

Л. Г. Красневский

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГИДРОСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТЫМИ ПЕРЕДАЧАМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ СИНТЕЗА РЕЛЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ

Как известно, трудами советских ученых созданы совершенные методы синтеза планетарных механических и гидромеханических передач. Преимущества регулярных методов синтеза настолько очевидны, что они начинают разрабатываться и для передач с неподвижными осями валов (вальных передач).

подавляющее большинство планетарных и вальных автомобильных передач с фрикционным переключением имеет гидравлические системы управления. Однако единых методов построения таких систем до настоящего времени нет. Существующие интуитивные приемы в общем случае не могут обеспечить отыскание наивыгоднейших схем, тем более учет всех факторов, влияющих на их работу. Таким образом, назрела необходимость в создании единой методики построения гидросистем управления для различных многоступенчатых передач (МП). Эта методика должна содержать определенную последовательность приемов получения схемы системы управления, обладающей наперед заданными свойствами, и тем самым служить продолжением синтеза самих передач.

В данной работе предлагается способ построения гидросистем управления, основанный на методах синтеза релейных устройств.

Известно, что в общем случае систему управления МП можно рассматривать как релейную систему управления скоростью автомобиля с переменной настройкой. Теория релейных устройств охватывает поэтому весь круг вопросов, связанных с управлением такой передачей: динамику и структуру системы. Здесь рассматривается только ее структура. Для этой цели гидросистема управления может быть изображена схемой, показанной на рис. 1.

Входами схемы являются напорная и сливная магистрали, а выходами — магистрали включения гидроцилиндров. Задача схемы — включение определенной комбинации гидроцилиндров в зависимости от комбинации управляющих сигналов. Такое представление системы удобно тем, что оно совпадает как для командного, так и автоматического управления. В первом случае управляющие

сигналы подаются водителем (они могут быть механическими, электрическими и др.), во втором — автоматическим устройством, которое может быть отдельным узлом либо конструктивно объединено известным образом со схемой (рис. 1). Если давления на выходах и управляющих входах обозначить через 1 и 0, то они будут изображать собой двоичные числа с разным числом разрядов. Устройства такого рода известны в теории релейных устройств как логические (комбинационные, переключательные) схемы.

На первый взгляд задача построения системы управления (рис. 1) элементарна: достаточно установить по одному клапану, например с электромагнитным управлением, на каждый гидроцилиндр МП, не связывая эти клапаны между собой. Подобная схема показана в работе [1] для трансмиссии ZF-Hydro-media. Но для сложных МП такая схема неэкономична.

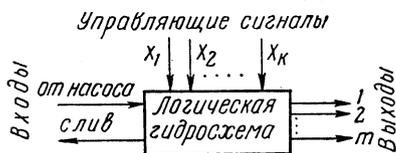


Рис. 1. Логическая схема гидросистемы.

Например, при восьми гидроцилиндрах может оказаться достаточно только трех-четыре электромагнитов. Кроме того, схемой такого вида трудно обеспечить специфические требования к системе управления, предъявляемые МП как объектом управления.

Важнейшим среди этих требований является недопущение одновременного включения числа гидроцилиндров (фрикционов) большего, чем $\lambda - 1$, где λ — число степеней свободы передачи. Это ограничение обеспечивается либо принудительным гидравлическим выключением с помощью двусторонних гидроцилиндров, либо надлежащей структурой гидросистемы, которая в этом случае напоминает устройства блокировки в обычных механических КПП.

К современным системам управления тяжелых МП предъявляется также ряд требований, регламентирующих их поведение в случае отказов.

Перечисленные ограничения существенно усложняют структуру системы управления по сравнению с элементарной. Задача заключается в построении регулярного аппарата для нахождения такой структуры по заранее выбранным условиям. Его существование будет оправдано лишь в том случае, если вероятное количество различных схем достаточно велико. Очевидно, что оно определяется количеством различных МП, а также возможностью использования одной и той же схемы управления для различных передач. Следовательно, чтобы решить эти вопросы, необходимо найти количественные характеристики связи между структурой системы управления и параметрами управляемой ею передачи.

