

# НАСТРАИВАЕМЫЕ МОДУЛИ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ С ДВУСТОРОННЕЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

## 7-1. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ. С ДВУСТОРОННЕЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

В предыдущих главах были рассмотрены НЛМ из ФЭ, обладающих односторонней проводимостью. В данной главе исследуется вопрос о применении элементов с двусторонней проводимостью при построении и использовании НЛМ.

Интерес к классу элементов с двусторонней проводимостью связан не только с тем, что контактные элементы все еще являются основной элементной базой большого числа систем логического управления, используемых в промышленности, но и с тем, что с каждым годом все расширяется сфера применения магнитоуправляемых контактов ввиду их перспективности.

Схемы логического управления, построенные из ЭДП, обладают принципиальными отличиями по сравнению с аналогичными схемами из ФЭ:

а) исполнительные цепи ЭДП в замкнутом состоянии проводят ток в обоих направлениях. Это свойство наиболее ярко проявляется в диагональных элементах мостиковых схем. Таким образом, понятие о направлении распространения сигнала в схемах таких элементов не является таким же естественным, как в схемах из ФЭ, в которых сигнал распространяется от входа к выходу; б) в схемах из ЭДП входные элементы (например, обмотки реле) и исполнительные элементы (например, контакты) служат лишь для подачи логических переменных, в то время как реализация логических формул выполняется путем внешних соединений. При этом существенным является тот факт, что переменные подаются как в управляющие, так и в исполнительные цепи, что невозможно в схемах из ФЭ;

в) при использовании ФЭ реализация формул осуществляется в результате суперпозиции подформул, которая приводит к тому, что число входов в построенной схеме меньше суммарного числа входов применяемых элементов, в то время как в схемах ЭДП (при реализации булевых формул путем объединения исполнительных цепей) суммарное число входов элементов равно числу входов в реализуемой схеме, что приводит к сокращению числа элементов, требующихся для построения заданной формулы;

г) ЭДП в настоящее время обладают существенно большими габаритами по сравнению с ФЭ в микроэлектронном исполнении.

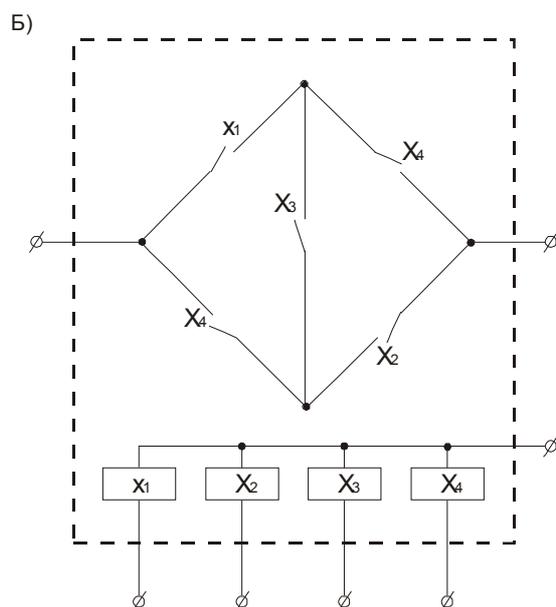
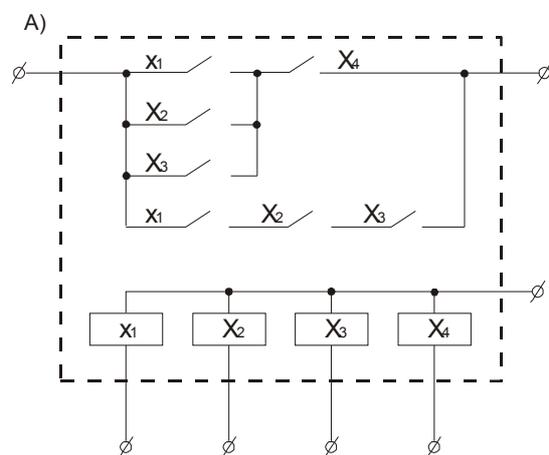
Указанные различия приводят к тому, что разработка НЛМ ЭДП должна выполняться на других принципах, чем разработка модулей из ФЭ. Так, например, при разработке модулей из релейно-контактных элементов определяющее значение имеет мнение о габаритах, и поэтому основное внимание должно уделяться выбору наиболее простой структуры; оптимизация же числа внешних выводов при этом переходит на второй план. При этом, так как избыточность по числу элементов в таких модулях должна быть минимальна или совсем отсутствовать, их настройка в основном должна осуществляться за счет избыточности по числу внешних выводов.

Таким образом, изменение критерия оптимизации требует другого подхода к построению и использованию НЛМ из ЭДП по сравнению с соответствующими методами, изложенными предыдущих разделах для модулей из ФЭ. Продемонстрируем это на примере.

В гл. 3 приведена ПФ модуля, универсального для класса формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из трех букв, которая имеет следующий вид:

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = (x_1 \vee x_2 \vee x_3)x_4 \vee x_1x_2x_3.$$

НЛМ, соответствующий этой ПФ, при реализации его из ФЭ, обладает минимально возможной избыточностью по числу внешних выводов, так как заданные формулы из трех букв реализуются схемой, имеющей всего лишь четыре входа.



Элементарная избыточность этого модуля не имеет практического значения ввиду предположения, что модуль из ФЭ реализуется средствами микроэлектронной интегральной технологии.

Реализуем найденную ПФ на релейно-контактных элементах. На рис. 7-1, а приведена реализация этой функции параллельно-последовательной контактной схемой, а на рис. 7-1, б – мостиковой схемой.

Полученные схемы, обладая минимально возможной избыточностью по числу внешних выводов, имеют большую избыточность по числу контактов. При этом для первой схемы избыточность по числу контактов равна  $\frac{7}{3}$ , для второй -  $\frac{5}{3}$ , что ограничивает их применение на практике. Поэтому возникает необходимость в разработке нового класса НЛМ из ЭДП, обладающих минимальной элементарной избыточностью.

## 7-2. ВЫБОР СТРУКТУРЫ НАСТРАИВАЕМЫХ МОДУЛЕЙ ИЗ ЭДП

в настоящем параграфе рассматривается новый класс НЛМ, формирование которого основано на использовании свойств ЭДП. Это позволяет обеспечить их построение без избыточности по числу элементов или с минимальной избыточностью. Рассмотрение модулей этого класса будет выполняться на примере релейно-контактных устройств, однако результаты, полученные при этом, будут справедливы также и для других типов элементов, исполнительные цепи которых обладают двусторонней проводимостью.

В качестве основной структуры НЛМ из ЭДП предлагается конфигурация, представленная на рис. 7-2.

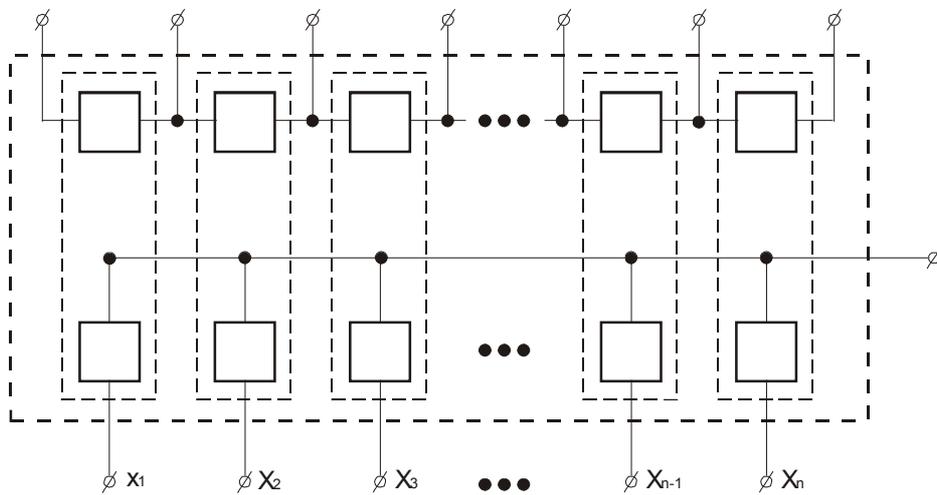


Рис. 7-2. Настраиваемый модуль типа цепочки

Эта структура образована из элементов (реле), у которых исполнительные цепи (контакты), обладающие двусторонней проводимостью, соединены последовательно, причем точки их объединения и крайние выходы структуры соединены с внешними выводами модуля. Структуру такого вида будем в дальнейшем называть цепочкой. Управляющие цепи (обмотки) либо объединяются звездой (в случае, если обмотки нескольких реле имеют общую точку, соединенную с одним из внешних выводов модуля), либо не связываются между собой. Возможны также промежуточные варианты, когда часть обмоток соединяются звездой, а остальные не связываются. Отметим, что способ соединения обмоток зависит от принятой организации «раздачи» питания (централизованное или от разных источников). Настройка таких модулей может осуществляться как со стороны входов (обмоток), так и со стороны выходов (контактов) (рис. 7-3). При этом во входных цепях в качестве операций настройки используются подача констант 0 и 1 и отождествление входов, а в выходных – отождествление выходов путем наложения перемычек. В модулях этого типа настройка выходных цепей является основной, что принципиально отличает их от одновыходных модулей из ФЭ, которые могут настраиваться только со стороны входов. Предлагаемые модули отличаются также и от многовыходных модулей из ФЭ, так как в последних настройка со стороны выхода сводится к выбору того или иного выхода и осуществляется без внешней коммутации.

Исследуем функциональные возможности предложенных модулей. Для этого первоначально рассмотрим цепочку из двух контактов. Очевидно, что она позволяет реализовать путем настройки каждого представителя  $PN$ -типов неповторных формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\quad}\}$  из двух букв ( $y_1 = x_1x_2, y_2 = x_1 \vee x_2$ ). При этом для реализации первого представителя наложение перемычек не требуется, а второй реализуется с помощью одной перемычки. Дальнейшее исследование функциональных возможностей

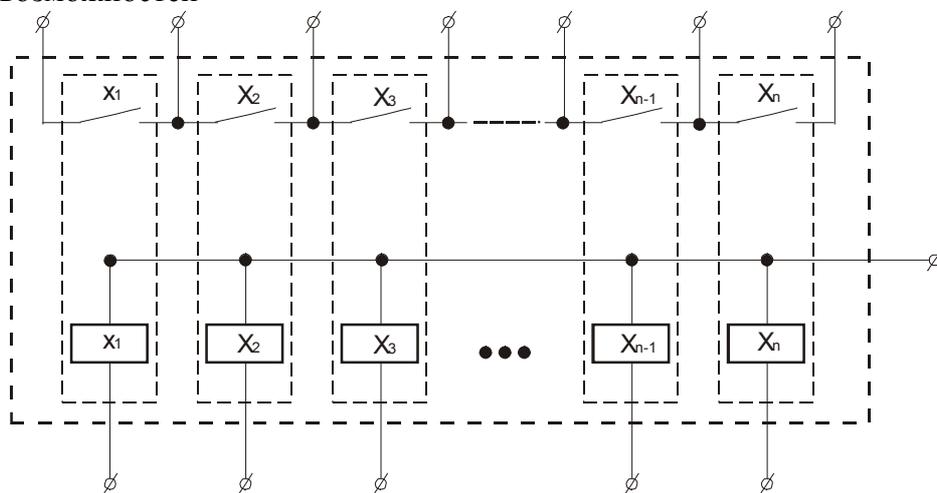


Рис. 7-3. Настраиваемый модуль из релейно-контактных элементов

предложенных модулей показало, что цепочка из трех контактов реализует путем настройки любого из четырех представителей указанного класса формул из трех букв, цепочка из четырех контактов – любого из 10 представителей этого же класса формул из четырех букв, а цепочки из пяти и шести контактов соответственно любого из 24 и 66 представителей этого класса из пяти и шести букв.

Из сказанного следует, что предложенные модули из  $l$  контактов универсальны для класса формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $t = h$  букв при  $l \leq 6$ . Сравнивая, например, элементную сложность такого модуля, универсального для класса формул из трех букв (три контакта), со сложностью модулей, построенных в предыдущем параграфе на основе порождающей функции (семь и пять контактов), можно сделать вывод о высокой эффективности предлагаемых модулей по этому критерию.

Выполним сопоставление предложенных модулей с контактами, используемыми «россыпью».

Сравнение результатов реализации двухполюсных параллельно-последовательных схем из шести и менее контактов в базисе цепочки и в базисе контактов, используемых «россыпью», по числу внешних выводов и перемычек показало, что цепочка обеспечивает реализацию этих схем при существенно меньших значениях этих показателей [54].

Таким образом, в этом классе схем связанная цепочка контактов и контакты «россыпью», обладающие всеми степенями свободы соединений, имеют одинаковые функциональные возможности.

Так как цепочка обладает однородной структурой, а любая параллельно-последовательная схема из  $d \leq 6$  контактов реализуется в цепочке из  $l = d$  контактов, то можно утверждать, что для реализации указанного класса схем предложена однородная настраиваемая структура, в которой избыточность по числу элементов отсутствует даже на уровне электроэлементов.

Необходимо отметить, что это положение противоречит устоявшейся точке зрения в этой области, так как обычно утверждается, что возможность настройки, в особенности при однородности структуры, связана с избыточностью по числу элементов.

Для предложенной структуры такая избыточность возникает лишь при  $h \geq 7$ . При этом 179 из 180 представителей  $PN$ -типов формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из семи букв безызыточно реализуется путем настройки цепочки из семи контактов, но существует один тип формул:  $y = [(x_1 \vee x_2)x_3 \vee (x_4 \vee x_5)x_6]x_7$ , который требует для своей реализации цепочку из восьми контактов. При увеличении значения  $h$  доля формул, реализуемых цепочкой из контактов безызыточно, уменьшается. Так, при  $h = 8$  из представителей 522  $PN$ -типов формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  цепочка из восьми контактов позволяет реализовать представителей лишь 518 типов формул, в то время как представители остальных четырех типов:

$$y_1 = [(x_1 \vee x_2)x_3 \vee (x_4 \vee x_5)x_6]x_7x_8; y_2 = [(x_1 \vee x_2)x_3x_4 \vee (x_5 \vee x_6)x_7]x_8; y_3 = [(x_1x_2 \vee x_3)x_4 \vee (x_5 \vee x_6)x_7]x_8; \\ y_4 = [(x_1 \vee x_2)x_3 \vee (x_4 \vee x_5)x_6 \vee x_7]x_8$$

- требуют для своей реализации цепочку из девяти контактов.

Возможность настройки предложенной структуры существует за счет избыточности по числу внешних выводов по сравнению с не настраиваемой схемой, подлежащей реализации. Это наглядно видно на примере реализации формулы  $y = x_1x_2x_3 \dots x_{l-1}x_l$ . Действительно, в этом случае цепочка имеет  $l + 1$  внешних выводов, в то время как не настраиваемая схема, реализующая ту же формулу, лишь два.

Из сказанного выше следует, что предложенная структура при  $l \leq 6$  может рассматриваться как НЛМ, универсальный для класса формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $K = l$  букв, при условии равнодоступности прямых и инверсных выходов *III*.

