6.2 (ср. [14]). Для $n = 1, 2, 3, \dots$ выполняются неравенства

$$L^K(\vec{Q}_n) \leq 2^n + O\left(\frac{2^n}{n}\right), \quad (6.1)$$

$$L^K(\vec{J}_n) \leq 2^{n+1} + O\left(\frac{2^n}{n}\right). \quad (6.2)$$

Доказательство. Выберем параметры m , q и λ так, что

$$\lambda = 2^m, \quad q = m + \lambda \quad \text{и} \quad q \leq n,$$

а затем рассмотрим m -регулярное множество наборов δ_1 куба B^q от БП $x' = (x_1, \dots, x_q)$, связанное с системой ФАЛ $\vec{Q}_m(x_1, \dots, x_m)$, которая состоит из всех ЭК вида $x_1^{\sigma_1} \cdots x_m^{\sigma_m}$, где $\nu(\sigma_1, \dots, \sigma_m) = j - 1$, $j \in [1, \lambda]$.

Построим для этой системы по лемме 6.1 разбиение $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_{2^{q-m}})$ куба B^q и заметим, что любая ЭК $K(x') = x_1^{\sigma_1} \cdots x_q^{\sigma_q}$, где $\sigma' = (\sigma_1, \dots, \sigma_q) \in \delta_i$, совпадает на множестве δ_i с одной из ЭК системы \vec{Q}_m , то есть совпадет на нем с буквой $x_{j_{\sigma'}}^{\alpha_{\sigma'}}$, где $m + 1 \leq j_{\sigma'} \leq q$, $\alpha_{\sigma'} \in B$. Заметим, что в силу указанных выше свойств разбиения Δ любая ЭК $K = x_1^{\sigma_1} \cdots x_n^{\sigma_n}$, где $\sigma' = (\sigma_1, \dots, \sigma_q) \in \delta_i$, $1 \leq i \leq 2^\lambda$, может быть представлена в виде

$$K = \chi_i(x') \cdot x_{j_{\sigma'}}^{\alpha_{\sigma'}} \cdot K_{\sigma''}(x''), \quad (6.3)$$

где $x'' = (x_q + 1, \dots, x_n)$, $\sigma'' = (\sigma_{q+1}, \dots, \sigma_n)$.

Пусть, далее, $(1, 2^\lambda)$ -КС $\Sigma' = \Sigma'(a; b_1, \dots, b_{2^\lambda})$ реализует строку из ФАЛ $\vec{\chi} = (\chi_1, \dots, \chi_{2^\lambda})$, где $\chi_i(x')$ — характеристическая ФАЛ множества δ_i , $i \in [1, 2^\lambda]$, и получается в

результате отождествления входов у схем $\Sigma'_1, \dots, \Sigma'_{2\lambda}$, где π -схема Σ'_i , $i \in [1, 2^\lambda]$, построена по лемме 1.2 для ФАЛ χ_i , и является ККС сложности не больше, чем $q \cdot 2^m$, с входом $a_i = a$ и выходом b_i — корнем соответствующего КД (см. рис. 6.1).

Искомая $(1, 2^n)$ -КС $\Sigma_n^{(\&)}$ реализует каждую ЭК из \vec{Q}_n в соответствии с (6.3), имеет вид, показанный на рис. 6.1, и является ККС.

Полагая

$$m = \lceil \log n \rceil - 2,$$

получим, что

$$\lambda = 2^m \leq \frac{n}{2}, \quad q = m + \lambda \leq n.$$

При этом сложность построенной $(1, 2^n)$ -КС $\Sigma_n^{(\&)}$, являющейся контактным дешифратором порядка n , удовлетворяет неравенствам:

$$L(\Sigma_n^{(\&)}) \leq \lambda 2^{n-m} + 2^{n-m+1} + q 2^q \leq 2^n + O\left(\frac{2^n}{n}\right),$$

из которых вытекает неравенство (6.1).

Искомая $(1, 2^n)$ -КС $\Sigma_n^{(\vee)}$, являющаяся дизъюнктивным контактным дешифратором порядка n , сложность которого удовлетворяет оценке (6.2), получается в результате перехода от ККС $\Sigma_n^{(\&)}$ к инверсной ККС.