Будем считать две многоступенчатые передачи эквивалент-

ными, если в них для переключения ступеней можно применить одну и ту же систему управления с соблюдением основных требований.

Очевидно, что для одной передач возможны различные варианты системы управления, отличающиеся принципом работы (командная, автоматическая), конструктивным исполнением и др. Но все они будут обладать некоторыми общими свойствами, обусловленными связью с данной передачей. Поскольку нас интересуют только эти свойства, будем условно считать, что каждой передаче соответствует только одна система управления (рис. 1).

Для разработки такой системы достаточно иметь об управляемой ею передаче следующие сведения: число степеней свободы λ , число элементов управления (гидроцилиндров) m , число ступеней n , порядок работы элементов на всех ступенях (рабочие комбинации гидроцилиндров), тип гидроцилиндров. Известно, что этих данных также достаточно, чтобы различать несхожие кинематические схемы передач. Поэтому будем характеризовать многоступенчатые передачи сочетанием параметров λ , m , n , которые назовем **кинематической формулой** передачи. Например, формулой передачи, имеющей $\lambda=3$, $m=6$, $n=5$, будет 3—6—5.

Нетрудно заметить, что хотя перечисленные данные характеризуют кинематическую схему, они формально касаются только элементов ее управления. Следовательно, анализ самих кинематических схем можно заменить рассмотрением разновидностей графиков работы элементов управления для различных кинематических формул.

Число реально возможных кинематических формул невелико — около 5000, из них широко применяются 30—50.

Но для одной кинематической формулы возможно большое количество различных механизмов. Оно определяется различной степенью использования элементов управления, характеризуемой отношением максимально возможного числа ступеней α передачи к действительному числу n .

Известно, что

$$\alpha = C_m^{\lambda-1}. \quad (1)$$

Если $\alpha > n$, то для одной кинематической формулы можно в принципе получить β механизмов:

$$\beta = C_\alpha^n = C_m^n \lambda_{-1}. \quad (2)$$

Подсчеты, выполненные по этой формуле, дают огромное количество механизмов. Например, для распространенной передачи 3—6—6 имеем $\beta \approx 5000$, а для передачи 4—6—9 $\beta \approx 168\,000$.

Обозначим элементы управления (гидроцилиндры) буквами a , b , c , ... или А, В, С, ... Обозначение гидроцилиндров, включаемых

на какой-либо ступени, будем называть **комбинацией** гидроцилиндров, или просто комбинацией. Совокупность комбинаций, соответствующих всем ступеням, назовем набором комбинаций, или просто **набором**.

Число β можно рассматривать как оценку верхней границы числа наборов. Действительное их количество меньше, так как в β вошли «пустые» наборы, не соответствующие исходным данным, и равносильные наборы, которые следует учитывать только по одному от каждого класса равносильности (равносильные наборы рассматриваются в работе [2] при синтезе планетарных МП).

Пустыми следует считать наборы, в которых: а) не содержится одного (или более) из m исходных символов; б) один (или более) символ входит во все наборы.

Были определены условия и границы существования пустых наборов обоих типов и сделана попытка подсчитать их количество с целью уточнения действительного числа их. Оказалось, что от отбраковки пустых наборов нельзя ожидать существенного уменьшения числа β . Например, для формулы 4—6—7 было найдено $\beta \approx 77\,500$, а суммарное число пустых наборов — всего лишь 1440. Оставшееся количество превышает действительное число в основном за счет равносильных наборов. Их можно в принципе отыскать поочередным переименованием всех элементов управления, как это делается при синтезе планетарных передач [2]. Но такая работа нереальна.

Таким образом, анализ числа различных наборов показывает, что возможное количество схем систем управления весьма велико и не поддается перебору. В связи с этим необходимо найти специальные приемы для распознавания отличных друг от друга наборов (или систем управления и самих МП), не прибегая к анализу схем и конструкций. Такие приемы позволили бы решить ряд практических вопросов, в частности интересную задачу, называемую «задачей стыковки». Она заключается в следующем. Даны произвольная МП и система управления, имеющие одинаковые кинематические формулы, а наборы для них заданы в разных алфавитах. Нужно определить, пригодна ли система управления для данной МП, и при положительном ответе найти правильное соединение выходов системы с гидроцилиндрами МП.