При неравнодоступности выходов *III* в качестве модуля, универсального для указанного класса формул при  $h \leq 6$ , предлагается использовать цепочечную структуру из  $2h$  реле, полученную путем объединения двух цепочек, первая из которых содержит  $h$  одноконтактных реле с замыкающими контактами, а вторая -  $h$  одноконтактных реле с размыкающими контактами (рис. 7-4). Необходимо отметить, что при реализации формул из  $h$  букв в базисе такой структуры лишь на  $h$  обмоток подаются информационные сигналы, в то время как на остальные  $h$  обмоток сигнал либо не подается (константа 0), либо подается постоянный сигнал (константа 1). При этом константа 1 должна

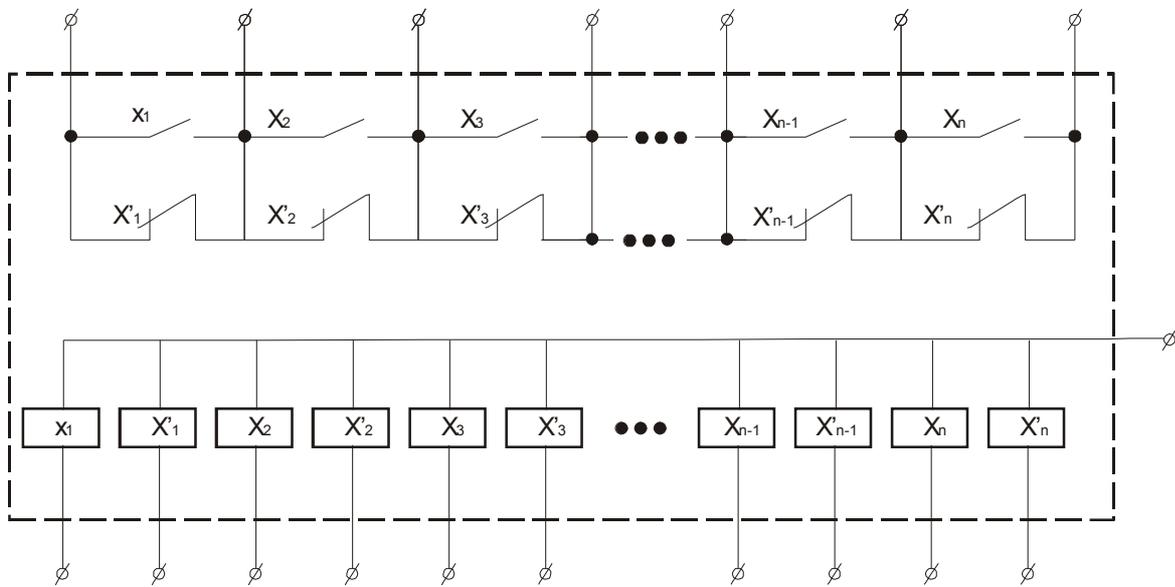


Рис. 7-4. Настраиваемый модуль из двух цепочек реле

быть подана на  $h'$  обмоток, где  $h'$  - число букв без инверсий в реализуемой формуле.

Таким образом, для предложенной структуры характерна двойная элементная избыточность при большом числе внешних выводов, что обычно неприемлемо на практике.

Меньшей избыточностью обладает структура из  $h$  реле, каждое из которых имеет по одному замыкающему и одному размыкающему

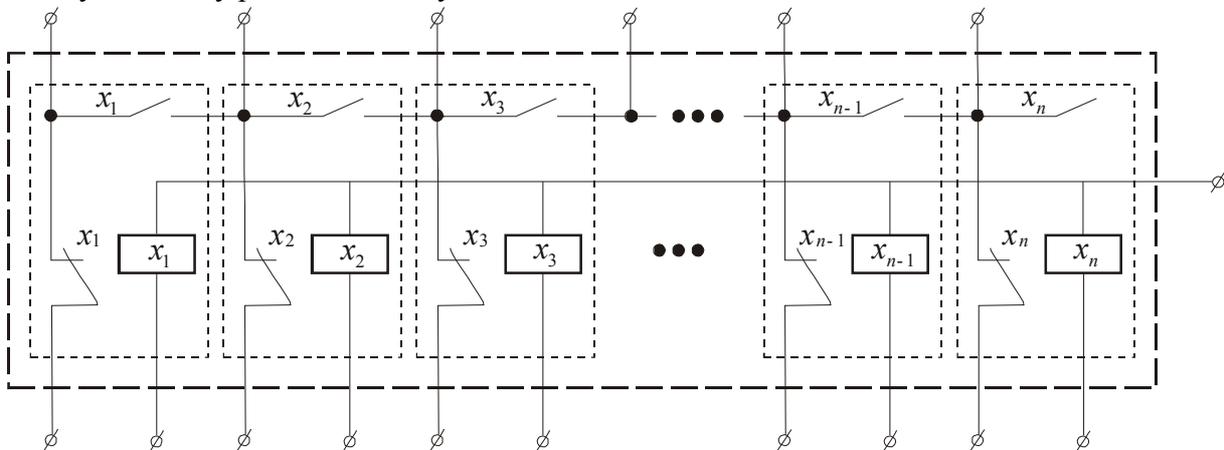


Рис. 7-5. Настраиваемый модуль из замыкающих и размыкающих контактов

контакту (либо по одному переключающему контакту), причем замыкающие контакты соединены в цепочку (рис. 7-5). Исследование функциональных возможностей такой структуры показало, что схема из двух реле позволяет путем настройки в выходных цепях реализовать любого из шести представителей  $P$ -классификации формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из двух букв, а схема из трех реле - любого из 20 представителей этого класса формул из трех букв.

В заключение необходимо отметить, что предложенные модули обладают высокой контролепригодностью, так как промежуточные выводы обеспечивают возможность проверки каждого контакта в структуре в отдельности.

### 7-3. ПОСТРОЕНИЕ СХЕМ ИЗ ЭДП В БАЗИСЕ НАСТРАИВАЕМЫХ МОДУЛЕЙ

В гл. 4 был описан метод реализации произвольных нормальных булевых формул из  $h$  букв, заданных в булевом базисе, на основе НЛМ из ФЭ, универсальных для того же класса формул из  $K$  букв. При этом было показано, что число таких модулей в схеме удовлетворяет неравенству

$$\left\lceil \frac{h-1}{K-1} \right\rceil \leq L \leq \left\lceil \frac{2(h-1)}{K} \right\rceil. \quad (7-1)$$

В предыдущем параграфе, в свою очередь, мы установили, что модули из  $l \leq 6$  ЭДП по своим функциональным возможностям эквивалентны модулям из ФЭ, универсальным для класса формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $K = l$  букв. Поэтому для реализации формул в булевом базисе из  $h$  букв  $h > 1$  с помощью модулей из ЭДП может быть использован предложенный выше метод реализации. При этом для случая  $l \leq 6$  справедлива оценка сложности предстоящей реализации, которая задается неравенством

$$\left\lceil \frac{h-1}{l-1} \right\rceil \leq L' \leq \left\lceil \frac{2(h-1)}{l} \right\rceil. \quad (7-2)$$

Пример. Реализовать формулу

$$y = (x_1 \vee x_2)x_3 \vee x_4x_5$$

в базисе НЛМ из трех контактов.

Ввиду того что в данном случае  $h = 5$  и  $l = 3$ ,

$$2 \leq L' \leq 3.$$

На рис. 7-6, а представлена структурная схема, реализующая данную формулу, а на рис. 7-6, б - соответствующая принципиальная схема, построенная из двух цепочек.

Несмотря на возможность применения указанного метода, ориентированного на использование функциональных возможностей модулей для класса формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$ , он в большинстве случаев не является оптимальным для схем из ЭДП ввиду их специфики. Ограниченность его объясняется тем, что:

а) при его использовании свойство двусторонней проводимости учитывается лишь в пределах каждого отдельного модуля из ЭДП на этапе настройки, а далее он выступает в качестве модуля из ФЭ. При этом реализация формул из  $h > l$  букв осуществляется путем соединения входов и выходов модулей, что неэффективно для ЭДП, так как их объединение возможно путем присоединения исполнительных цепей ЭДП таким образом, чтобы суммарное число входов элементов было равно числу входов в собранной из них схеме, чего нет в схемах из ФЭ;

б) в схемах из ФЭ, если в каком-либо модуле с  $l$  входами используется лишь  $K$  входов, считая слева направо, то все  $l - K$  незадействованных входов являются избыточными. В свою очередь, если применяется цепочка из  $l$  ЭДП и в ней используются лишь первые  $K$  элементов, то существует возможность изоляции этих элементов от остальных с помощью всего лишь одного элемента,

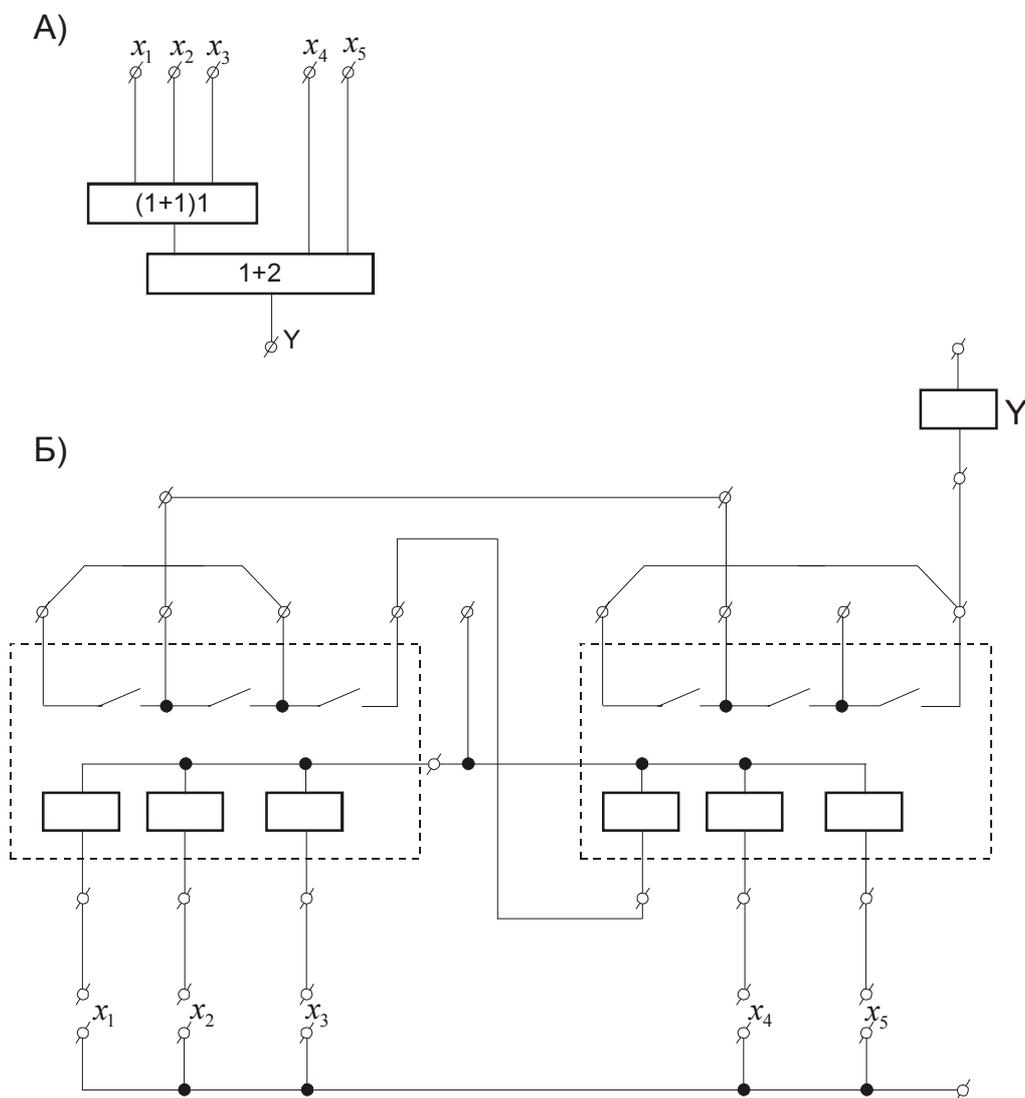


Рис. 7-6. Схема из настраиваемых модулей: а - структурная; б - контактная

являющегося избыточным; при этом остальные  $l - K - 1$  ЭДП могут применяться независимо от первых  $K$  элементов;

в) предложенные в предыдущем параграфе модули из ЭДП являются многовыходными и позволяют поэтому реализовывать при настройке системы булевых формул, однако рассмотренный выше метод реализации не ориентирован на использование многовыходных модулей;

г) в ряде случаев оптимальная схема из ЭДП принадлежит к классу мостиковых схем, для которых описание в виде булевых формул неадекватно структуре схемы;

д) в схемах из ЭДП значительный процент логических операций может быть реализован непосредственно на контактах ключей управления и сигнализаторов. Это приводит к тому, что после удаления контактов этих устройств оставшаяся подсхема может обладать такой структурой, которая не описывается ни одной булевой формулой, ни системой формул.

Пример. Пусть контактная схема реализует формулу  $y = (x_1 x_2 \vee x_3) x_4$  (рис. 7-7, а), причем переменная  $x_1$  подается с помощью контакта сигнализатора. Исключим этот контакт из схемы; при этом реализации в контактном базисе подлежит конфигурация (рис. 7-7, б), которая не может быть описана на языке булевой алгебры.

Перечисленные особенности приводят к необходимости разработки нового метода рационального использования модулей из ЭДП, который должен быть ориентирован не на функциональные свойства реализуемых формул и применяемых модулей, а на топологические особенности схем, подлежащих реализации, и собственно модулей. При этом модули из ЭДП должны настраиваться не на булевы формулы, а на конфигурации реализуемых схем.

При синтезе схем на модулях из ФЭ исходными данными являлись: формула, подлежащая реализации, и набор формул, реализуемых модулями. Отметим, что исходная формула при этом

получалась традиционными методами [43], а использование модулей никак не влияло на способы ее построения, минимизации и т.д. Аналогично, при синтезе схем на модулях из ЭДП будем предполагать, что в качестве исходной задана «контактная» схема, построенная с помощью какого-либо известного метода синтеза [13]. Эту схему предстоит «покрыть» модулями, не внося в нее никаких изменений. Задачу «покрытия» рассмотрим для четырех разновидностей модулей: а) единой цепочки, длина которой теоретически не ограничена; б) совокупности цепочек длиной  $l'$ ; в) совокупности цепочек, длина которых определяется в ходе процесса реализации; г) совокупности цепочек, номенклатура которых фиксирована, суммарное число контактов равно числу контактов в реализуемой схеме.