Лемма доказана. \square

Следствие. Оценки леммы 6.2, следствия из леммы 2.2 и следствия из леммы 2.4 дают асимптотические равенства

$$L^K(\vec{Q}_n) \sim 2^n, \quad L^K(\vec{J}_n) \sim 2^{n+1}.$$

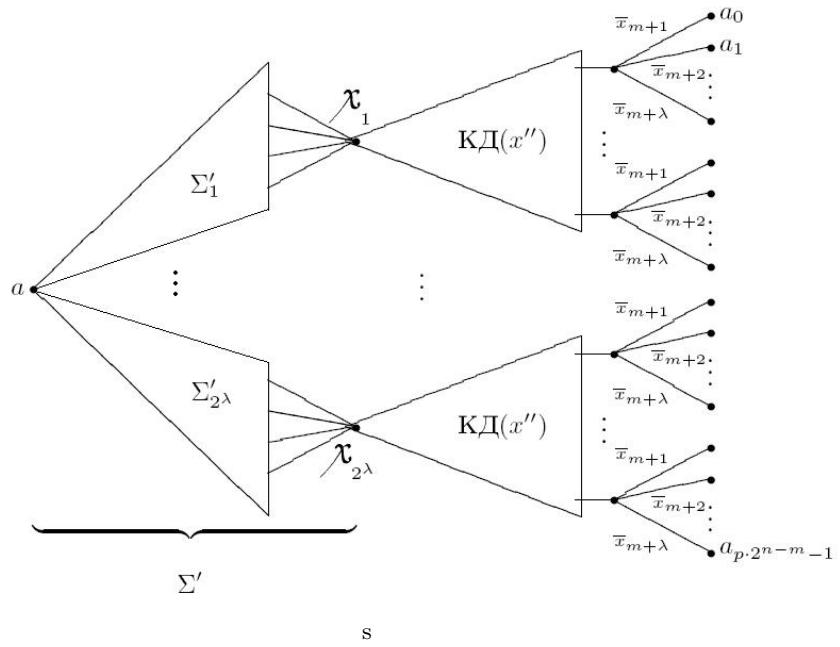


Рис. 6.1: к доказательству леммы 6.2

Лемма 6.3. Для $n = 1, 2, \dots$ выполняются неравенства

$$L^\pi(\mu_n) \leqslant 2 \cdot 2^n + O\left(\frac{2^n}{n}\right), L^C(\mu_n) \leqslant 2 \cdot 2^n + O\left(\frac{2^n}{n}\right),$$

$$D(\mu_n) \leq n + 6,$$

причем существует такая реализующая ФАЛ μ_n и бесповторная по информационным БП формула \mathcal{M}_n с поднятыми отрицаниями, глубина которой удовлетворяет последнему из них, альтернирование не больше 3, а сложность не превосходит $7 \cdot 2^n$.

Доказательство. Искомая π -схема Σ_n получается в результате присоединения к каждому из выходов $(1, 2^n)$ -КС $\Sigma_n^{(k)}$,

построенной при доказательстве леммы 6.2, контакта соответствующей ему информационной БП и отождествления концевых вершин всех таких контактов в выходную вершину Σ_n . Искомая СФЭ S_n получается из формулы с поднятыми отрицаниями $\tilde{\mathcal{F}}_n$, которая моделирует π -схему Σ_n (см. §4 гл. 2), в результате применения операций приведения (см. §1) для вершин, соответствующих $\Phi\mathcal{E} \neg$.

Для завершения доказательства леммы на основе разбиения Δ , введенного в лемме 6.2, и представления (6.3) построим для ФАЛ μ_n формулу $\tilde{\mathcal{F}}_n$ следующим образом

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{F}}_n(x_1, \dots, x_n, y_0, \dots, y_{2^n-1}) &= \\ &= \bigvee_{i=1}^{2^\lambda} \mathfrak{A}_i(x') \&_{\sigma'' \in B^{n-q}} \left(J_{\bar{\sigma}''}(x'') \vee \bigvee_{\sigma' \in \delta_i} x_{j_{\sigma'}}^{\alpha_{\sigma'}} y_{\nu(\sigma', \sigma'')} \right) \end{aligned} \quad (6.4)$$

где \mathfrak{A}_i — совершенная ДНФ ФАЛ χ_i , $i = 1, \dots, \lambda$, и $J_{\bar{\sigma}''}(x'') = \bar{K}_{\sigma''}(x'')$. Легко видеть, что $\tilde{\mathcal{F}}_n$ реализует мультиплексорную ФАЛ μ_n , бесповторна по БП y_0, \dots, y_{2^n-1} и что $\text{Alt}(\tilde{\mathcal{F}}_n) \leq 3$.