В принципе задачу можно решить путем перебора всех возможных переименований символов обоих наборов. Но эту работу приходится выполнять вслепую, что приводит к большому числу операций. Она существенно упрощается, если использовать некоторые свойства наборов.

Если символы набора изобразить точками, произвольно расположенными на чертеже, а затем соединить линиями те символы, которые входят в общие комбинации, то получим граф, изображающий набор (т. е. представляющий порядок работы элементов управления) и подобный графам, применяемым при синтезе МП.

Двухстепенным МП соответствует нуль-граф. При большем числе степеней свободы каждая комбинация набора будет изображаться на графе путем, длина которого на единицу меньше числа степеней. На рис. 2, *a* показан граф для формул 3—6—15 и 4—6—15.

Очевидно, что эквивалентным набором будут соответствовать изоморфные графы. Но при наличии в графе циклов условие изоморфности становится недостаточным, так как в каждом из них могут использоваться различные пути. Вероятно, эти задачи можно решить с помощью теории графов и комбинаторики. Нами ис-

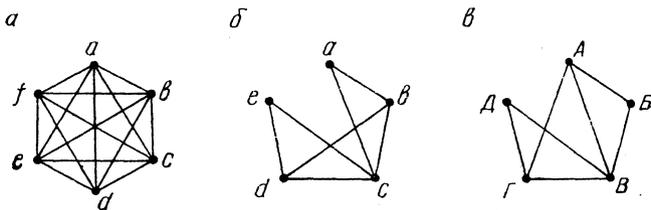


Рис. 2. Графы наборов:

a — полный граф для кинематических формул 3—6—15 и 4—6—15;
б, в — графы наборов № 1 и 2.

пользован более простой путь, подобный некоторым приемам из теории релейных устройств и основанный на понятии числа вхождений каждого символа в набор, или просто вхождения.

Каждый из *m* символов *a, b, c, ...* используется в наборе определенное число раз. Это число вхождений, или просто вхождение. Оно показывает, на скольких ступенях МП включается данный элемент управления. Выписав все вхождения в порядке алфавитного расположения соответствующих символов, получим формулу набора.¹ На рис. 2, *б, в* показаны графы наборов, соответствующих одной кинематической формуле 4—5—5:

набор № 1: *abc—acd—ace—bce—bde*;

набор № 2: *АБВ—АГД—БВГ—БВД—АВД*.

Формулы наборов будут иметь вид: для набора № 1 3—3—4—2—3; для набора № 2 3—3—4—2—3, т. е. формулы одинаковы.

Очевидно, что для эквивалентности наборов необходимо совпадение их формул. Но можно показать, что и это условие недостаточно. Оно характеризует степени использования элементов управления, но не отражает связи между ними. Эти связи можно выразить, заменив символы в каждой комбинации набора числами их вхождений. Если полученные комбинации вхождений у сравниваемых наборов одинаковы (порядок расположения цифр безразличен), то наборы эквивалентны.

¹ Следует отметить, что вхождение совпадает с понятием степени графа набора в соответствующей вершине, т. е. показывает число инцидентных ей ребер.

Описанные операции удобно проделать с помощью таблиц, полученных из обычных таблиц задания графиков работы элементов управления. К ним добавляется снизу еще одна строка. Записав в ней числа единиц каждого столбца, получаем вхождение. После этого не представляет труда в добавленном справа столбце получить комбинации вхождений. Эта процедура для набора № 1 и 2 показана в табл. 1.

Таблица 1

Нахождение формул наборов и комбинаций вхождений

Номер комбинации	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	Комбинации вхождений	А	Б	В	Г	Д	Комбинации вхождений
1	1	1	1			3-3-4	1	1	1			3-3-4
2	1		1	1		3-4-2	1			1	1	3-2-3
3	1		1		1	3-4-3		1	1			3-4-2
4		1	1		1	3-4-3	1	1	1		1	3-4-3
5		1		1	1	3-2-3			1		1	3-4-3
Вхождение	3	3	4	2	3		3	3	4	2	3	

Видно, что комбинации вхождений совпадают, и наборы эквивалентны. Остается найти соответствие между их символами. Из сравнения вхождений следует, что обязательно $c=В$ и $d=Г$. Далее, сравнивая комбинации вхождений, находим, что $a=Б$. Для оставшихся символов возможно $e=А$ и $b=Д$ либо $b=А$ и $e=Д$, что равносильно. Заменяя символы по этим равенствам, получим из одного набора другой, что и требовалось. Соответствующее решение задачи стыковки для этого примера изображено на рис. 3.