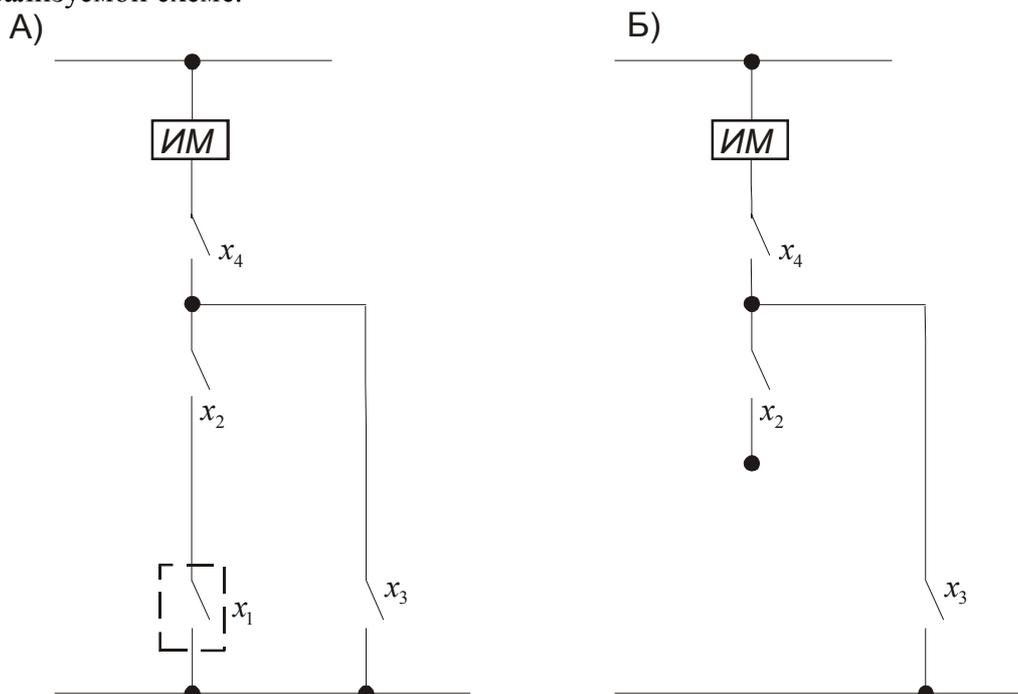


Рис. 7-7. Схема управления исполнительным механизмом (ИМ): а - с сигнализатором; б - без сигнализатора

Остановимся на решении сформулированной задачи для первой разновидности модулей. Использование остальных типов модулей базируется на результатах, получаемых для единой цепочки.

Суть излагаемого подхода в том, что при реализации схемы предлагается полностью отвлечься от свойств реализуемых функций и все внимание уделить рассмотрению топологических характеристик заданной схемы и используемых модулей. Назовем такой подход топологическим. Реализуемую схему будем рассматривать как граф, ребрами которого являются элементы исполнительных цепей (контакты), а вершинами - соединения. Между ними. В свою очередь, цепочку будем рассматривать как линейный граф. Внешние выводы (вершины) цепочки (линейного графа) могут взаимно соединяться с помощью внешних перемычек (дополнительных ребер), образуя при этом схемы (графы) различной конфигурации.

Отмеченные аналогии позволяют использовать некоторые результаты теории эйлеровых графов для решения задачи реализации заданной схемы с помощью единой цепочки [22]. Решение этой задачи состоит из трех основных этапов: а) «покрытия» заданной схемы цепочкой - определения эйлерова маршрута в заданной схеме; б) нумерации определенным образом выводов контактов, образующих эйлеров маршрут; в) объединения выводов цепочки в соответствии с введенной нумерацией и структурой реализуемой схемы.

Первый этап реализации, как указано выше, выполняется на основе использования свойств эйлеровых графов. Сформулируем некоторые из этих свойств применительно к контактному схематическому решению. (Доказательства этих свойств аналогичны соответствующим доказательствам, известным из теории эйлеровых графов, и поэтому в настоящем параграфе не приводятся.)

*Контактную схему, которой соответствует эйлеров граф, будем называть эйлеровой, или уникальной (проходимой).* Такие схемы названы уникальными ввиду того, что для них существует возможность непрерывного «прохождения» всех контактов, без повторения какого-либо из этих контактов. Поэтому уникальные схемы могут быть «пройдены» без отрыва руки от бумаги.

Последовательность контактов, «проходимых» в результате обхода уникурсальной схемы, назовем эйлеровым маршрутом.

Число узлов в схеме, образованных нечетным количеством контактов, четно. Схема является уникурсальной, если число узлов в ней, образованных нечетным числом контактов, равно 0 или 2. Если схема содержит два нечетных узла, то ее можно «пройти» только в случае, когда ее обход начинается из одного из нечетных узлов (при этом обход должен завершиться в другом нечетном узле схемы). Если нечетные узлы в схеме отсутствуют, то всегда существует возможность «пройти» схему, начиная обход из любого узла.

Выше были указаны критерии существования эйлерова маршрута в схеме. Для практического выявления этого маршрута необходим соответствующий алгоритм. Из теории графов известен алгоритм Хоанг Туи для выявления эйлеровой цепи в случае, если граф содержит две нечетные вершины, который может без изменения быть использован для определения эйлерова маршрута в контактной схеме, содержащей два нечетных узла [22].

**Алгоритм Хоанг Туи.** Пусть  $x$  и  $y$  - две вершины (не обязательно различные) связанного графа  $G$ . При этом все отличные от  $x$  и  $y$  вершины  $G$  обладают четными степенями, а степени вершин  $x$  и  $y$  (в случае  $x \neq y$ ) нечетны. Применение к такому графу излагаемого ниже алгоритма позволяет всегда получить некоторую эйлерову цепь, проходящую между  $x$  и  $y$ .

1. Находим простую цепь  $\theta$ , соединяющую  $x$  и  $y$ ; если ее длина больше нуля (т.е. искомая эйлерова цепь не является циклом), то все ребра цепи  $\theta$  помечаем цифрой 0.

2. Если в  $G$  имеются непомеченные еще ребра, то среди них выбираем такое ребро  $u$ , которое инцидентно хотя бы одной вершине цепи  $\theta$ . В подграфе, порожденном всеми непомеченными ребрами, выявляем простой цикл, содержащий ребро  $u$ , и все ребра этого цикла помечаем цифрой 1.

3. Если в  $G$  остались непомеченные ребра, то из них выбираем такое ребро  $v$ , которое смежно хотя бы с одним помеченным. В подграфе, порожденном непомеченными ребрами, выявляем простой цикл, содержащий ребро  $v$ , и все ребра этого цикла помечаем цифрой 2 и т. д. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут помечены все ребра  $G$ .

4. После этого строим маршрут следующим образом. В качестве начальной вершины выбираем  $x_0 = x$ . Если уже построен маршрут  $x_0 u_1 x_1 u_2 x_2 \dots x_{k-1} u_k x_k$  ( $k \geq 0$ ), в котором все ребра  $u_1, u_2, \dots, u_k$  различны, то в случае, если  $k = m$ , где  $m$  - число ребер в графе  $G$ , процесс прекращаем, а в случае, если  $k < m$ , среди ребер, инцидентных вершине  $x_k$  и не совпадающих ни с одним из  $u_1, u_2, \dots, u_k$ , выбираем такое ребро, которое помечено наибольшей цифрой (если таких ребер несколько, то выбираем любое из них), и добавляем его к маршруту в качестве  $u_{k+1}$ , а за  $x_{k+1}$  выбираем ту вершину, с которой выбранное ребро соединяет вершину  $x_k$  (возможен случай  $x_{k+1} = x_k$ , когда  $u_{k+1}$  - петля).

Можно доказать, что описанный процесс действительно осуществим и результирующий маршрут будет эйлеровой цепью между  $x$  и  $y$ .

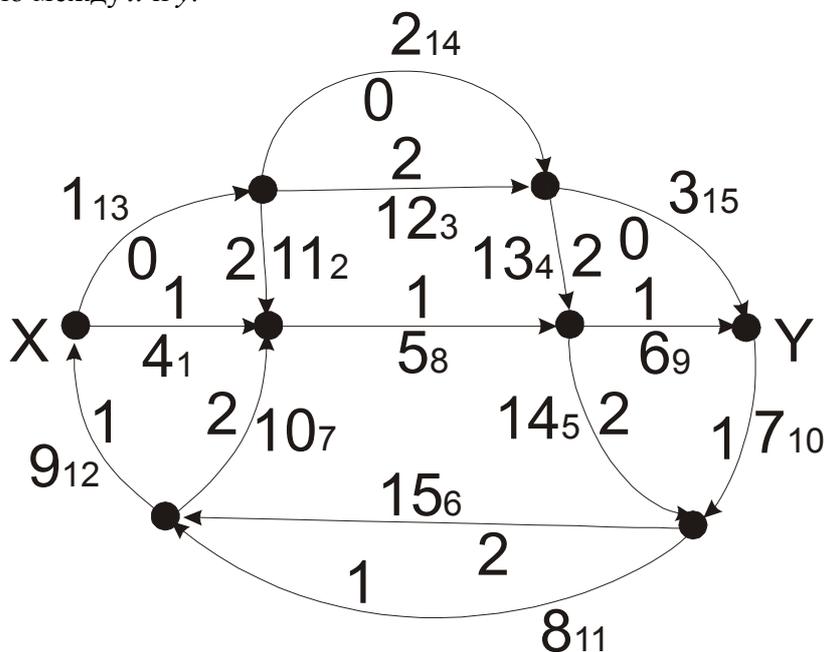


Рис. 7-8. Определение эйлеровой цепи в графе

Пример. Пользуясь алгоритмом Хоанг Туи, построить эйлерову цепь для графа, представленного на рис. 7-8.

1. В качестве простой цепи, соединяющей вершины  $x$  и  $y$ , выбираем маршрут, включающий ребра с номерами 1, 2, 3. Помечаем их значком 0.

2. Так как в графе имеются не помеченные еще ребра, то среди них выбираем ребро 4, которое инцидентно вершине  $x$ . В подграфе, порожденном непомеченными ребрами, выявляем простой цикл, содержащий ребро 4, 4-5-6-7-8-9. Все ребра этого цикла помечаем цифрой 1.

3. Так как в графе имеются непомеченные ребра, то из них выбираем ребро 10, которое смежно с помеченными ребрами. В подграфе, порожденном непомеченными ребрами, выявляем простой цикл, содержащий ребро 10, 10-11-12-13-14-15. Все ребра этого цикла помечаем цифрой 2.

4. Построение маршрута начинается из вершины  $x$ . Среди ребер, инцидентных этой вершине, выбираем ребро, помеченное наибольшей цифрой. Таким ребром является ребро 4. Для вершины, инцидентной с этим ребром, наибольшую цифру имеют ребра 10 и 11. Выбираем ребро 11 и включаем его в маршрут. Продолжая этот процесс, получим следующий маршрут:  
4-11-12-13-14-15-10-5-6-7-8-9-1-2-3.

В случае, если в схеме нечетные узлы отсутствуют, используется модификация алгоритма Хоанг Туи, суть которой состоит в следующем.

В схему добавляется фиктивный контакт, располагаемый между узлом наибольшей степени, от которого начинается обход, и любым другим узлом. С помощью алгоритма Хоанг Туи определяется эйлеров маршрут. После выполнения алгоритма фиктивный контакт изымается.

Пример. Определить с помощью алгоритма Хоанг Туи эйлеров маршрут в схеме, представленной на рис. 7-9, а. Маршрут ищется между узлами  $a$

1. В качестве простой цепи, соединяющей узлы  $a$  и  $b$ , выбираем маршрут, включающий контакты  $x_1$  и  $x_2$ . Помечаем их цифрой 0 (в кружке).

2. Так как в схеме имеются непомеченные контакты, то среди них выбираем контакт  $x_4$ , инцидентный узлу  $a$ . В подсхеме, порожденной непомеченными контактами, выявляем простой цикл, содержащий контакт  $x_4, x_4 - x_3$ .

Контакты этого цикла помечаем цифрой 1.

3. Так как в схеме все контакты помечены, то начинаем построение эйлерова маршрута. Построение маршрута начинается из узла  $a$ . Среди контактов,

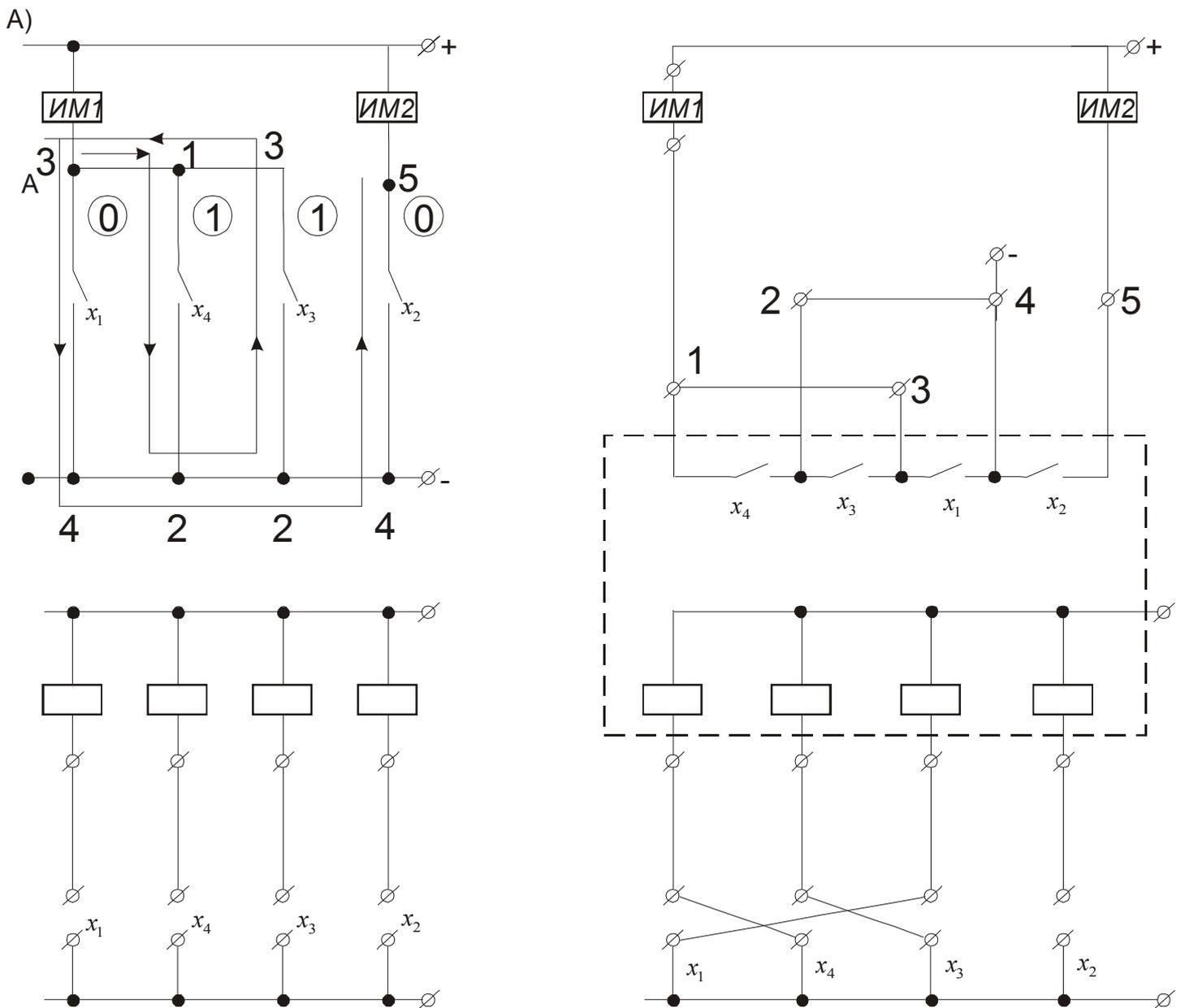


Рис. 7-9. Построение схемы в базисе настраиваемых модулей: *а* - реализуемая схема; *б* - модульная реализация

инцидентных этому узлу, выбираем контакт, помеченный наибольшей цифрой. Наибольшей цифрой помечены контакты  $x_4$  и  $x_3$ . Выбираем контакт  $x_4$ . Для узла, инцидентного с этим контактом, наибольшую цифру имеет контакт  $x_3$ , поэтому включаем его в маршрут. Продолжая этот процесс, получим маршрут:  $x_4 - x_3 - x_1 - x_2$ .