Пусть, далее, формула \mathcal{M}_n получается в результате оптимизации формулы $\tilde{\mathcal{F}}_n$ по глубине. Тогда при

$$n \geq 3 \text{ и } m = \left\lceil \log \left(\frac{n}{3} \right) \right\rceil$$

сложность и глубина \mathcal{M}_n будут удовлетворять условиям леммы. Действительно, если¹ $n \geq 6$, то $q \leq n - m$ и, следовательно,

$$\begin{aligned} R(\tilde{\mathcal{F}}_n) &= 2^{q-m} (q \cdot 2^m + 2^{n-q} ((n-q) + 2^{m+1})) \leq \\ &\leq 2^{n+1} + n \cdot 2^{n-m} \leq 2^{n+1} + 3 \cdot 2^n = 5 \cdot 2^n. \end{aligned}$$

При этом, очевидно,

$$L_{\neg}(\tilde{\mathcal{F}}_n) \leq \frac{1}{2} (R(\tilde{\mathcal{F}}_n) - 2^n) \leq 2^{n+1}$$

¹Случай $n \leq 5$ рассматриваются отдельно.

и, таким образом,

$$L(\tilde{\mathcal{F}}_n) \leq R(\tilde{\mathcal{F}}_n) + L_{\neg}(\tilde{\mathcal{F}}_n) - 1 \leq 7 \cdot 2^n - 1,$$

откуда в силу теоремы 2.1 главы 2 следует, что $D(\mathcal{M}_n) \leq n + 6$.

Лемма доказана. \square

Следствие. Из полученных оценок в силу следствий из леммы 2.5 вытекает, что

$$L^C(\mu_n) \sim 2^{n+1}, \quad D(\mu_n) = n + O(1).$$

§7 Асимптотически наилучший метод синтеза формул в базисе $\{\&, \vee, \neg\}$. Поведение функции Шеннона для глубины ФАЛ.

Применим технику моделирования ФАЛ из ДУМ переменными для синтеза формул в стандартном базисе.

Теорема 7.1 (ср. [14]). Для любой ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, в \mathcal{U}^Φ существует реализующая ее формула \mathcal{F}_f , для которой

$$L(\mathcal{F}_f) \leq \frac{2^n}{\log n} \left(1 + \frac{2 \log \log n + O(1)}{\log n} \right), \quad (7.1)$$

$$D(\mathcal{F}_f) \leq n - \log \log n + 8 + o(1). \quad (7.2)$$

Доказательство. Пусть параметры m , s и p удовлетворяют соотношениям

$$s \leq 2^m, \quad p = \left\lceil \frac{2^m}{s} \right\rceil, \quad m + p \cdot 2^s \leq n,$$

а G — стандартное ДУМ порядка m и высоты s , для которого $|G| = \lambda \leq p \cdot 2^s$ (см. §5). Пусть, далее, $q = m + \lambda$ и, следовательно, $q \leq n$, а $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_{2^\lambda})$ — разбиение куба B^q , полученное по лемме 6.1 для системы ФАЛ \vec{G} .

Положим $x' = (x_1, \dots, x_q)$ и заметим, что произвольная ФАЛ h , $h \in P_2(q)$, на любой компоненте δ_i , $i \in [1, 2^\lambda]$, в силу ее m -регулярности совпадает с некоторой ФАЛ $\hat{h}(x_1, \dots, x_m)$. При этом ФАЛ \hat{h} равна дизъюнкции p ФАЛ из ДУМ G , каждая из которых в силу леммы 6.1 совпадает на δ_i с буквой одной из БП x_{m+1}, \dots, x_q . Следовательно, ФАЛ h совпадает на δ_i с ЭД ранга p от указанных БП.

Для ФАЛ $f(x)$ из $P_2(n)$, где $x = (x_1, \dots, x_n)$, $x'' = (x_{q+1}, \dots, x_n)$ рассмотрим ее представление в виде

$$\begin{aligned} f(x) &= \\ &= \bigvee_{\sigma''=(\sigma_{q+1}, \dots, \sigma_n)} x_{q+1}^{\sigma_{q+1}} \cdots x_n^{\sigma_n} \left(\bigvee_{i=1}^{2^{q-m}} \mathfrak{X}_i(x') f_{\sigma''}(x') \right) = \\ &= \bigvee_{i=1}^{2^{q-m}} \mathfrak{X}_i(x') \left(\bigvee_{\sigma''=(\sigma_{q+1}, \dots, \sigma_n)} x_{q+1}^{\sigma_{q+1}} \cdots x_n^{\sigma_n} J_{\sigma'', i}(x') \right), \quad (7.3) \end{aligned}$$

где $\mathfrak{X}_i(x')$ — характеристическая ФАЛ множества δ_i , $i = 1, \dots, 2^{q-m}$, а ЭД $J_{\sigma'', i}$ ранга p от БП x_{m+1}, \dots, x_q , совпадает на δ_i с ФАЛ $f_{\sigma''}(x') = f(x', \sigma'')$.