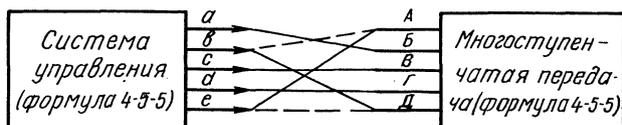


Рис. 3. Стыковка системы управления и многоступенчатой передачи.

Формула набора обладает некоторыми интересными свойствами, с помощью которых можно, не прибегая к анализу самих наборов, указать их возможные формулы для любой многоступенчатой передачи, зная только ее кинематическую формулу, т. е. синтезировать формулы наборов по кинематическим формулам. Одним из практических результатов, связанных с этим понятием, является определение области существования схем управления,

имеющих вид, известный в теории графов и релейных устройств под названием деревьев, или пирамид. Ценное свойство этих схем — простота и легкость построения, но они полностью пригодны только для определенных типов МП. Нами были найдены формулы наборов для таких МП, а по формулам наборов — и кинематические формулы МП. Результаты даны в табл. 2, где применяемость деревьев отмечена знаком «плюс». В принципе можно считать, что эти МП ввиду простоты выпадают из области синтеза схем управления. Но следует отметить, что в общем случае (при учете отказов) даже для таких МП нахождение схем требует применения методов синтеза.

Таблица 2

Область применения схем управления в виде деревьев

λ	2					3					4				
	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8
4	+					+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5		+				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6			+			-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
7				+		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8					+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-
9						-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
10						-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
11							-	-	-	-	-	-	-	-	-
12								-	+	+	-	-	-	+	-
13								-	-	-	-	-	-	-	-
14								-	-	-	-	-	-	-	-
15								-	-	-	+	-	-	-	-
16									-	+	-	-	-	-	+

Существующие в теории релейных устройств методы синтеза логических схем, к которым относятся и рассматриваемые здесь системы, основаны на законах булевой алгебры. Они обычно дают результаты в виде системы булевых функций, которые затем по определенным правилам реализуются схемой искомой системы. Применительно к гидросхемам такой метод описан в работе [3]. Для сложных МП алгебраический метод слишком громоздок.

В литературе [4] предложен более удобный метод синтеза пневмосистем, пригодный и для гидросистем. Но он также дает результат в виде системы булевых функций, переход от которой к схеме требует определенных навыков. В связи со спецификой рассматриваемых систем в данном случае более удобен метод, который позволял бы по исходным данным получить готовую принципиальную схему, минуя составление и обработку булевых функций. В качестве такового нами использован канонический метод синтеза переключательных схем [5].

Для гидросистем канонический метод сводится к следующему. Число золотников в схеме принимается равным числу действующих на них управляющих сигналов K («контактная» реализация схемы). Включенное состояние золотника (возвратная пружина сжата) и наличие соответствующего сигнала обозначается единицей, выключенное — нулем. Сигналы могут быть гидравлическими, механическими, пневматическими. Число возможных вариантов взаимного расположения золотников (состояний), а также комбинаций управляющих сигналов будет равно 2^K . Эти варианты представляются таблицей состояний, содержащей 2^K строк,

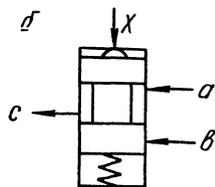
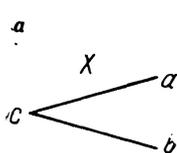


Рис. 4. Куст канонической таблицы и его гидравлическая реализация:

a — куст, b — соответствующий кусту золотник.