Продолжая рассмотрение свойств схем из ЭДП, отметим, что если схема содержит более двух нечетных узлов, то она не является уникурсальной. При числе нечетных узлов в схеме, большем двух ( $g > 2$ ), эйлеров маршрут с помощью алгоритма Хоанг Туи определяется в расширенной схеме, получаемой из исходной путем введения  $(g/2) - 1$  контактов, каждый из которых объединяет пару нечетных узлов. В результате образуется схема, содержащая лишь два нечетных узла, в которой обязательно существует эйлеров маршрут. Введенные контакты не нарушают условий работы исходной схемы, так как обмотки, соответствующие этим контактам, к источникам входных сигналов не подсоединяются.

На втором этапе реализации, двигаясь по эйлерову маршруту, считываем обозначения контактов в схеме и присваиваем их контактам цепочки слева направо в порядке считывания. При этом осуществляется также соответствующее подключение обмоток реле к ИИ ( $x_1 - x_4$ ) (рис. 7-9, б).

Вновь двигаясь по эйлерову маршруту, нумеруем входной и выходной вывод каждого контакта схемы так, что проставляемые номера при движении от начала маршрута к его концу не уменьшаются. При этом выводу, соответствующему началу маршрута, присваивается номер 1; выходному выводу каждого контакта (считая по ходу маршрута) присваивается номер, на единицу больший по сравнению с номером его входного вывода; одинаковыми номерами обозначаются выходной вывод предыдущего и входной последующего контактов, расположенных на маршруте последовательно. На рис. 7-9, а выполнена нумерация выводов контактов для схемы, рассмотренной в предыдущем примере:

$$x_4(1;2), x_3(2;3), x_1(3;4), x_2(4;5).$$

Перед выполнением третьего этапа выписываем подмножества номеров выводов контактов реализуемой схемы, объединяемых между собой в соответствии с ее структурой. Для примера, рассмотренного выше, такими подмножествами являются: (1;3), (2;4), (5).

На третьем этапе выполняется собственно реализация схемы в базисе цепочки. Единая цепочка из  $l = d$  контактов позволяет безызыбыточно (по числу контактов) реализовать произвольную (в том числе многополюсную и мостиковую) эйлерову схему из  $d$  контактов.

Единая цепочка из

$$l = d + \frac{g}{2} - 1 \quad (7-3)$$

контактов позволяет реализовать произвольную схему из  $d$  контактов, содержащую  $g$  нечетных узлов ( $g > 2$ ).

Справедливость этих утверждений обеспечивается: а) рассмотренным выше свойством «проходимости» контактных схем, содержащих  $d$  контактов и  $g$  нечетных узлов, при введении дополнительных  $(g/2) - 1$  контактов ( $g \geq 2$ ); б) наличием всех промежуточных выводов у цепочки, позволяющих выполнять произвольные их объединения.

В ходе выполнения третьего этапа: а) слева направо нумеруются выводы цепочки, число контактов в которой  $l$  определяется из (7-3); б) объединяются с помощью перемычек те выводы цепочки, номера которых совпадают с номерами выводов контактов, найденными в ходе выполнения второго этапа.

Таким образом, в рассматриваемом примере схема будет реализована цепочкой из четырех контактов, в которой перемычки наложены между выводами 1 и 3, а также 2 и 4 (рис. 7-9, б).

Для класса схем из ЭДП справедливо следующее утверждение: если нечетные узлы в схеме отсутствуют, то суммарная длина перемычек, накладываемых на цепочку при реализации заданной схемы, минимальна в случае, когда обход схемы начинается из узла, который образован наибольшим числом контактов.

На рис. 7-10 приведен пример, демонстрирующий справедливость высказанного утверждения: при обходе из узла, образованного наибольшим числом контактов, суммарная длина перемычек

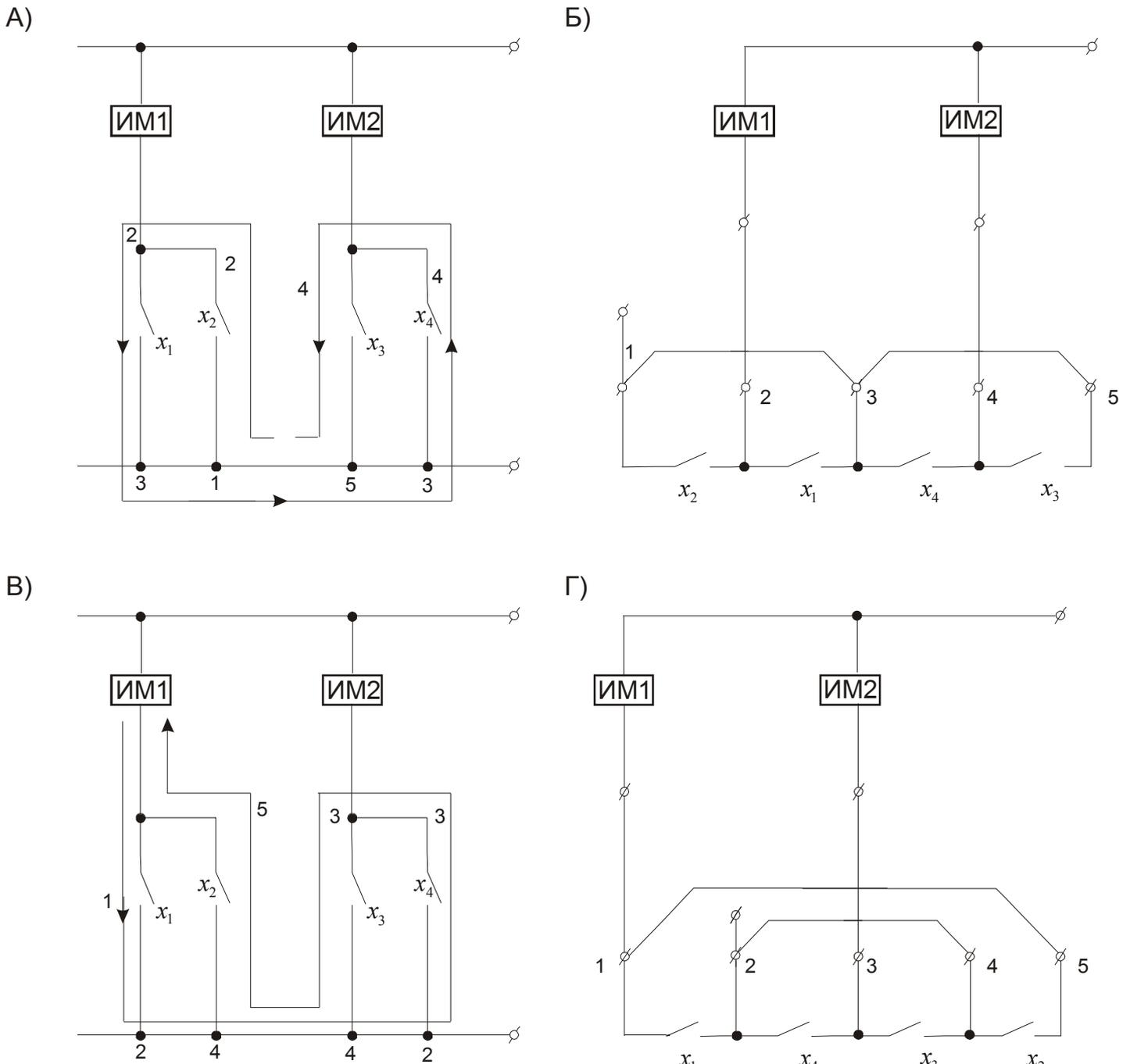


Рис. 7-10. Минимизация длины перемычек: а, б - реализация с перемычками минимальной длины; в, г - реализация с неминимальной длиной перемычек

равна четырем (рис. 7-10, а, б), а при обходе, начинающемся из любого другого узла, - шести (рис. 7-10, в, г).

Рассмотрим вопрос о реализации схем в базисе модулей из замыкающих и размыкающих контактов. Пусть построена произвольная контактная схема, содержащая замыкающие и размыкающие контакты, суммарное число которых равно  $d$ , число нечетных узлов в схеме равно  $g$ , а реализация выполняется на модулях из переключающих контактов.

Предположим, что имеется неограниченное число модулей, содержащих одно, два, три реле, и требуется реализовать схему с минимально возможной избыточностью. Процедура реализации состоит из трех основных этапов.

Первый этап. Выявляются подсхемы, на которые может быть разделена схема для обеспечения реализации с минимально возможной избыточностью на основе процедуры, изложенной выше.

Число этих подсхем

$$L = g/2. \quad (7-4)$$

При этом каждой из найденных подсхем, содержащей  $l_i$  контактов, соответствует модуль, состоящий из  $l_i$  реле.

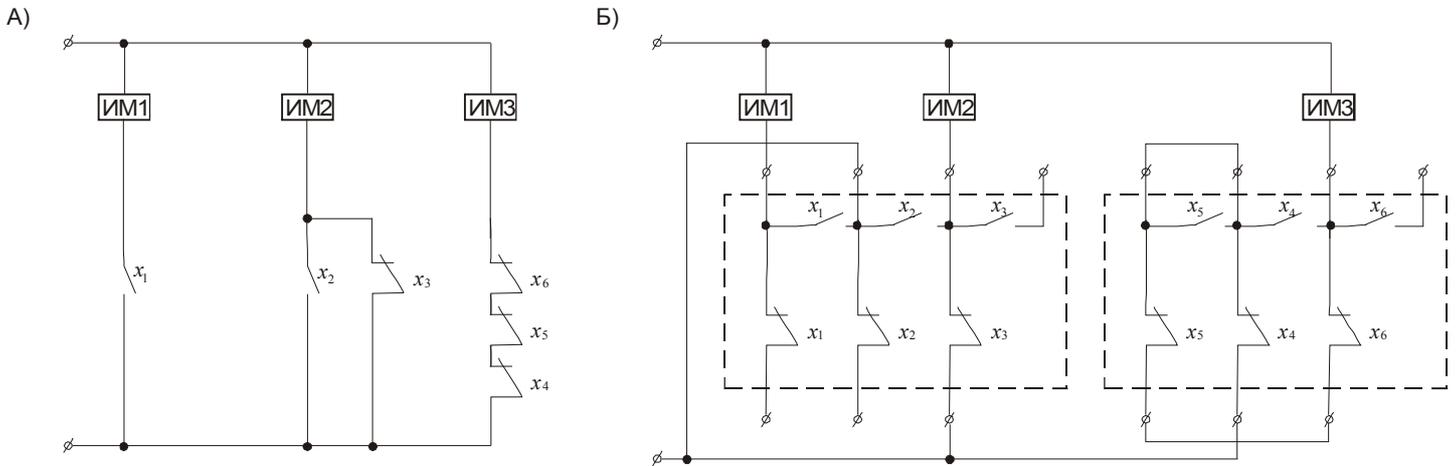


Рис. 7-11. Построение схемы в базисе настраиваемых модулей из переключающих контактов: а – реализуемая схема; б - модульная реализация

Второй этап. Каждый из полученных модулей последовательно разбивается на совокупность несвязанных модулей из трех, двух и одного реле. При этом предпочтение отдается модулям, содержащим наибольшее число реле.

Третий этап. Каждый из модулей настраивается на реализацию соответствующей подсхемы путем использования таблицы настроек (см. § 7-2). Возможность такой настройки гарантирована в связи с универсальностью этих модулей в классе схем, содержащих замыкающие и размыкающие контакты при  $h = 1; 2; 3$ . На рис. 7-11 приведен пример реализации схемы в базисе модулей из замыкающих и размыкающих контактов на основе изложенной процедуры.

**Оценки сложности реализации произвольной двухполюсной схемы в базисе одного модуля.** Выше было показано, что произвольная (в том числе многополюсная) схема из  $d$  контактов, содержащая  $g$  нечетных узлов, может быть реализована единой цепочкой, длина которой при  $g \geq 2$  определяется по формуле

$$l = d + \frac{g}{2} - 1. \quad (7-5)$$

Для нахождения искомой оценки определим соотношение между числом нечетных узлов и числом контактов в произвольной двухполюсной схеме. Для этого авторами рассматривались схемы, содержащие максимальное число узлов нечетной степени при

Таблица 7-1

**Максимальные значения числа нечетных узлов  
в произвольной двухполюсной схеме**

$d$	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
$g_{\max}$	2	4	6	8	10	12	14	16

фиксированном числе контактов. В табл. 7-1 указаны максимальные значения числа нечетных узлов в этих схемах для значений  $d = 1 \div 24$ .

Среди этих схем доля нечетных узлов, приходящихся на один контакт (отношение  $g/d$ ), максимальна при  $d = 1 + 3t$ , где  $t = 0, 1, 2, \dots$

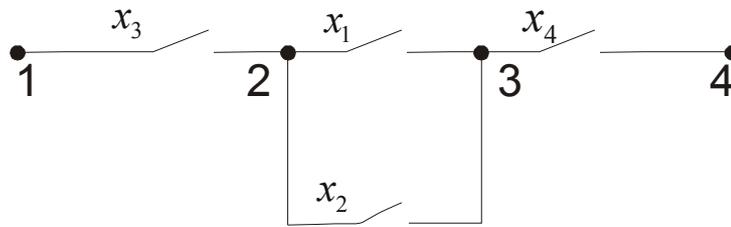
Схемы, состоящие из  $d = 1 + 3t$  контактов, образуют класс схем, содержащих минимальное число контактов при фиксированном числе узлов нечетной степени. Схемы этого класса характеризуются рядом свойств.

В двухполюсных схемах, содержащих минимальное число контактов при фиксированном числе узлов нечетной степени ( $d \geq 4$ ), все узлы, за исключением двух, степень которых равна 1, имеют степень, равную трем. Действительно, для того чтобы образовать нечетный узел, минимально необходимое число контактов должно быть равно одному. Однако в двухполюсной схеме не может быть более двух узлов степени 1, и поэтому в схеме, обладающей указанным свойством при  $d \geq 4$ , все остальные узлы нечетной степени должны быть образованы тремя контактами.

На основе исследования этих схем ниже определяется верхняя оценка сложности реализации произвольной двухполюсной схемы в базисе одного модуля. Эти схемы являются наихудшими в смысле их «проходимости» единой цепочкой, так как «проходимость» схемы определяется узлами нечетной степени.

Параллельно-последовательные схемы рассматриваемого класса при  $d \geq 4$  могут быть получены путем итеративной подстановки схемы, представленной на рис. 7-12, а, вместо отдельного контакта этой же схемы. В результате одной такой подстановки

А)



Б)

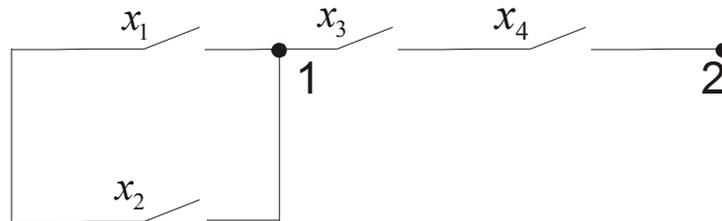


Рис. 7-12. Реализация формулы  $y = (x_1 \vee x_2)x_3x_4$ : а - схема с четырьмя нечетными узлами; б - схема с двумя узлами

число узлов нечетной степени в схеме увеличивается на два, а число контактов - на три.