Построим для ФАЛ f на основе (7.3) формулу $\tilde{\mathcal{F}}_f$ с поднятыми отрицаниями, которая имеет вид

$$\tilde{\mathcal{F}}_f = \bigvee_{i=1}^{2^\lambda} \mathfrak{A}_i(x') \mathcal{M}_{n-q}(x'', J_{\tilde{0}, i}, \dots, J_{\tilde{1}, i}),$$

где $\mathcal{M}_{n-q}(x'', y_0, \dots, y_{2^{n-q}-1})$ — бесповторная по информационным БП формула из леммы 6.3, реализующая ФАЛ μ_{n-q} , а \mathfrak{A}_i , $i \in [1, 2^\lambda]$, — совершенная ДНФ ФАЛ \mathfrak{X}_i .

Пусть, далее, формула $\widehat{\mathcal{F}}_f$ получается из формулы $\tilde{\mathcal{F}}_f$ оптимизацией по глубине (см. §2 гл. 2), а формула \mathcal{F}_f — оптимизацией ЭД по числу отрицаний, то есть заменой каждой

ЭД $J_{\sigma'',i}$ вида $x_{j_1} \vee \dots \vee x_{j_t} \vee \bar{x}_{j_{t+1}} \vee \dots \vee \bar{x}_{j_p}$, где $t \leq p$, формулой $\widehat{J}_{\sigma'',i}$ вида $x_{j_1} \vee \dots \vee x_{j_t} \vee \overline{x_{j_{t+1}} \dots x_{j_p}}$, что увеличивает глубину не больше, чем на 1. Заметим, что число $\Phi\exists$ – во всех формулах \mathfrak{A}_i , $i \in [1, 2^\lambda]$, равно половине их суммарного ранга, что в каждой формуле вида $\widehat{J}_{\sigma'',i}$ имеется один $\Phi\exists$ –, и напомним (см. лемму 6.3), что $\text{Alt}(\mathcal{M}_{n-q}) \leq 3$, $R(\mathcal{M}_{n-q}) \leq 5 \cdot 2^{n-q}$ и $L_-(\mathcal{M}_{n-q}) \leq 2 \cdot 2^{n-q}$. Следовательно, в силу леммы 2.1 главы 2,

$$L_{\&, \vee}(\mathcal{F}_f) \leq 2^{q-m} (q \cdot 2^m + (p-1)2^{n-q} + 5 \cdot 2^{n-q}), \quad (7.4)$$

$$L_-(\mathcal{F}_f) \leq q \cdot 2^{q-1} + 3 \cdot 2^{n-m}. \quad (7.5)$$

Выбирая значения параметров m и s так, что

$$m = \lfloor 3 \log \log n \rfloor - 1, \quad s = \lfloor \log n - 2 \log \log n \rfloor - 1,$$

и подставляя эти значения в (7.4), (7.5), получим неравенство

$$L(\mathcal{F}_f) \leq \frac{2^n}{\log n - 2 \log \log n} + O\left(\frac{2^n}{\log^2 n}\right),$$

из которого для сложности формулы \mathcal{F}_f следует оценка (7.1). При этом из (7.1), учитывая то, что

$$L(\widehat{\mathcal{F}}_f) \leq 2L(\mathcal{F}_f), \quad D(\mathcal{F}_f) \leq D(\widehat{\mathcal{F}}_f) + 1 \quad \text{и} \quad \text{Alt}(\widehat{\mathcal{F}}_f) \leq 6,$$

с помощью теоремы 2.1 из §2 главы 2 непосредственно выводится неравенство (7.2).