заполненных двоичными K -разрядными числами в порядке возрастания их величины. К таблице добавлено m столбцов (по числу выходов и числу гидроцилиндров МП), в которых указаны значения выходов. По таблице состояний строится каноническая таблица, графически совпадающая с известной схемой дерева. Все вершины канонической таблицы определенным образом нумеруются [5], одинаковые номера объединяются. Каждая вершина с двумя исходящими из нее отрезками образует «куст» (рис. 4, a), реализующий булеву функцию

$$c = a\bar{X}VbX.$$

Ту же функцию дает трехлинейный золотник с пружинным возвратом (рис. 4, b). Если каждую вершину канонической таблицы заменить шейкой такого золотника, то получим принципиальную золотниковую схему с K золотниками, каждый из которых имеет число шеек, равное числу номеров в соответствующем столбце таблицы. При гидравлических управляющих сигналах к каждому золотнику добавляется еще по одной шейке.

Таким образом, составив таблицу состояний, можно считать, что искомая схема определена (предполагая, что таблице соответствует только одна схема). Однако при составлении таблицы возникают определенные трудности.

Поскольку схема имеет $n+1$ рабочих состояний (по числу ступеней МП плюс нейтраль), а схема — 2^K состояний, то для

$$n + 1 < 2^K \quad (3)$$

выбрать рабочие состояния можно следующим числом способов:

$$N = C_{2^K}^{n+1}. \quad (4)$$

Чтобы найти среди них подходящий вариант, нужно определить критерии и способы отбраковки. В качестве основного критерия можно принять поведение схемы при отказах. Оно полностью определяется использованием $2^K - n - 1$ нерабочих состояний. Можно показать, что для гидравлических систем пригодные в отношении отказов схемы должны в каждом рабочем состоянии иметь одинаковое число r управляющих сигналов; причем желательно, чтобы оно было не меньше двух. В нейтральном состоянии сигналы должны отсутствовать или их должно быть меньше, чем в рабочих. При таком построении требуемое число сигналов (и соответственно — золотников) K^* будет определяться формулой

$$n \leq C_{K^*}^r, \quad (5)$$

и число N уменьшается во много раз. С помощью некоторых соображений оно может быть сведено к нескольким равноценным вариантам, из которых можно выбрать любой.

Описанная процедура представляет собой синтез таблицы состояний и относится к общему случаю синтеза схем. Для других случаев, например для систем автоматического управления, входные комбинации сигналов могут быть заданы заранее (конструктивно), и построение таблицы упрощается.

Таким образом, в общем случае синтез схемы управления МП осуществляется в следующем порядке.

1. Определяется число золотников K по формулам (3) или (5) (оно может также быть задано в исходных условиях).

2. Синтезируется таблица состояний, состоящая из 2^K строк и $K + m$ столбцов. В качестве рабочих выбираются n строк из $C_{K^*}^2$ строк, отвечающих условию (5), и первая строка — для нейтрала.

Рабочие состояния можно размещать в выбранных строках произвольно либо по конструктивным соображениям.

3. По таблице состояний строится каноническая таблица.

4. Каноническая таблица упрощается, и строится структурная схема. При этом единичный вход принимается за напорный вход схемы. Нулевые ветви не отбрасываются (как при синтезе электрических схем), а образуют сливную сеть схемы.

5. По структурной схеме строится конструктивная золотниковая схема, для чего вершины заменяются изображениями шеек золотников, а ветви принимаются за магистрали гидросистемы.

В качестве примера возможностей предлагаемой методики на рис. 5 показан синтез командной системы управления для сложной планетарной передачи 3—4—6 с полным использованием элементов управления, схема которой получена в работе [6]. Принято, что сигналы управления будут гидравлическими, и схема должна