Для рассматриваемого класса схем справедливо соотношение

$$g'_{\max} = \frac{2}{3}(d + 2). \quad (7-6)$$

Действительно, из теории графов известно, что

$$\sum_{i=1}^{g'_{\max}} r_i = 2d, \quad (7-7)$$

где  $r_i$  - степень  $i$ -го узла.

Это выражение может быть преобразовано исходя из утверждения, приведенного выше, следующим образом:

$$3(g'_{\max} - 2) + 1 \cdot 2 = 2d; \quad (7-8)$$

$$g'_{\max} = \frac{2}{3}(d + 2). \quad (7-8)$$

Для схем, содержащих максимальное число узлов нечетной степени при фиксированном числе контактов,

$$g''_{\max} = \frac{2}{3}(d + 1) \quad \text{при} \quad d = 2 + 3t; \quad (7-10)$$

$$g''_{\max} = \frac{2}{3}d \quad \text{при} \quad d = 3 + 3t; \quad (7-11)$$

Приведенные соотношения могут быть объединены в одно

$$g^c_{\max} = \left\langle \frac{2}{3}(d+2) \right\rangle, \quad (7-12)$$

где  $\langle \rangle$  - знак округления до ближайшего четного в меньшую сторону.

Таким образом, справедливо утверждение: число узлов нечетной степени в произвольной двухполюсной схеме из  $d$  контактов удовлетворяет выражению

$$g \leq \left\langle \frac{2}{3}(d+2) \right\rangle, \quad (7-13)$$

Максимальная длина единой цепочки, необходимой для реализации произвольной двухполюсной схемы из  $d$  контактов, удовлетворяет выражению

$$l_{\max} = \left[ \frac{4}{3}d - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-14)$$

Действительно, подставляя (7-12) в выражение (7-3), получим

$$l_{\max} = d + \frac{\left\langle \frac{2}{3}(d+2) \right\rangle}{3} - 1 = \left[ \frac{4}{3}d - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-15)$$

В табл. 7-2 приведены значения  $l_{\max}$  при значениях  $d = 1 \div 10$ .

Таблица 7-2

**Верхние оценки длины единой цепочки, реализующей произвольную двухполюсную схему из  $d$  контактов**

$d$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l_{\max}$	1	2	3	5	6	7	9	10	11	13

Длина единой цепочки, требующейся для реализации произвольной двухполюсной схемы из  $d$  контактов, удовлетворяет выражению

$$d \leq l^c \leq \left[ \frac{4}{3}d - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-16)$$

Так как для реализации схемы из  $d$  контактов требуется  $d$  контактов «россыпью», то справедливо утверждение: максимальная избыточность при использовании единой цепочки для реализации двухполюсной схемы удовлетворяет выражению

$$\varphi_1 \leq \frac{4}{3}. \quad (7-17)$$

Оценка сложности реализации произвольной булевой функции, заданной формулой в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$ , Ввиду того что для каждой булевой формулы из  $h$  букв может быть построена соответствующая двухполюсная параллельно-последовательная схема из  $d = h$  контактов, искомая оценка может быть получена из выражения (7-16) при замене  $d$  на  $A$ .

Длина единой цепочки, требующейся для реализации произвольной булевой формулы из  $h$  букв, удовлетворяет выражению

$$h \leq l^{\Phi} \leq \left[ \frac{4}{3}h - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-18)$$

Если булева функция  $n$  переменных задана нормальной формулой из  $h$  букв ( $n \leq h$ ), то нижняя оценка реализации булевой функции равна  $n$ , так как число контактов в цепочке может быть равно числу независимых переменных. Таким образом, длина единой цепочки, требующейся для реализации булевой функции  $n$  переменных, заданной нормальной формулой в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $h$  букв, удовлетворяет выражению

$$n \leq l^{\text{функ}} \leq \left[ \frac{4}{3}h - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-19)$$

Полученная верхняя оценка, по-видимому, является завышенной, так как каждая формула, возможно, может быть реализована схемой, число нечетных узлов  $g^\Phi$  в которой удовлетворяет неравенству

$$g^\Phi < g_{\max}^c. \quad (7-20)$$

Например, формула  $y = (x_1 \vee x_2)x_3x_4$  может быть реализован двумя схемами (рис. 7-12, а, б) первая из которых имеет при четырех контактах максимальное число нечетных узлов - четыре, а вторая - лишь два.

На основе рассмотрения схем, реализующих формулы при малых значениях  $h$  ( $h = 1 \div 8$ ), было сделано предположение, что

$$g_{\max}^\Phi(h) = g_{\max}^c(h) - 2. \quad (7-21)$$

Если это предположение справедливо для произвольных  $h$ , то полученная верхняя оценка может быть снижена:

$$l_{\max}^\Phi = h + \frac{g_{\max}^\Phi}{2} - 1 = h + \frac{\left\langle \frac{2(h+2)}{3} \right\rangle - 2}{2} - 1 = \left[ \frac{4}{3}(h-1) \right]. \quad (7-22)$$

Таким образом, возможно, что справедливо выражение

$$h \leq l^\Phi \leq \left[ \frac{4}{3}(h-1) \right]. \quad (7-23)$$

**Оценки сложности реализации монотонных функций.** В работе [23] Н. А. Карпова предложила каталог минимальных схем из замыкающих контактов для всех 210 типов монотонных функций пяти и менее переменных. При этом она установила, что любая монотонная функция  $n$  переменных требует для своей реализации не более  $l(n)$  контактов «россыпью» (табл. 7-3).

Таблица 7-3

### Сложность реализации монотонных функций

$n$	1	2	3	4	5
$l(n)$	1	2	5	8	13

Авторами исследовался вопрос о реализации монотонных функций пяти и менее переменных в базисе единой цепочки на основе каталога минимальных схем. При этом длина единой цепочки, достаточная для реализации произвольной монотонной функции, существенно зависящей от  $n$  переменных, может быть оценена на основе выражения

$$l_{\max}^{\text{сепх}}(n) = \left[ \frac{4}{3}l(n) - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-24)$$

В табл. 7-4 приведены значения  $l_{\max}^{\text{exp}}(n)$  для  $n = 1 \div 5$ .

Ввиду того что реальная длина единой цепочки  $l_{\max}(n)$ , достаточная для реализации любой монотонной функции, существенно зависящие от  $n$  переменных, удовлетворяет выражению

Таблица 7-4

$n$	1	2	3	4	5
$l_{\max}^{\text{exp}}(n)$	1	2	6	10	17

$$l_{\max}(n) \leq l_{\max}^{\text{exp}}(n), \quad (7-25)$$

с целью определения точных значений  $l_{\max}(n)$  была выполнена реализация представителей каждого типа монотонных функций из пяти и менее переменных в базе единой цепочки.

В табл. 7-5 указано число типов монотонных функций  $S_m(n)$ , существенно зависящих от  $n$  переменных.

Таблица 7-5

### Число типов монотонных функций

$n$	0	1	2	3	4	5
$S_m(n)$	2	1	2	5	20	180

В табл. 7-6 ÷ 7-11 приведены результаты выполненного исследования. При этом использованы следующие обозначения:  $N(l)$  -число типов монотонных функций, оптимально реализуемых  $l$  контактами «россыпью»;  $M(l)$  -число типов монотонных функций, оптимально реализуемых цепочкой из  $l$  контактов.

Таблица 7-6

$n = 0$

$l$	0
$N(l)$	2
$M(l)$	2

Таблица 7-7

$n = 1$

$l$	1
$N(l)$	1
$M(l)$	1

Таблица 7-8

$n = 2$

$l$	2
$N(l)$	2
$M(l)$	2

Таблица 7-9

$n = 3$

$l$	3	4	5
$N(l)$	4	-	1
$M(l)$	4	-	1

$n = 4$					
$l$	4	5	6	7	8
$N(l)$	10	2	6	-	2
$M(l)$	10	2	6	-	2

На основе приведенных результатов были установлены точные значения  $l_{\max}(n)$  (табл. 7-12).

В ходе процесса реализации монотонных функций в базисе цепочки установлена справедливость следующих утверждений.

Цепочка длиной  $l_{\max}(n)$  является НЛМ, универсальным для класса монотонных функций  $n$  и менее переменных. Максимальная

Таблица 7-11

$n = 5$											
$l$	5	6	7	8	9	10	П	12	13	14	15
$N(l)$	25	16	52	32	37	11	2	4	1	-	-
$M(l)$	25	15	52	28	37	12	5	4	1	-	1

Таблица 7-12

### Сложность реализации монотонных функций в базисе единой цепочки

$n$	0	1	2	3	4	5
$l_{\max}(n)$	0	1	2	5	8	15

Таблица 7-13

### Монотонные функции, реализуемые с избыточностью в базисах цепочки и контактов «россыпью»

$N$	2	10	58	72	92	99	100	110	113	114	133	137	138	173	182	204
$l_{\text{рос}}$	13	11	8	9	8	10	10	9	8	8	8	7	9	6	9	9
$l_{\text{ц}}$	15	13	9	11	9	11	11	10	9	9	9	9	10	7	10	11

ная длина цепочек  $l_{\max}(n)$  при  $n = 3; 4; 5$  достигается при реализации мажоритарных функций «2 из 3», «2 из 4», «3 из 4» и «3 из 5» соответственно. При этом функция «2 из 4» должна быть реализована

П-схемой, описываемой формулой  $y = x_1 x_2 \vee (x_1 \vee x_2)(x_3 \vee x_4) \vee x_3 x_4$ .

Реализация монотонных функций при  $n \leq 4$  в базисе единой цепочки не приводит к избыточности по сравнению с реализацией в базисе контактов «россыпью». Из 180  $PN$ -типов монотонных функций, существенно зависящих от пяти переменных, лишь 16 реализуются с избыточностью.

В табл. 7-13 приведены номера соответствующих этим функциям минимальных схем по каталогу, а также число контактов, требующихся для их реализации в базисах контактов «россыпью» и цепочки.

### Оценки сложности реализации произвольных булевых функций.

Таблица 7-14

### Верхние оценки сложности реализации произвольной функции $n$ переменных

$n$	1	2	3	4	5
$\lambda(n)$	1	4	8	13	28

В работах К. Шеннона [57], Ю. Л. Васильева [10], Г. Н. Поварова [41] было установлено, что произвольная булева функция  $n$  переменных требует для своей реализации не более  $\lambda(n)$  контактов

«россыпью» (табл. 7-14). На основе верхней оценки длины цепочки, требующейся для реализации схемы из  $\lambda(n)$  контактов, предполагая, что прямые и инверсные значения *III* равнодоступны, можно утверждать, что

$$l_{\max}(n) \leq l_{\max}^{exp}(n) = \left[ \frac{4}{3} \lambda(n) - \frac{1}{3} \right]. \quad (7-26)$$

Значения  $l_{\max}^{exp}$  приведены в табл. 7-15.

Определим точные значения для  $l_{\max}(2)$  и  $l_{\max}(3)$ .

Среди функций двух переменных только функции  $y_1 = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2$  и  $y_2 = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2$  требуют для своей реализации четыре контакта, а остальные - лишь два. Ввиду того что функции  $y_1$  и  $y_2$  могут быть реализованы схемами из четырех контактов без нечетных узлов,  $l_{\max}(2) = 4$ .

Таблица 7-15

**Сложность реализации произвольных функций  $n$  переменных в базисе единой цепочки (верхние оценки)**

$n$	1	2	3	4	5
$l_{\max}^{exp}(n)$	1	5	10	17	37

Среди 16 *PN*-типов функций, существенно зависящих от трех переменных, только три представителя типов функций могут потребовать для своей реализации в базисе цепочек более восьми контактов:

$$z_1 = x_1(x_2 x_3 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3) \vee \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3; z_2 = x_1(x_2 \vee x_3) \vee x_2 x_3 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3; z_3 = x_1(x_2 x_3 \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3) \vee \bar{x}_1(x_2 \bar{x}_3 \vee \bar{x}_2 x_3).$$

Остальные 13 типов функций представимы булевыми формулами из шести и менее букв и поэтому не могут потребовать для своей реализации цепочку длиной, большей семи, так как при шести контактах в схеме не может быть более четырех нечетных узлов.

Функции  $z_1$  и  $z_2$  могут быть реализованы параллельно-последовательными схемами из восьми контактов, содержащими по два нечетных узла, поэтому для реализации этих функций достаточно иметь цепочку из восьми контактов. Функция  $z_3$  может быть реализована мостиковой схемой из восьми контактов, содержащей четыре нечетных узла (рис. 7-13), для «покрытия» которой требуется цепочка из девяти контактов. Следовательно,  $l_{\max}(3) = 9$ .

Определение точных значений  $l_{\max}(4)$  и  $l_{\max}(5)$  не выполнялось, так как каталоги оптимальных реализаций для функций четырех и пяти переменных не были опубликованы.

Значения  $l_{\max}(n)$  сведены в табл. 7-16.

Таким образом, можно утверждать, что цепочка длиной  $l_{\max}(n)$  является НЛМ, универсальным для класса произвольных функций  $n$  переменных.