Теорема доказана. \square

Следствие. Из (7.1) и (7.2), с учетом нижних оценок, следствия из леммы ??, вытекает, что

$$L^\Phi(n) \sim \frac{2^n}{\log n}, \quad D(n) = n - \log \log n \pm O(1).$$

§8 Асимптотически наилучший метод синтеза контактных схем

Заметим сначала, что асимптотически наилучший метод синтеза СФЭ из §5 без существенных изменений переносится на класс контактно-вентильных схем (КВС), в которых наряду с контактами можно использовать «вентили», то есть ориентированные ребра, проводящие только в направлении своей ориентации. Действительно, для любой ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, реализующая ее $(1, 1)$ -КВС $\tilde{\Sigma}_f$ может быть получена на основе разложения (3.5) так же, как и СФЭ Σ_f из теоремы 5.1. Она является результатом корректной суперпозиции вида $\tilde{\Sigma}_f = \Sigma''(\Sigma')$, где Σ'' — $(2^{n-q}, 1)$ -КД от БП x'' , а $(1, 2^{n-q})$ -КВС Σ' реализует систему всех ФАЛ вида $f_{\sigma''}(x')$, $\sigma'' \in B^{n-q}$. При этом схема Σ' по-прежнему содержит в качестве подсхемы $(1, \lambda)$ -КС Σ_G , реализующую систему ФАЛ \vec{G} на основе леммы 1.2, и реализует каждую ФАЛ $g(x')$ типа $f_{\sigma''}(x')$ на основе ее представления (5.1) в виде дизъюнкции $g = g_1 \vee \dots \vee g_p$ с помощью присоединения входов вентильной звезды порядка p к соответствующим выходам КС Σ_G (см. рис. 8.1a), которое является корректной суперпозицией. Сложность построенной КВС $\tilde{\Sigma}_f$ при тех же значениях параметров, что и в теореме 5.1, будет удовлетворять неравенству (5.5).

Напомним (см. §5), что в силу специфики стандартного ДУМ G вместо представления (5.1) для ФАЛ g можно использовать эквивалентное (5.1) представление (5.2) вида

$$g = \psi_1 \cdot g_1 \vee \dots \vee \psi_p \cdot g_p \quad (8.1)$$

и на его основе реализовать ФАЛ g с помощью корректной суперпозиции т.н. итеративно-контактных схем, показанной на рис. 8.1b, где ФАЛ ψ_1, \dots, ψ_p управляют проводимостью соответствующих контактов. Асимптотически наилучший метод синтеза КС связан с «моделированием» этой

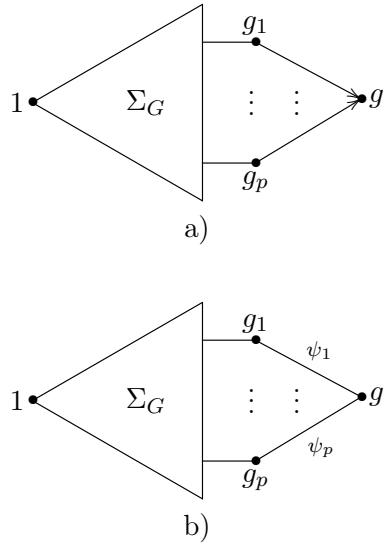


Рис. 8.1: Корректная реализация дизъюнкции ФАЛ
 g_1, \dots, g_p в классах КВС и ИКС

суперпозиции и представления (8.1) на компонентах подходящего m -регулярного разбиения куба B^{m+p} .

Пусть δ — m -регулярное множество наборов куба B^{m+p} , соответствующее системе ФАЛ $\vec{\psi} = (\psi_1, \dots, \psi_p)$ (см. рис. 8.2а), а $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_{2^p})$ — построенное для нее по лемме 6.1 разбиение куба B^{m+p} . Заметим, что любая ФАЛ g , $g \in P_2(m+p)$, на любой компоненте этого разбиения вида $\delta \oplus \alpha$, где

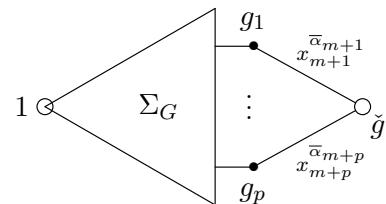
$$\alpha = (\underbrace{0, \dots, 0}_m, \alpha_{m+1}, \dots, \alpha_{m+p}),$$

совпадает с ФАЛ

$$\check{g} = x_{m+1}^{\bar{\alpha}_{m+1}} \cdot g_1 \vee \dots \vee x_{m+p}^{\bar{\alpha}_{m+p}} \cdot g_p, \quad (8.2)$$

	$x_1 \dots x_{m-1} x_m$	ψ_1	ψ_2	\dots	ψ_p	
π_1	0 \dots 0 0	1	0		0	
	0 \dots 0 1	1	0		0	
	\dots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	
	\dots	1	0		0	
π_2	\dots	0	1		0	
	\dots	0	1		0	
	\dots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	
	\dots	0	1		0	
π_p	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	
	\dots	0	0		1	
	\dots	0	0		1	
	\dots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	
	1 \dots 1 1	0	0		1	

a)



b)