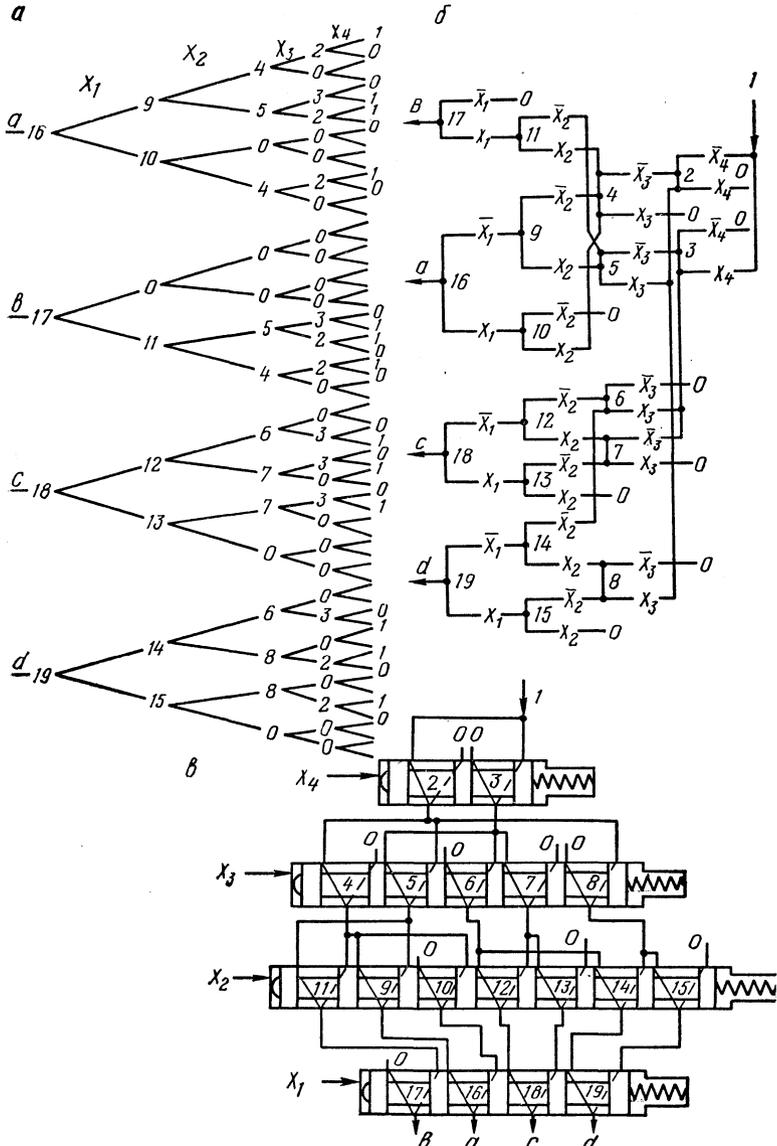


Рис. 5. Синтез схемы для МП 3—4—6:

a — каноническая таблица; *б* — структурная схема; *в* — конструктивная схема.

быть максимально защищена от опасных отказов. В табл. 3 дана полученная для этого случая таблица состояний. На рис. 5, *a*, *б*, *в* приведены соответственно исходная каноническая таблица, струк-

Таблица 3

Таблица состояний для системы управления трансмиссией 3—6—4

Номер состояния	X_1	X_2	X_3	X_4	a	b	c	d
1	0	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0	1	1
5	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	1	1	0	1	0
7	0	1	1	0	1	0	0	1
8	0	1	1	1	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	0	0	0
10	1	0	0	1	0	1	1	0
11	1	0	1	0	0	1	0	1
12	1	0	1	1	0	0	0	0
13	1	1	0	0	1	1	0	0
14	1	1	0	1	0	0	0	0
15	1	1	1	0	0	0	0	0
16	1	1	1	1	0	0	0	0

турная и конструктивная схемы. Из рис. 5 видно, что она достаточно сложна. За счет ослабления требований в отношении отказов схему можно упростить.

Для синтеза сложных схем (в особенности для анализа встречающихся при этом вариантов) при использовании теории релейных устройств можно применить цифровые вычислительные машины, так как соответствующие машинные методы интенсивно развиваются для электрических устройств.

Литература

- [1] Лapidус В. И., Петров В. А. Гидромеханические передачи автомобилей. М., 1961. [2] Крюков А. Д., Харченко А. П. Выбор трансмиссий гусеничных и колесных машин. М., 1963. [3] Перекрестов А. В. Построение релейных схем гидроавтоматики. М., 1965. [4] Герц Е. В. и др. Синтез пневматических приводов. М., 1966. [5] Блох А. Ш. Синтез переключательных схем. Минск, 1966. [6] Крейнс М. А., Розовский М. С. Зубчатые механизмы. М., 1965.