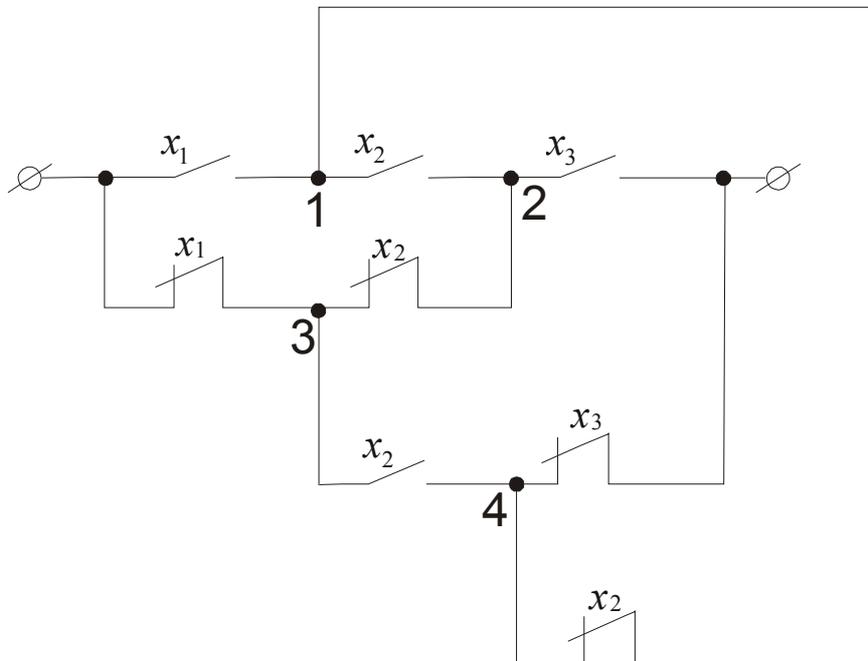


Рис. 7-13. Реализация функции, обладающей наиболее сложной модульной схемой из всех функций трех переменных

**Оценка сложности реализации произвольной многополюсной схемы в базе одного модуля.**

Для получения искомой оценки авторами рассматривались многополюсные схемы, содержащие максимальное число нечетных узлов при фиксированном числе контактов. Среди этих схем для получения верхней оценки наибольший интерес представляют схемы, содержащие  $d = 1 + 2t$  контактов

Таблица 7-16

**Сложность реализации произвольных функций я переменных в базе единой цепочки**

$n$	1	2	3	4	5
$l_{\max}(n)$	1	4	9	17	37

( $t = 0, 1, 2, \dots$ ). Они имеют минимальное число контактов при фиксированном числе нечетных узлов. Для схем этого класса выполняется соотношение

$$g'_{\max} = d + 1, \quad (7-27)$$

в то время как для схем, содержащих четное число контактов  $d = 2t$ , выполняется соотношение

$$g''_{\max} = d. \quad (7-28)$$

Таким образом, в общем случае справедливо равенство

$$g_{\max} = \langle d + 1 \rangle. \quad (7-29)$$

Подставляя найденное равенство в выражение (7-3), получим

$$l_{\max} = d + \frac{\langle d + 1 \rangle}{2} - 1 = \left\lceil \frac{3d - 2}{2} \right\rceil. \quad (7-30)$$

Таким образом, длина единой цепочки, требующейся для реализации произвольной многополюсной схемы из  $d$  контактов, удовлетворяет выражению

$$d \leq l \leq \left\lceil \frac{3d - 2}{2} \right\rceil. \quad (7-31)$$

Так как для реализации схемы из  $d$  контактов с помощью контактов «россыпью» требуется  $d$  контактов, то максимальная избыточность при использовании единой цепочки для реализации многополюсной схемы удовлетворяет выражению

$$d \leq l \leq \left\lceil \frac{3d-2}{2} \right\rceil. \quad (7-32)$$

**Оценка сложности реализации системы булевых формул в базисе одного модуля.** Пусть требуется реализовать многополюсной контактной схемой с общей шиной систему из  $N$  нормальных булевых формул, суммарное число букв в которой равно

$H \left( H = \sum_{i=1}^N h_i \right)$ . Так как в худшем случае каждая формула системы может быть реализована независимо

параллельно-последовательной схемой, состоящей из контактов, то искомая верхняя оценка может быть получена путем замены  $d$  на  $H$  в правой части выражения (7-31). Длина единой цепочки, требующейся для реализации системы из  $N$  нормальных булевых формул, суммарное число букв в которой равно  $H$ , удовлетворяет выражению

$$H \leq l \leq \left\lceil \frac{3H-2}{2} \right\rceil. \quad (7-33)$$

**Оценка сложности реализации схемы в базисе набора однотипных модулей.** Процедура реализации схемы в базисе цепочек длиной  $l$  состоит из двух основных этапов: а) реализации схемы в базисе единой цепочки; б) «покрытия» единой цепочки набором цепочек, каждая из которых имеет длину  $l$ .

Из сказанного следует, что оценки сложности в этом случае могут быть получены на основе оценок, найденных для случая использования единой цепочки, путем их деления на  $l$  и округления до ближайшего целого в большую сторону.

1. *Оценка сложности реализации произвольной двухполюсной схемы из  $d$  контактов*

$$\left\lceil \frac{d}{l} \right\rceil \leq L_2 \leq \left\lceil \frac{\left\lceil \frac{4}{3}d - \frac{1}{3} \right\rceil}{l} \right\rceil. \quad (7-34)$$

2. *Оценка сложности реализации произвольной булевой функции  $n$  переменных, заданной формулой в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $h$  букв:*

$$\left\lceil \frac{n}{l} \right\rceil \leq L_2 \leq \left\lceil \frac{\left\lceil \frac{4}{3}h - \frac{1}{3} \right\rceil}{l} \right\rceil. \quad (7-35)$$

Есть основания предполагать, что верхняя оценка может быть снижена:

$$\left\lceil \frac{n}{l} \right\rceil \leq L_2 \leq \left\lceil \frac{\left\lceil \frac{4}{3}(h-1) \right\rceil}{l} \right\rceil. \quad (7-36)$$

Сопоставим полученные оценки с соответствующими оценками для модулей из ФЭ. Предположим, что используется модуль из ФЭ, универсальный для класса формул в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $l$  букв. При этом справедливо соотношение

$$\left\lceil \frac{h-1}{K-1} \right\rceil \leq L \leq \left\lceil \frac{2(h-1)}{l} \right\rceil. \quad (7-37)$$

Из сопоставления оценок (7-35) и (7-37) следует, что верхняя оценка числа модулей из ЭДП, требующихся для реализации произвольной формулы в базисе  $\{\&, \vee, \bar{\phantom{x}}\}$  из  $h$  букв, приблизительно в

1,5 раза меньше соответствующей оценки для модулей из ФЭ, обладающих теми же функциональными возможностями для рассматриваемого класса формул, при практически одинаковых нижних оценках. Одинаковые функциональные возможности модулей из ЭДП и ФЭ для класса формул из  $l$  букв в базе  $\{\&, \vee, \bar{\quad}\}$  следует понимать в том смысле, что если, например, имеется стандартный корпус с 14 внешними выводами, то в таком корпусе может быть размещен либо один модуль из ФЭ, либо один модуль из ЭДП, каждый из которых универсален для класса формул из шести букв в базе  $\{\&, \vee, \bar{\quad}\}$ .

Из сказанного можно сделать вывод, что модули из ЭДП в среднем значительно более эффективны по сравнению с модулями из ФЭ.

3. Оценка сложности реализации произвольной многополюсной схемы из  $d$  контактов

$$\left\lceil \frac{d}{l} \right\rceil \leq L_3 \leq \left\lceil \frac{\left\lceil \frac{3d-2}{2} \right\rceil}{l} \right\rceil = \left\lceil \frac{3d-2}{2l} \right\rceil. \quad (7-38)$$

4. Оценка сложности реализации системы  $N$  булевых формул, суммарное число букв в которой равно  $H$ , а число независимых переменных  $n$ :

$$\left\lceil \frac{n}{l} \right\rceil \leq L_4 \leq \left\lceil \frac{3H-2}{2l} \right\rceil. \quad (7-39)$$

**Оценки сложности реализации в базе минимального числа модулей, номенклатура которых определяется в ходе процесса построения.** Если связная контактная схема имеет  $g$  нечетных узлов, где  $g \geq 2$ , то она может быть безызбыточно реализована с помощью  $g/2$  цепочек, каждая из которых соединяет по два узла нечетной степени, т. е.

$$L = g/2. \quad (7-40)$$

Если связная контактная схема имеет  $g$  узлов нечетной степени, где  $g \geq 2$ , то она может быть безызбыточно реализована с помощью по крайней мере двух различных наборов цепочек, каждый из которых содержит по  $g/2$  цепочек.

На основе (7-40) и оценок числа нечетных узлов, найденных выше, могут быть получены следующие оценки числа цепочек.

1. Оценка сложности реализации произвольной двухполюсной схемы из  $d$  контактов

$$1 \leq L' \leq \frac{\left\langle \frac{2}{3}(d+2) \right\rangle}{2} = \left\lceil \frac{d+2}{3} \right\rceil. \quad (7-41)$$

2. Оценка сложности реализации произвольной булевой формулы из  $h$  букв

$$1 \leq L'' \leq \left\lceil \frac{h+2}{3} \right\rceil. \quad (7-42)$$

Есть основания полагать, что верхняя оценка в этом случае может быть снижена:

$$1 \leq L'' \leq \frac{\left\langle \frac{2}{3}(h+2) \right\rangle - 2}{2} = \left\lceil \frac{h+2}{3} \right\rceil - 1 = \left\lceil \frac{h-1}{3} \right\rceil. \quad (7-43)$$

3. Оценка сложности реализации произвольной многополюсной схемы из  $d$  контактов

$$1 \leq L''' \leq \frac{\langle d+1 \rangle}{2} = \left\lceil \frac{d}{2} \right\rceil. \quad (7-44)$$

4. Оценка сложности реализации системы булевых формул

$$1 \leq L''' \leq \left\lceil \frac{H}{2} \right\rceil. \quad (7-45)$$

где  $H$  - суммарное число букв в формулах системы.

Оценка сложности реализации произвольной схемы, содержащей  $g$  нечетных узлов, при использовании набора цепочек и трехлучевых звезд

$$L \leq g/2 \quad (7-46)$$

Если применение одной звезды (рис. 7-14) позволяет уменьшить число нечетных узлов в остаточной схеме на четыре, то общее число дискретных компонентов, требующихся для реализации схемы, уменьшается на одну:  $L = \frac{g-4}{2} + 1 = \frac{g}{2} - 1$ . Если применение одной звезды позволяет уменьшить число нечетных узлов на два, то общее число дискретных компонентов не изменяется:

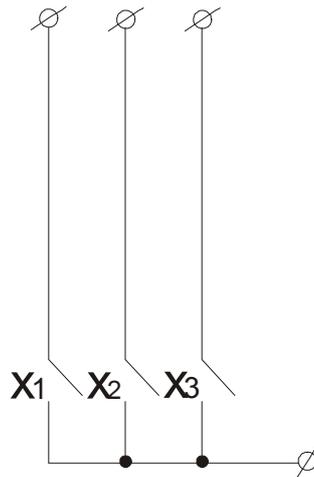


Рис. 7-14. Трехлучевая звезда

Если применение одной звезды не позволяет уменьшить число нечетных узлов, а уменьшает лишь степени некоторых из них, то расширение базиса нецелесообразно. «Покрытие» в этом случае должно выполняться только цепочками:

$$L = g/2. \quad (7-47)$$

На рис. 7-15 приведена одна из структур типа «звезда из цепочек», являющаяся обобщением структур типа «звезда». Структуры этой разновидности могут содержать различное число цепочек, причем эти цепочки могут обладать различной длиной ( $l = 1 \div 5$ ). При этом любая формула из  $h$  букв ( $h \leq 5$ ) может быть безызбыточно реализована цепочкой, в которой один из крайних выводов соединен с общей шиной.

При  $h = 6$  существует по крайней мере одна формула  $y = x_1(x_2 \vee x_3) \vee x_4(x_5 \vee x_6)$ , которая не может быть реализована безызбыточной цепочкой из шести контактов, входящей в состав многолучевой звезды. Эта формула может быть реализована цепочкой из семи контактов, в которой контакт, соединенный с общей шиной, не используется.

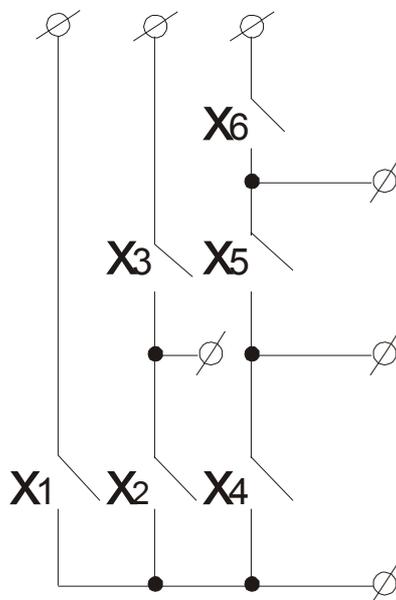


Рис. 7-15. Звезда из цепочек

В заключение отметим, что для модулей тип «цепочка», «звезда» и «звезда из цепочек» справедливо соотношение

$$M = N + d, \quad (7-48)$$

где  $M$  - число выводов в модулях;  $N$  - число модулей;  $d$  - суммарное число контактов в модулях.

Из этого соотношения следует, что при  $d = const$  число внешних выводов определяется числом модулей, в которые объединены контакты. При  $d = const$  и  $N = const$  имеем  $M = const$  вне зависимости от номенклатуры модулей.

#### 7.4. УНИФИКАЦИЯ БЛОКОВ ЛОГИКИ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ С ДВУСТОРОННЕЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

Сокращение ресурсов, затрачиваемых на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации систем логического управления, невозможно без проведения схемно-конструктивной унификации.

В работе [54] были рассмотрены методы построения унифицированных единиц замены и отмечалась целесообразность создания двух классов модулей, которые условно названы специализированными и универсальными. Специализированные модули характеризуются определенным целевым назначением и создаются в том случае, если в системах регулярно повторяются какие-либо устройства или алгоритмы. Однако в системах логического управления наряду с «устойчивостью» принципов управления, контроля и сигнализации, приводящей к унификации и специализации соответствующих модулей, имеет место большое разнообразие в объектах управления и алгоритмах их работы.

Указанное разнообразие приводит к различиям в логических схемах, которые в системах рассматриваемого класса, как отмечалось в § 1-1, почти повсеместно являются комбинационными.

Нерегулярные комбинационные схемы, занимающие в системах лишь 15-20% объема, определяют при отсутствии унификации 50-60% номенклатуры кассет или субблоков, и поэтому одним из важнейших вопросов в проблеме унификации систем этого класса является разработка методов построения

универсальных единиц замены, предназначенных для реализации нерегулярных комбинационных схем.

Пусть имеется схемно-конструктивная единица (кассета), обладающая определенной схемной вместимостью, выраженной в числе базисных элементов и контактов разъемов. Требуется выбрать и «вписать» в определенном соотношении некоторые схемы таким образом, чтобы кассета обладала широкими функциональными возможностями и малыми избыточностью и внешним монтажом при выполнении требований по надежности, простоте контроля и диагностики.

В § 5-3 были рассмотрены вопросы унификации нерегулярных комбинационных схем из ФЭ и показано, что решение указанной задачи возможно лишь при применении принципа многофункцио-

нальности. Этот методологический принцип был использован при разработке унифицированных единиц замены на интегральных схемах и позволил удовлетворить указанным выше требованиям и ограничениям. В настоящем параграфе делается попытка использовать принцип многофункциональности при унификации схем из ЭДП, и в частности из релейно-контактных элементов.

Одним из возможных путей унификации схем из релейно-контактных элементов является функциональный подход, при котором на контактах строят ячейки, реализующие наиболее часто встречающиеся в схемах элементарные булевы функции: «И», «ИЛИ», «Запрет» и т. д. Однако такой подход не обеспечивает решения проблемы унификации типовых единиц замены даже для схем из ФЭ, для которых он кажется естественным.

Реализация на контактах порождающих функций многофункциональных модулей, универсальных для класса формул, как показано в § 7-1, также не является целесообразной ввиду избыточности, неприемлемой для практики. При этом необходимо отметить, что такой подход решал рассматриваемую проблему для схем из ФЭ.

В настоящее время на практике при унификации логических схем из ЭДП применяется метод формирования кассет, обеспечивающий их универсальность путем вывода практически всех внешних выводов элементов на контакты разъемов. Применение этого подхода объясняется тем, что реализация схем в базе таких кассет чрезвычайно проста и состоит в соединении отдельных элементов на разъемах приборов в соответствии с заданной формулой или схемой. Однако использование таких унифицированных единиц, содержащих элементы почти «россыпью», приводит к тому, что практически весь монтаж не унифицирован и оказывается внутри приборов на разъемах, что вызывает значительные трудности как при монтаже и настройке, так и при поиске неисправностей в процессе эксплуатации. Кроме того, применение кассет, сформированных таким образом, приводит к избыточности, которая существует, несмотря на то, что в модулях с такой структурой гарантирована возможность использования практически каждого элемента. Это объясняется тем, что при таком подходе обычно не удается согласовать вместимость кассеты по числу элементов с числом контактов разъемов, и поэтому при использовании малогабаритных реле ограничение по числу внешних выводов достигается при относительно пустой кассете.