Рис. 8.2: m -регулярное множество $\check{\delta}$ и связанная с ним суперпозиция КС

где $g_i = g\psi_i \in G^{(i)}$, $i = 1, \dots, p$. При этом ФАЛ \check{g} может быть реализована в результате операции присоединения звезды из контактов вида $x_{m+1}^{\bar{\alpha}_{m+1}}, \dots, x_{m+p}^{\bar{\alpha}_{m+p}}$ к выходам $(1, \lambda)$ -КС Σ_G , реализующей систему ФАЛ \vec{G} , так, как это показано на рис. 8.2б. Заметим также, что указанная операция суперпозиции является корректной на множестве наборов $\check{\delta} \oplus \alpha$ в силу того, что из контактов присоединяемой $(p, 1)$ -КС на любом наборе этого множества проводит только один.

Теорема 8.1 (ср. [14]). Для любой ФАЛ f , $f \in P_2(n)$, существует реализующая ее КС Σ_f такая, что

$$L(\Sigma_f) \leq \frac{2^n}{n} \left(1 + O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \right) \quad (8.3)$$

Доказательство. Пусть $q = m + p$, а $\Delta = (\delta_1, \dots, \delta_{2^p})$ — описанное выше разбиение куба B^q , с помощью которого ФАЛ f можно представить в виде

$$f(x', x'') = \bigvee_{i=1}^{2^p} \mathcal{X}_i(x') \bigvee_{\sigma''=(\sigma_{q+1}, \dots, \sigma_n)} x_{q+1}^{\sigma_{q+1}} \cdots x_n^{\sigma_n} \check{g}_{\sigma'', i}(x'), \quad (8.4)$$

где \mathcal{X}_i — характеристическая ФАЛ δ_i , а в качестве ФАЛ $f_{\sigma'', i}$ при всех $\sigma'', \sigma'' \in B^{n-q}$, и $i, i \in [1, 2^p]$, берется ФАЛ $\check{g}_{\sigma'', i}$ вида (8.2), совпадающая с ФАЛ $f_{\sigma''}(x')$ на компоненте $\delta_i = \check{\delta} \oplus \alpha$.

Пусть Σ_G — $(1, \lambda)$ -КС, которая реализует систему ФАЛ \vec{G} по их совершенным ДНФ на основе контактного дерева (см. лемму 1.2 и оценку (1.2)). Для каждого i , $i = 1, \dots, 2^p$, построим $(1, 2^{n-q})$ -КС Σ'_i (см. рис. 8.3а), которая содержит КС Σ_G в качестве подсхемы и реализует каждую ФАЛ $\check{g}_{\sigma'', i}$ вида (8.2) с помощью корректной на множестве наборов δ_i суперпозиции, показанной на рисунке 8.2б. Пусть, далее, $(1, 2^{n-m})$ -КС Σ' получается в результате отождествления входов у построенных выше КС Σ'_i , $i \in [1, 2^p]$, и реализует систему из всех ФАЛ вида $\check{g}_{\sigma'', i}$, где $\sigma'' \in B^{n-q}$, $i \in [1, 2^p]$.

Заметим, что при этом выполняются неравенства

$$\begin{aligned} L(\Sigma_G) &\leq \lambda 2^{m+1}, \\ L(\Sigma'_i) &\leq L(\Sigma_G) + p 2^{n-q}, \\ L(\Sigma') &\leq p 2^{n-m} + \lambda 2^{q+1}. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Построим, наконец, каскадную $(2^{n-m}, 1)$ -КС Σ'' , которая реализует столбец из всех ФАЛ вида $\mathcal{X}_i(x') \cdot x_{q+1}^{\sigma_{q+1}} \cdots x_n^{\sigma_n}$, где $i \in [1, 2^p]$ и $\sigma'' = (\sigma_{q+1}, \dots, \sigma_n) \in B^{n-q}$. Эта КС получается в результате объединения 2^p схем типа $(2^{n-q}, 1)$ -КД от БП x'' , к выходам которых присоединены входы $(2^p, 1)$ -КС, реализующей столбец из ФАЛ \mathcal{X}_i , $i \in [1, 2^p]$, и получающейся из $(2^q, 1)$ -КД от БП x' в результате соответствующего отождествления входов (см. рис. 8.3b). Легко видеть, что при этом

