УДК 62-231.1

СИНТЕЗ СХЕМ МНОГОСКОРОСТНЫХ ПЕРЕДАЧ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПОДКЛЮЧЕНИЕМ ОДНОТИПНЫХ ПО СТРУКТУРЕ МОДУЛЕЙ

© К.Б. Саламандра

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Аннотация. *В работе предлагается методика синтеза кинематических схем многоскоростных передач на базе структурно однотипных модульных механизмов. С увеличением числа модульных механизмов, составляющих коробку передач, быстро растет количество ступеней коробки. Модульным кинематическим схемам поставлены в однозначное соответствие математические системы счисления, в которых количество разрядов равно количеству однотипных модулей, а цифры в этих разрядах совпадают с комбинацией включенных управляющих элементов и определяют соответствующее передаточное отношение.*

Ключевые слова*: многоскоростная передача, коробка передач, кинематическая схема, планетарный механизм, трансмиссии.*

Многоскоростные передачи (коробки передач) применяются в различных областях техники, где необходимо изменять скорость, крутящий момент и направление вращения. В настоящее время многие коробки передач строятся на основе планетарных механизмов с различным числом степеней свободы. Простая планетарная передача или планетарный ряд – это механизм, имеющий две степени свободы, состоящий из двух центральных зубчатых колес – солнечного и эпициклического, находящихся друг с другом в зацеплении через сателлиты, размещенные на водиле. Планетарные механизмы используются в силу ряда их преимуществ:

- малые габариты, вес и, что важно, уравновешенность конструкции;
- планетарные ряды расположены соосно, симметрично относительно входного и выходного вала;
- меньшие нагрузки на внутренние звенья: в планетарной передаче момент передается несколькими сателлитами, что позволяет распределить нагрузку между ними;
- возможность вращаться как единое целое при замыкании двух звеньев планетарного ряда на входной вал.

В общем случае число N степеней свободы коробки передач определяется суммой чисел степеней свободы планетарных рядов, составляющих эту коробку за вычетом количества жестких кинематических связей, наложенных на основные подвижные звенья планетарных рядов. Уменьшение числа степеней свободы коробки передач до 1 в процессе работы для реализации какого-либо передаточного отношения из требуемого ряда обеспечивается введением необходимого числа управляемых (включаемых соответствующими муфтами) кинематических связей.

Суть синтеза схем коробок передач заключается в выявлении такой схемы и таких жестких связей между основными подвижными звеньями, которые бы обеспечивали требуемое число ступеней и заданный ряд передаточных отношений. Трудности синтеза коробок с большим числом N степеней свободы и соизмеримым числом жестких кинематических связей привело к тому, что в настоящее время нашли применение коробки с 2-я, 3-я и 4-я степенями свободы. Коробки передач с $N = 5$ пока не применяются, но уже

известны на уровне изобретений. В них с помощью управляемых связей ликвидируются соответственно 1, 2, 3 или 4 степени свободы.

О трудностях синтеза коробок передач говорит тот факт, что формально при $N = 3$ и 6-ти ступенях существует множество в 303750 вариантов схем, среди которых не всегда наберется и десятка схем, удовлетворяющих всему многообразию условий, предъявляемых к коробке. Проблемам синтеза схем коробок посвящены классические работы [1, 2, 3, 4 и др.], в которых изложена методика поиска нужной схемы из полного множества возможных. Данная методика реализована максимум при числе однорядных планетарных механизмов $l \leq 3$, числе степеней свободы $N \leq 3$ и числе ступеней $K \leq 6$. Варианты схем коробок с бóльшим числом указанных параметров известны по патентам.

Известны зависимости между максимальным числом ступеней, количеством используемых управляющих элементов и числом степеней свободы коробки передач [5]. Так, например, в коробках передач с двумя степенями свободы при заданном количестве элементов управления m можно получить m ступеней.

Минимальное число m управляемых элементов связано с числом K ступеней и числом N степеней свободы коробки известным соотношением [6]:

$$K \leq C_m^{N-1} = \frac{m!}{(N-1)!(m-N+1)!}, \text{ где}$$

C – число сочетаний. В таблице приведены минимальные значения m при различных K и N.

Таблица 1.

K	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
***m* при *N* = 2**	4	5	6	7	8	9	10	11	12
***m* при *N* = 3**	4 (4,8)	4 (5)	4 (5)	5 (5,5*)	5 (6,7*)	5 (6*)	5	6	6
***m* при *N* = 4**	4 (4,23)	5 (7,5)	5	5	5 (6*)	5	5	6	6
***m* при *N* = 5**	5	5	6	6 (6*)	6 (6,9*)	6 (7*)	6	6	6

*В скобках даны средние фактические значения m по известным из технической литературы и применяемым коробкам передач. Наличие * в скобках указывает на схемы, известные по патентам.*

Несовпадение теоретически минимального числа m управляемых элементов с фактическим (указанным в скобках) обусловлено сложностью синтеза схем коробок передач с большим числом ступеней и многообразием предъявляемых к коробкам требований. Из таблицы видно, что при числе ступеней $K \geq 5$ неразумно использовать коробки передач с числом степеней свободы $N = 2$, поскольку они потребуют большого количества управляемых муфт.