Для решения указанных противоречий предлагается использовать в составе кассет НЛМ из ЭДП, рассмотренные в § 7-2. Их применение в составе унифицированных кассет, используемых при построении систем логического управления, должно базироваться на учете: а) свойств применяемых в настоящее время элементов; б) требований, предъявляемых к структуре логических систем рассматриваемого класса, по алгоритмической гибкости, ремонтпригодности, надежности и т. д.

Среди технических характеристик электромагнитных реле, используемых в настоящее время, основным ограничивающим фактором для применения структур, рассмотренных в § 7-2, является то, что для большинства реле недопустимо, чтобы их обмотки долгое время находились под током. Учитывая это ограничение, цепочку из замыкающих контактов (см. рис. 7-3) можно использовать в качестве универсального модуля лишь для класса положительно-монотонных формул или при реализации схем из замыкающих контактов. Для отрицательно-монотонных формул и схем из размыкающих контактов может использоваться цепочка из размыкающих контактов.

Учет указанного ограничения не позволяет использовать в настоящее время структуру, представленную на рис. 7-4, и поэтому для реализации немонотонных формул должна применяться схема из замыкающих и размыкающих контактов, в которой в результате настройки ни один из элементов не находится долгое время под током (рис. 7-5).

Вторая особенность, влияющая на использование полученных результатов на практике, связана с уровнем интеграции применяемой элементной базы. Вопросы повышения уровня интеграции релейно-контактных элементов решены промышленностью далеко не достаточно. Если для интегральных микросхем очевидна тенденция объединять элементы внутри корпуса, то для релейно-контактных элементов этот подход практически не используется, что приводит к большому объему неупорядоченного внешнего монтажа и снижению надежности систем, построенных на их основе. Единственный путь повышения уровня интеграции этих элементов, применяемый промышленностью, состоит в выпуске многоконтактных реле, для эффективного использования которых были разработаны специализированные методы синтеза [41,57]. Однако этот подход не решает указанную проблему полностью, так как контакты и одного и различных реле не объединяются между собой внутри корпуса. Формирование цепочек является новым методом повышения уровня интеграции релейно-контактных элементов.

В § 7-3 мы попытались изложить и другую важнейшую сторону проблемы: как из этих модулей строить схемы? Особенность предложенных подходов состоит в том, что они наиболее эффективны при применении одноконтактных реле с одним замыкающим контактом (например, реле типа РЭС-60) или с одним переключающим контактом (например, реле типа РЭС-49).

Рассмотрим вопрос о дальнейшем повышении уровня интеграции схемных решений - использовании двухконтактных реле при построении настраиваемых модулей. Такие реле представляют в настоящее время наибольший интерес для проектантов многих систем логического управления, так как комбинационные схемы этих систем в основном строятся с применением электромагнитных реле типов РЭС-47, РЭС-48, РЭС-9, имеющих по два переключающих контакта. При использовании таких реле необходимо решить следующий вопрос: как объединять вторые контакты, если первые объединены в один из рассмотренных выше настраиваемых модулей?

Проблема использования вторых контактов решается достаточно просто в случае, если при построении модулей применяется поэлементное резервирование. В системах с поэлементным резервированием против обоих видов отказов (незамыкание и неразмыкание) замыкающие контакты одного реле соединяют последовательно (они могут рассматриваться функционально как один контакт), в то время как контакты разных реле соединяют параллельно.

Предположим, что поэлементное резервирование в модулях не применяется. Тогда, если первые контакты различных реле объединены в цепочку, то объединять вторые контакты этих реле в цепочку (даже другую) не рекомендуется, так как при этом обычно не удается обеспечить «проходимость» схемы второй цепочкой. Вторые контакты реле могут объединяться в структуру типа «звезда», так как использование этого типа модулей не ухудшает «проходимости» схемы цепочкой, состоящей из первых контактов.

Третьим вопросом, определяющим эффективность применения предлагаемых решений, является вопрос о влиянии способа «раздачи» питания на структуру настраиваемых модулей. При децентрализованном построении логических устройств обычно используются различные источники питания, к которым должны подключаться обмотки реле. При такой организации «раздачи» питания возникает проблема: каким образом должны быть объединены обмотки реле при построении модулей?

Эта проблема может быть решена, если отказаться от объединения обмоток звездой. Однако это приводит к существенному возрастанию числа внешних выводов и усложнению монтажа. Поэтому в этом случае рекомендуется применять объединение обмоток небольшими группами из 1-6 реле, а контакты, принадлежащие этой группе реле, соединять в цепочку.

Из сказанного следует, что для повышения уровня интеграции целесообразно применять структуры с централизованной обработкой

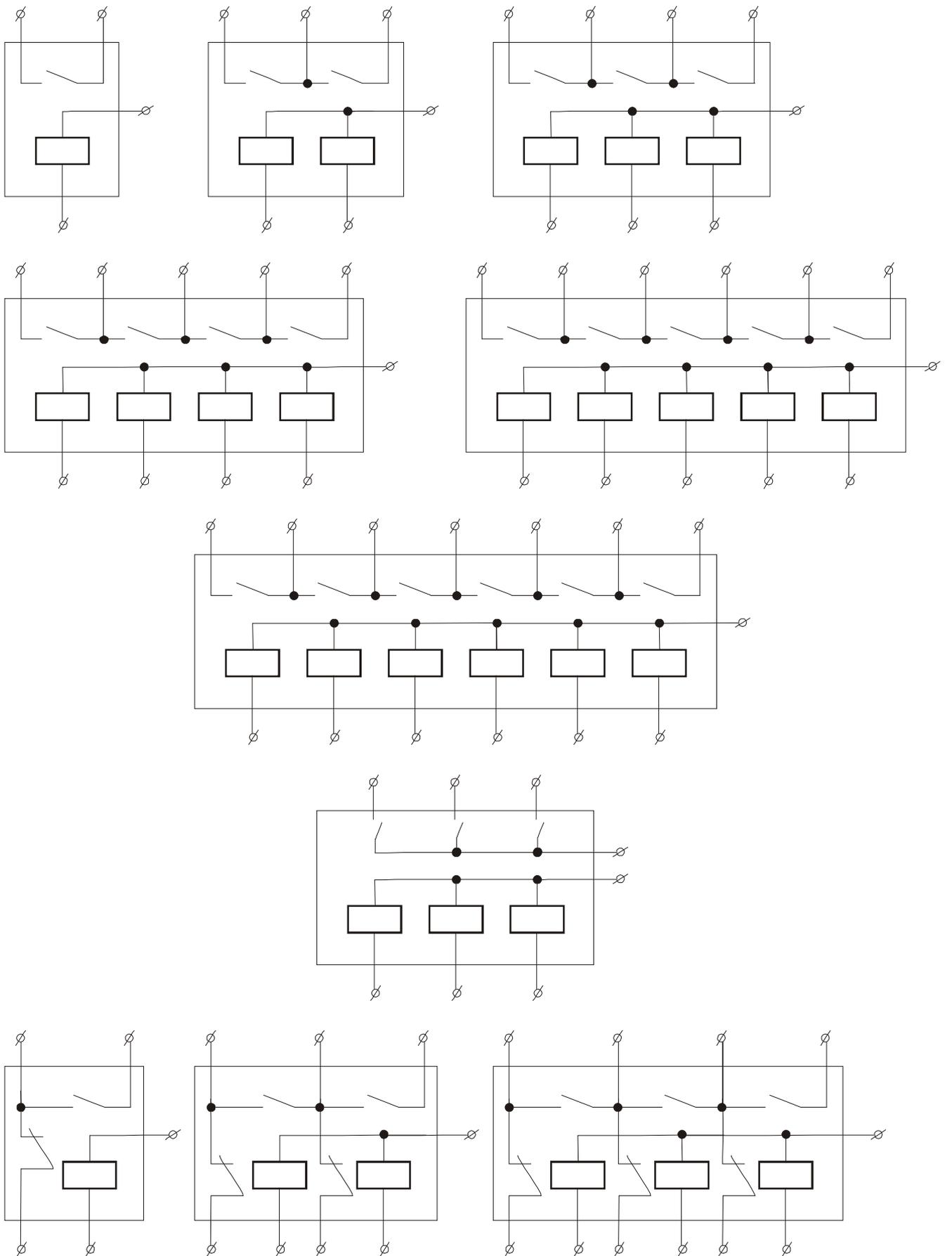


Рис. 7.16. Набор типовых модулей из одноконтактных реле для формирования унифицированных логических кассет

информации и одним источником питания. При этом все обмотки реле могут быть объединены по одному полюсу.

При выборе номенклатуры модулей для формирования унифицированных кассет, предназначенных для реализации нерегулярных логических схем, следует применять возможно более

длинные цепочки, так как это позволяет при заданном числе внешних выводов кассет повысить их функциональные возможности. Однако длина цепочек обычно ограничивается, ввиду того что при реализации схемы, содержащей большое число контактов в базисе единой цепочки, внесение изменений потребует существенной перепайки.

Сокращение длины цепочек ( $l \leq 6$ ) связано также и с тем, что для изоляции фрагментов длинной цепочки приходится не использовать контакты некоторых реле, что приводит к избыточности. Для уменьшения этой избыточности длина цепочек также должна быть сокращена. Опыт проектирования систем логического управления показывает, что в составе унифицированных кассет должны использоваться цепочки длиной 1, 2, 3, 4, 5 и 6. В кассеты должны входить также модули, имеющие структуру типа «звезда», и модули из замыкающих и размыкающих контактов (рис. 7-16).

Заканчивая эту книгу, мы понимаем, что в ней не удалось изложить все вопросы построения и применения настраиваемых логических модулей. Практически остались вне рассмотрения вопросы обеспечения эксплуатации и обслуживания систем на НЛМ, а также все, что связано с НЛМ последовательного и параллельно-последовательного типов.

Однако мы и не ставили своей целью «закрыть» проблему. После выполнения исследований число вопросов обычно возрастает, но это уже вопросы следующего уровня. Недаром древние мудрецы сравнивали знания с кругом света от фонаря: чем шире круг, тем больше граница с темнотой. Поэтому сейчас мы останавливаемся. То, что изложено в этой книге, помогло нам делать системы лучше и проще; мы надеемся, это принесет пользу и читателю. Но впереди еще масса новых нерешенных задач - своих в каждой области автоматизации и общих, направленных на дальнейшее повышение качества и эффективности систем и устройств. Если настоящая книга поможет в их решении, то мы будем считать свою цель достигнутой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. Автоматическое управление газотурбинными установками/Б. И. Аранович, Ю. Т. Лячек, В. А. Олейников, А. А. Файнштейн. - Л.: Недра, 1974.-216 с., ил.
2. Алгоритм построения логической схемы в базисе «И - НЕ» по заданной формуле/В. Л. Артюхов, В. К. Бородулин, Ю. В. Каталажнов, А. А. Шалыто.- Обмен опытом в радиопромышленности, 1973, № 10, с. 23-28.
3. Аперiodические автоматы/Под ред. В. И. Варшавского. - М.: Наука,1976.- 424 с., ил.
4. Артюхов В. Л., Копейкин Г. А., Шалыто А. А. Оценки сложности предстоящих реализаций в задачах логического и технического проектирования.-В кн.: Теория релейных устройств. Труды XVI Всесоюзной школы-семинара. - Челябинск: ЧПИ, 1976, с. 123-129.
5. Артюхов В. Л., Копейкин Г. А., Шалыто А. А. Применение многофункциональных модулей среднего уровня интеграции для построения комбинационных схем. - Теория конечных автоматов и ее приложения, 1976, вып. 5,с. 86-110.
6. Букреев И. Н., Мансуров Б. М., Горячев В. И. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. - М.: Советское радио, 1975. - 368 с., ил.
7. Бутаков Е. А. Методы синтеза релейных устройств из пороговых элементов.-М.: Энергия, 1970.- 328 с., ил.
8. Варшавский В. И., Мараховский В. Б., Песчанский В. А. Реализация инвариантных функций линейными однородными схемами. - Изв. АН СССР.Сер. техн. кибернетика, 1969, № 4, с. 39-44.
9. Варшавский В. И., Мараховский В. Б., Песчанский В. А. Многофункциональные модули, реализующие все функции трех и четырех переменных.-В кн.: Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по теории релейных устройств и конечных автоматов. - Рига: Зинатне, 1971, с. 53-55.
- 10.Васильев Ю. Л. Минимальные контактные схемы для булевых функций четырех переменных. - Докл. АН СССР, 1959, № 2, с. 32-36.
- 11.Вольский В. Е., Пушин Ю. Н., Юнг В. Н. Проектирование пневматических систем управления судовыми энергетическими установками. - Л.:Судостроение, 1975.- 312 с., ил.
- 12.Выбор базиса элемента одномерной вычислительной среды/А. А. Койфман, Б. А. Москов, А. В. Панков и др. - Вычислительные системы, 1973,вып. 54, с. 53-66.
- 13.Гаврилов М. А. Теория релейно-контактных схем.- М. -Л.: Изд-во АН СССР, 1950.- 304 с., ил.
- 14.Гаврилов М. А., Копыленко В. М. Метод «переходных таблиц» синтеза многовыходных комбинационных структур на произвольных элементах.-В кн.: Абстрактная и структурная теория релейных устройств. - М: Наука,1972, с. 57-76.
- 15.Горбатов В. А. Синтез логических схем в произвольном базисе.-В кн.: Теория дискретных автоматов. - Рига: Зинатне, 1967, с. 73-84.
- 16.Данем Б., Норт Д. Проблемы выбора логических эффективных основных ячеек. - В кн.: Синтез релейных структур. - М.: Наука, 1965, с. 108-122.
17. Диденко К. И., Загарий Г. И., Павлов В. В. Управляющие логические устройства и их применение в АСУ. - Приборы и системы управления, 1975,№ 8, с. 3-8.
18. Дулепов Е. Г. Функциональные возможности универсальных симметричных логических элементов. - Автоматика и телемеханика, 1974, № 4,с. 83-87.
- 19.Евреинов Э. В., Прангишвили И. В. Цифровые автоматы с настраиваемой структурой. - М.: Энергия, 1974.- 240 с., ил.

20. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью. - М.: Энергия, 1975.- 136 с., ил.
21. Захаров В. Н., Поспелов Д. А., Хазацкий В. Е. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация. - М.: Энергия, 1977. - 423 с., ил.
22. Зыков А. А. Теория конечных графов. - Новосибирск: Наука, 1969.-543 с., ил.
23. Карпова Н. А. (Минимальные схемы из замыкающих контактов для монотонных функций пяти переменных. – Проблемы кибернетики, 1973, вып. 26, с. 45-84.
24. К'югаи И. В., Стеоликова Л. Н. Вопросы построения полных тестов для бесповторных скобочных формул. - В кн.: Техническая диагностика.-М.: Наука, Г9/2, с 9/--105.
25. Кондратьева Е. А. Сопруненко Е. П. Об оценке числа входов универсального логического модуля. - В кн.: Автоматы и управление сетями связи.- М.: Наука, 1971, с. 20-24.
26. Кукинов А. М. Простой метод синтеза скобочных формул для недоопределенных булевых функции. - В кн.: Синтез дискретных автоматов и управляющих устройств. - М.: Наука, 1968, с. 118-124.
27. Лазарев В. Г., Пийль Е. И. Синтез асинхронных конечных автоматов. - М.: Энергия, 1970.- 400 с., ил.
28. Лофгрэн Л. Теория однородных переключательных сетей. - В кн.: Синтез релейных структур. - М.: Наука, 1965, с. 142-176.
29. Лупанов О. Б. О синтезе некоторых классов управляющих систем.-Проблемы кибернетики, 1963, вып. 10, с. 63-97.
30. Майоров С. А., Скорубский В. И., Кравцов Л. Я. Универсальные логические модули и их применение. - Управляющие системы и машины, 1977, № 1. с. 27-37.
31. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Курейчик В. Н. Применение графов для проектирования дискретных устройств. - М.: Наука, 1974.-303 с., ил.
32. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных структур/И. В. Прангишвили, Н. А. Абрамова, Е. В. Бабичева, В. В. Игнатущенко. - М.: Наука, 1974.- 228 с., ил.
33. Миллер Р. Теория переключательных схем. Т. 1. - М.: Наука, 1970.-416 с., ил.
34. Некоторые критерии оценки эффективности логических модулей/Е. П. Бабичева, И. В. Прангишвили, М. А. Ускач, Н. Шаипов. – Автоматика и телемеханика, 1968, № 3, с. 131-139.
35. Образцов В. В. Синтез устройства программирования работы агрегатов при отключении их по одному. - В кн.: Автоматизация управления оросительными системами -Фрунзе: Илим, 1970, с. 53-59.
36. Оверко В. А. О результатах анализа алгоритмов решения класса логических промышленных задач. - В кн.: Надежность и устройства автоматизированных систем управления. - Киев: Наукова думка, 1970, с. 33-39.
37. О выборе эффективных булевых функций/С. А. Майоров, В. В. Павленко, Г. А. Петухов, В. И. Скорубский. - Изв. вузов. Сер. приборостроение, 1970, № 1, с. 34-40.
38. Однородные структуры/ В. И. Варшавский, В. Б. Мараховский, В. А. Песчанский, Л. Я. Розенблум. - М.: Энергия, 1973.- 152 с., ил.
39. О переписи типовых релейно-контактных схем автоматической телефонии/В. Г. Лазарев, О. Ф. Наумчук, Г. Г. Саввин, Ю. Л. Сагалович. - Проблемы передачи информации, 1963, № 8, с. 63-69.
40. Павлов В. В., Никитин А. В. Логические блоки для управления исполнительными механизмами. - М.: Энергия, 1972.- 64 с., ил.
41. Поваров Г. Н. Метод синтеза вычислительных и управляющих контактных схем. - Автоматика и телемеханика, 1957, № 2, с. 55-59.
42. Попов Ю. А., Бочков П. Е., Сладкое А. Б. Комплект многофункциональных модулей для построения вычислительных устройств. - Приборы и системы управления, 1973, № Ц, с. 14-17.
43. Поспелов Д. А. Логические методы анализа и синтеза схем. - М.: Энергия, 1968.- 328 с., ил.
44. Прангишвили И. В., Ускач М. А., Копейкип Г. А. Комплекс логических МДП-интегральных схем для систем автоматики и телемеханики.-Приборы и системы управления, 1970, № 4, с. 15-18.
45. Проектирование бесконтактных управляющих логических устройств промышленной автоматики/Г. Р. Грейнер, В. П. Ильяшенко, В. П. Май и др.-М.: Энергия, 1977.- 384 с., ил.
46. Проектирование цифровых вычислительных машин/С. А. Майоров, Г. И. Новиков, С. И. Баранов и др. - М.: Высшая школа, 1972.-300 с., ил.
47. Расчет и проектирование элементов ЭВМ/Ю. А. Попов, Б. И. Кальнин, Л. С. Соловьев и др. - М.: Атомиздат, 1975. -310 с., ил.

- 48.Редькин Н. П. О сложности реализации недоопределенных булевых функций. - Автоматика и телемеханика, 1969, № 9, с. 42-47.
- 49.Риордан Дж. Введение в комбинаторный анализ. - М.: Изд-во иностр. лит., 1963. - 287 с., ил.
- 50.SHP-программа стандартизации радиоэлектронной аппаратуры ВМС США/А. С. Бейлин, И. М. Гаврилов, В. В. Громковский, Н. М. Гусев. - Судостроение за рубежом, 1976, № 9, с. 35-48.
- 51.Справочник по интегральным микросхемам/Под общей ред. Б. В. Тарабрина.-М.: Энергия, 1977. - 583 с., ил.
- 52.Стародубцев Н. А. Соотношения для числа настроек многофункциональных логических модулей. - Изв. АН СССР. Сер. техн. кибернетика, 1972, №4, с. 145-152.
- 53.Хетагуров Я. А., Малишевский В. В., Потураев О. С. Основы инженерного проектирования УЦВМ. - М.: Советское радио, 1972. - 367 с., ил.
- 54.Централизованное управление общесудовыми системами/В. М. Дунин, В. Л. Артюхов, А. Г. Попов и др. - Л.: Судостроение, 1976. - 272 с., ил.
- 55.Цымбал А. А., Сидоренко В. П., Петин Ю. А. Цифровые интегральные схемы на МДП-структурах. - Электронная промышленность, 1974, № 12, с. 57-64.
- 56.Чистов В. П., Битюцкий В. П. Функциональная полнота в ленточных однородных структурах. - Изв. АН СССР. Сер. техн. кибернетика, 1971, №3, с. 47-53.
- 57.Шеннон К. Э. Работы по теории информации и кибернетике. - М.:Изд-во иностр. лит., 1963.- 829 с., ил.
- 58.Яблонский С. В. Функциональные построения в /С-значной логике.-Тр. Математического института им. В. А. Стеклова, т. 51, 1958, с. 5-142.
- 59.Якубайтис Э. А. Логические автоматы и микромодули. - Рига: Зинатне, 1975. - 259 с., ил.
- 60.Cohen S., Winder R. Threshold gate building blocks. - IEEE Trans.Comput., 1969, № 9, p. 32-42.
- 61.Forslund p. C., Waxman R. The universal logic block (ULB) and its application to logic design. - In: Proc. 7th IEEE Ann. Symp. Switching and Automata Theory, 1966, p. 15-23.
- 62.Hellerman L. A catalogue of three-variable or-invert and and-invert logical circuits. - IEEE Trans. Comput., 1963, N 12, p. 3-15.
- 63.Hurst S. Universal threshold gates for 3, 4, 5 variable linearly separable functions. -Electr. Lett., 1970, № 6, n. 22-32.
- 64.Ikeno N., Hashimoto A., Naito K. A table of fourvariable minimal NAND circuits. - Electr. Comm. Lab. Tech. J., extra issue, 1968, № 26, p. 92-100.
- 65.King W. F. The synthesis of multipurpose logic devices. - In: Proc.7th IEEE Ann. Symp. Switching and Automata Theory, 1966, p. 78-85.
- 66.Levy S. Y., Winder R., Mott T. H. A note on tributary switching networks. - IEEE Trans. Comput., 1964, № 2, p. 36-45.
- 67.Maitra K. K. Cascaded switching networks of two-input flexible cells.-IRE Trans. El. Comput., 1964, № 2, p. 25-31.
- 68.Makhapadhyay A. Unate cellular logic.- IEEE Trans. Comput., 1969, № 2, p. 18-27.
69. Recent developments in switching theory/Ed, by A. Makhapadhyay. -New York: Acad. Press, 1971. -583 p.
- 70 Osman M. Y., Weiss C. D. Universal base functions and modules for realizing arbitrary switching functions. - IEEE Trans. Comput., 1972, № 9, p. 114-127.
71. Patt Y. N. A complex module for the synthesis of combinational switching circuits.- In: Proc. 1967 AFIPS Spring Joint Comput. Conf. 20, p. 72-85.
- 72.Sklansky J., Korenjak A. J., Sone H. S. Canonical tributary networks. - IEEE Trans. Comput., 1965, A<sup>r</sup>s 6, p. 62-68.
- 73.Smith R. A. Minimal three variable NOR and NAND logic circuits. -ИГ 1-E Trans. Comput., 1969, № 2, p. 114-117.
- 74.Yau S. S., Tang C. K. Universal logic modules and their applications.-11.1 T: Trans. Comput., 1970, № 2, p. 18-23.

---

Введение.....	3
<b>Глава первая. Логическое управление в системах автоматки.....</b>	<b>10</b>
1-1. Задачи логического управления. Структура и техническая реализация логических устройств .....	-
1-2. Способы задания алгоритмов работы управляющих логических устройств.....	13
<b>Глава вторая. Функциональный базис настраиваемых модулей .....</b>	<b>19</b>
2-1. Настраиваемые модули. Основные понятия и определения .....	-
2-2. Выбор функционального базиса модулей .....	22
2-3. Свойства неповторных булевых формул .....	30
<b>Глава третья. Настраиваемые модули из функциональных элементов .....</b>	<b>42</b>
3-1. Порождающие функции. Свойства и характеристики ....-	
3-2. Построение модулей с минимальным числом внешних выводов.....	47
3-3. Пример построения порождающей функции настраиваемого модуля.....	61
3-4. Техническая реализация настраиваемых логических модулей.....	68
<b>Глава четвертая. Построение логических схем из настраиваемых логических модулей.....</b>	<b>71</b>
4-1. Реализация схем в базисе настраиваемых модулей .....	-
4-2. Оценки сложности реализации .....	84
<b>Глава пятая. Цифровые интегральные микросхемы широкого применения как настраиваемые модули .....</b>	<b>95</b>
5-1. Оценка логической эффективности микросхем.....-	
5-2. Построение логических схем на микросхемах.....	101
5-3. Унификация блоков логики, построенных из микросхем широкого применения.....	106
<b>Глава шестая. Однородные структуры из настраиваемых модулей .....</b>	<b>114</b>
6-1. Однородные структуры. Основные понятия и определения .....	-
6-2. Реализация булевых формул в однородных структурах из комбинационных элементов .....	116
<b>Глава седьмая. Настраиваемые модули из элементов с двусторонней проводимостью.....</b>	<b>126</b>
7-1. Особенности схем из элементов с двусторонней проводимостью.....-	
7-2. Выбор структуры настраиваемых модулей из ЭДП.....	129
7-3. Построение схем из ЭДП в базисе настраиваемых модулей .....	133
7-4. Унификация блоков логики из элементов с двусторонней проводимостью .....	153
Заключение .....	159
Список литературы.....	160

Валерий Леонидович Артюхов

Геннадий Александрович

Копейкин Анатолий Абрамович Шалыто

## **НАСТРАИВАЕМЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Редактор *В. А. Романов*

Художественный редактор *Д. Р. Стеванович*

Технический редактор *А. Г. Рябкина*

Корректор *В. В. Румянцев*

Обложка художника *Ю. И. Прошлецова*

ИБ № 1153 („Энергия“)

Сдано в набор 27.01.81. Подписано в печать 14.05.81. М-21484. Формат 60X90  $\frac{1}{16}$  - Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 10,5. Уч.-изд. л. 11,4. тираж 7000 экз. Заказ 978. Цена 60 к.

Ленинградское отделение Энергоиздата. 191041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 2 ч головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, .198052, Ленинград, Измайловский проспект, 29,

### **В КНИГОТОРГАХ СТРАНЫ ИМЕЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЭНЕРГИЯ»**

#### **В Волгоградском**

Брынский Е. А., Данмлевич Я. Б., Яковлев В. И. Электромагнитные поля в электрических машинах. Л., Энергия, 1979. 80 к. Имеется 10 экз.

**Извозчиков В. А., Тимофеев О. А.** Фотопроводящие окислы свинца в электронике. Л., Энергия, 1979. 65 к. Имеется 10 экз.

400001, Волгоград, Рабоче-Крестьянская ул., 13. С/с 92453102 в городском управлении Госбанка.

#### **В Донецком**

Захаров В. К. Электронные элементы автоматики. Учебник для вузов по специальности «Автоматика и телемеханика».- 2-е изд., перераб. и доп. Л., Энергия, 1975. 1 р. 05 к. Имеется 90 экз.

340002, Донецк, ул. Б. Хмельницкого, 102. С/с 92453001 в Калининском отделении Госбанка.

#### **В Кзыл-Ординском**

**Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л., Энергия, 1974. 2 р. 43 к. Имеется 56 экз.

460701, Кзыл-Орда, ул. 60 лет Октября, 143. С/с 9245302 в городском отделении Госбанка.

#### **В Киевском**

**Заездный А. М.** Гармонический

синтез в радиотехнике и электросвязи.- 2-е изд., испр. и доп. Л., Энергия, 1972. 1 р. 96 к. Имеется 121 экз.

**Цифровые схемы** распределения тока. Л., Энергия, 1969.

70 к. Имеется 273 экз.

252124, Киев, ул. Радищева, 12/16. С/с 92045305, в областной конторе Госбанка.

### **В Кировском**

**Использование** водной энергии. Учеб. пособие для втузов/ Д. С. Щавелев, П. И. Васильев, Ю. С. Васильев и др. Под ред. Д. С. Щавелева. Л., Энергия, 1976. 2 р. 46 к. Имеется 10 экз. 610000, Киров, ул. Ленина, 88. С/с 9245303 в городском управлении Госбанка.

### **В Ленинадском**

**Меерсон А. М.** Радиоизмерительная техника. -3-е изд. пере-раб. и доп. Л., Энергия, 1978. Массовая радиобиблиотека (Вып. 960). 2 р. 50 к. Имеется 60 экз. 735690, Ленинад, Кайраккумский поворот. С/с 9245302 в городском отделении Госбанка.

### **В Мособлкниге**

**Анисимов В. И.** Топологический расчет электронных схем. Л., Энергия, 1977. 1 р. 10 к. Имеется 70 экз. 111399, Москва, ул. Metallургов, 58. С/с 9245202 в областной конторе Госбанка.

### **В Новочеркасском**

**Дельвинг Г. Н., Траскунов П. М., Царюк Н. М.** Управление качеством продукции в электроприборостроении. Л., Энергия, 1977. 70 к. Имеется 31 экз.

**Иоссель Ю. Я.** Расчет потенциальных полей в энергетике. Справочная книга. Л., Энергия, 1978. 1 р. 30 к. Имеется 30 экз.

346430, Новочеркасск, пр. Ленина, 10. С/с 92453303 в областной конторе Госбанка.

### **В Павлодарском**

**Авербух А. М.** Релейная защита в задачах с решениями и примерами. Л., Энергия, 1975. 1 р. 43 к. Имеется 95 экз.

637021, Павлодар, ул. Фрунзе, 151. С/с 9245301 в городской конторе Госбанка.

### **В Свердловском**

**Пехович А. И., Жидких В. М.** Расчеты теплового режима твердых тел. -2-е изд., перераб. и доп. Л., Энергия, 1976. 1 р. 32 к. Имеется 34 экз.

620046, Свердловск, Артинская ул., 23-А. С/с 92453701 в городском управлении Госбанка.