$$L(\Sigma'') \leq 2^{q+1} + 2^{n-m+1}. \quad (8.6)$$

Искомая КС Σ_f является результатом корректнойстыковки вида $\Sigma_f = \Sigma''(\Sigma')$, полученной в результате присоединения входов КС Σ'' к выходам КС Σ' в соответствии с представлением (8.4), сложность которой, в силу (8.5)–(8.6), удовлетворяет неравенству

$$L(\Sigma_f) \leq (p+2)2^{n-m} + (\lambda+1)2^{q+1}.$$

Из этого неравенства при

$$m = \left\lfloor \frac{3}{2} \log n \right\rfloor \quad \text{и} \quad s = \lceil n - 2\sqrt{n} \rceil,$$

при которых выполнены условия

$$s \leq 2^m, \quad p = \left\lceil \frac{2^m}{s} \right\rceil \quad \text{и} \quad q = m + p \leq n,$$

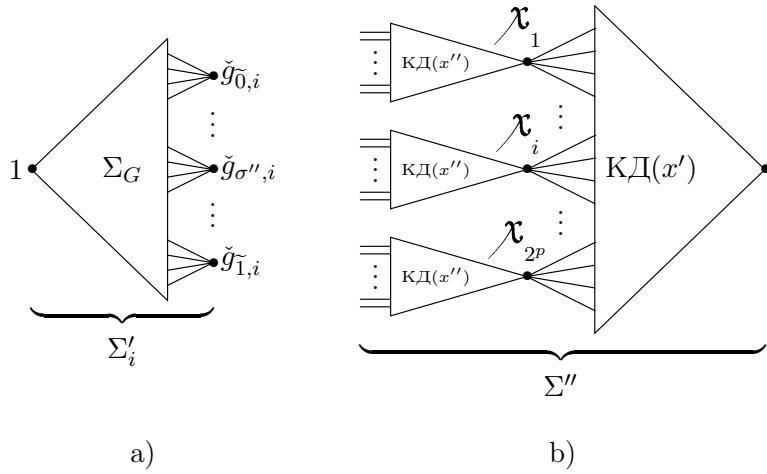


Рис. 8.3: к доказательству теоремы 8.1

вытекает неравенство (8.3) для сложности Σ_f , так как

$$\begin{aligned}
 (p+2)2^{n-m} &\leq \frac{2^n}{s} + 3 \cdot 2^{n-m} = \frac{2^n}{n} \left(1 + O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \right), \\
 (\lambda+1)2^{q+1} &\leq p2^s \cdot 2^{m+p+2} \leq \frac{2^{2m+s+p+3}}{s} \leq \\
 &\leq \frac{32}{s} 2^{n-\sqrt{n}+3\log n} = o\left(\frac{2^n}{n\sqrt{n}}\right).
 \end{aligned}$$

Теорема доказана. \square

Следствие. Из (8.3) с учетом нижней оценки (4.13) вытекает, что

$$L^K(n) \sim \frac{2^n}{n}.$$

Замечание. Построенную КС Σ_f можно разбить на не более,

чем

$$\lambda p \cdot 2^p + 2^{n-m+1} + (\lambda + 1)2^{q+1} = O\left(\frac{2^n}{n\sqrt{n}}\right)$$

«звезд», каждая из которых состоит из контактов одного и того же типа. Для этого достаточно контакты всех звезд, показанных на рис. 8.2б, перераспределить в звезды из однотипных контактов, «центрами» которых являются выходы подсхем Σ_G схем Σ'_i , $i = 1, \dots, 2^{q-m}$, а любой из остальных контактов КС Σ_f считать отдельной звездой.

Литература

- [1] Алексеев В. Б. Введение в теорию сложности алгоритмов. М.: Издательский отдел ф-та ВМиК МГУ, 2002.
- [2] Алексеев В. Б., Вороненко А. А., Ложкин С. А., Романов Д. С., Сапоэженко А. А., Селезнева С. Н. Задачи по курсу «Основы кибернетики». Издательский отдел ф-та ВМиК МГУ, 2002.
- [3] Алексеев В. Б., Ложкин С. А. Элементы теории графов, схем и автоматов. М.: Издательский отдел ф-та ВМиК МГУ, 2000.
- [4] Боровков А. А. Курс теории вероятностей. М.: Наука, 1976.
- [5] Гаврилов Г. П., Сапоэженко А. А. Задачи и упражнения по дискретной математике. 3-е изд., перераб. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [6] Дискретная математика и математические вопросы кибернетики, под редакцией С. В. Яблонского и О. Б. Лупанова. Т. 1. М.: Наука, 1974.
- [7] Евдокимов А. А. О максимальной длине цепи в единичном n -мерном кубе // Матем. заметки. 1969. 6. №3. С. 309–319.
- [8] Емеличев В. А., Мельников О. И., Сарванов В. И., Тышкевич Р. И. Лекции по теории графов. М.: Наука, 1977.

- [9] Журавлев Ю. И. Локальные алгоритмы вычисления информации // Кибернетика. №1. 1965. С. 12–19.
- [10] Журавлев Ю. И. Теоретико-множественные методы в алгебре логики // Проблемы кибернетики. Вып. 8. М.: Физматгиз, 1962. С. 5-44.
- [11] Кузьмин В. А. Оценки сложности реализации функций алгебры логики простейшими видами бинарных программ // Сб. «Методы дискретного анализа в теории кодов и схем». Новосибирск, 1976. Вып. 29. С. 11–39
- [12] Ложкин С. А. Оценки высокой степени точности для сложности управляющих систем из некоторых классов // Математические вопросы кибернетики. Вып. 6. М.: Наука, 1996. С. 189–214.
- [13] Ложкин С. А. Структурное моделирование и декомпозиция для некоторых классов схем. М.: Издательский отдел ф-та ВМиК МГУ, 2001.
- [14] Лупанов О. Б. Асимптотические оценки сложности управляющих систем. М.: Изд-во МГУ, 1984.
- [15] Лупанов О. Б. О сложности реализации функций алгебры логики релейно-контактными схемами // Проблемы кибернетики. Вып. 11. М.: Наука, 1964. С. 25–48.
- [16] Лупанов О. Б. О сложности реализации функций алгебры логики формулами // Проблемы кибернетики. Вып. 3. М.: Физматгиз, 1960. С. 61–80.
- [17] Лупанов О. Б. Об одном подходе к синтезу управляющих систем — принципе локального кодирования.

- // Проблемы кибернетики. Вып. 14. М.: Наука, 1965. С. 31–110.
- [18] *Мурога С.* Системы проектирования сверхбольших интегральных схем. М.: Мир, 1985.
- [19] *Нечипорук Э. И.* О топологических принципах самокорректирования // Проблемы кибернетики. Вып. 21. М.: Наука, 1969. С. 5–102.
- [20] *Нигматуллин Р. Г.* Сложность булевых функций. М.: Наука, 1991.
- [21] *Поваров Г. Н.* Метод синтеза вычислительных и управляющих контактных схем // Автоматика и телемеханика. 1957. Т. 18. №2. С. 145–162.
- [22] *Сапоженко А. А.* Дизъюнктивные нормальные формы. М.: Изд-во МГУ, 1975.
- [23] *Сапоженко А. А.* Некоторые вопросы сложности алгоритмов. Издательский отдел ф-та ВМиК МГУ, 2001.
- [24] *Сапоженко А. А., Лоэскин С. А.* Методы логического проектирования и оценки сложности схем на дополняющих МОП-транзисторах // Микроэлектроника. 1983. Т. 12. №1. С. 42–47.
- [25] *Фихтенгольц Г. М.* Основы математического анализа, том 1. М.: Наука, 1968.
- [26] *Фихтенгольц Г. М.* Основы математического анализа, том 2. М.: Наука, 1964.
- [27] *Чегис И. А., Яблонский С. В.* Логические способы контроля работы электрических схем // Труды МИ АН СССР. Т. 51. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 270–360.

- [28] Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1986.
- [29] Яблонский С. В. Надежность управляющих систем. М.: Изд-во МГУ, 1991.
- [30] Яблонский С. В. Некоторые вопросы надежности и контроля управляющих систем // Математические вопросы кибернетики. Вып. 1. М.: Наука, 1988. С. 5–25.
- [31] Яблонский С. В. Эквивалентные преобразования управляющих систем. М.: Изд-во МГУ, 1986.
- [32] Cardot C. Quelques résultats sur l'application de l'algèbre de Boole à la synthèse des circuits à relais // Ann. Telecommunications. 1952. V.7. №2. P. 75–84.
- [33] Shannon C. E. The synthesis of two-terminal switching circuits // Bell Syst. Techn. J. 1949. V. 28. №1. P. 59–98 (Русский перевод: Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963. С. 59–101).
- [34] Wegener I. Branching programs and binary decision diagrams. SIAM Publishers, 2000.