Перспективной может оказаться разработка схем коробок передач на базе однотипных модульных механизмов. Как будет показано ниже, с увеличением числа модульных механизмов, составляющих коробку передач, быстро растет количество ступеней с одновременным увеличением числа N степеней свободы. Такие коробки передач позволяют уменьшить количество элементов управления, повысить технологичность конструкции, упростить ремонт и техническое обслуживание. Модульность конструкции заключается как в использовании однотипных механизмов, так и в их одинаковых схемах соединения друг с другом.

В настоящей работе рассматриваются примеры построения схем модульных коробок передач путем последовательного подключения однотипных механизмов (модулей) с различным числом степеней свободы и состояний, дается методика синтеза передаточных отношений модулей для случая, когда коробка должна обеспечивать геометрический ряд передаточных отношений в заданном диапазоне, и, наконец, дается удобное для управления

коробкой формализованное описание состояния всех модулей, обеспечивающее требуемое передаточное отношение коробки в целом.

В общем случае коробка передач, состоящая из *S* однотипных модулей, может быть представлена структурной схемой (*рис. 1*).

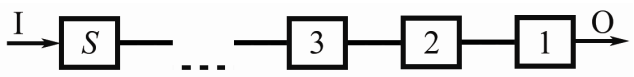


***Рис. 1**. Структурная схема модульной коробки передач. Количество модулей от 1 до S;*
I, O *– соответственно входное и выходное звенья модульной коробки передач.*

Если каждый из модулей имеет *n* степеней свободы и обеспечивает *k* ступеней, то нетрудно показать, что максимальное число *K* ступеней и число *N* степеней свободы коробки, составленной из *S* таких модулей, определятся простыми соотношениями:

$$K = k^S \qquad (1)$$

$$N = 1 + S \cdot (n-1), \qquad (2)$$

откуда следует, что добавлением одного модуля (увеличением *S* на 1) резко возрастает максимальное количество *K* ступеней коробки при незначительном росте числа *m* управляемых муфт и числа *N* степеней свободы на величину (*n* – 1):

Таблица 2.

k	***S***				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
2	2	4	8	16	32
3	3	9	27	91	273
4	4	16	64	256	1024

В табл. 2 представлено максимальное количество ступеней K коробки в зависимости от числа k ступеней модуля и количества S модулей.

Из табл. 2 следует, что при небольшом числе *S* используемых модулей можно получить коробки с числом ступеней *K*, существенно превышающем аналогичный показатель применяемых и известных по технической литературе коробок (см. табл. 1).

Анализ и синтез коробок, образованных последовательным соединением однотипных модулей. Обозначим модули в порядке $j = 1,...,S$ справа налево, как показано на *рис. 1*. Состояние каждого модуля и его передаточное отношение однозначно определяется комбинацией включенных муфт модуля. Таких комбинаций в каждом модуле *k*. Будем обозначать состояние *j*-го модуля числом $a_{ji} = 0,...,(k-1)$. Если каждому модулю придать позиционную составляющую (вес) $p_j = k^{(j-1)}$, где (*j* = 1, …, *S*), то состояние всей коробки будет определяться *S*-разрядным числом *A*, в котором каждый *j*-ый разряд может иметь *i* значений a_{ji} от 0 до (*k* – 1):

$$A = \sum_{j=1}^{S} a_{ji} \cdot p_j = \sum_{j=1}^{S} a_{ji} \cdot k^{(j-1)} \qquad (3)$$

При последовательном изменении *j* от 1 до *S* и переборе a_{ji} от 0 до (*k* – 1) полученные значения *A* образуют натуральный ряд чисел от 0 до (*K* – 1).

Таким образом, модульной системе *рис. 1* мы поставили в однозначное соответствие некоторую *k*-ичную позиционную систему счисления, в которой количество разрядов равно количеству однотипных модулей, а цифра в *j*-ом разряде определяет состояние *j*-го модуля – комбинацию включенных муфт и соответствующее передаточное отношение.

Действительно, если коробка передач должна обеспечивать геометрический ряд передаточных отношений со знаменателем φ:

$$R = \left(\varphi^0 = 1\right), \varphi^1, \varphi^2, \varphi^3, \ldots, \varphi^{(K-1)} \qquad (4)$$

а каждый из модулей реализует степенную функцию $i_j = \varphi^{b_j}$ с целочисленным показателем b_j, то передаточное отношение всей коробки будет:

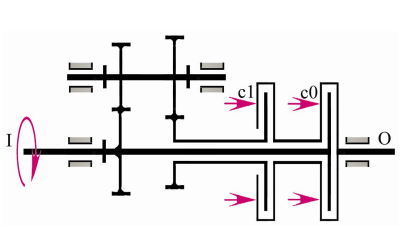
$$i_{IO} = \prod_{j=1}^{S} i_j = \varphi^{\sum_{j=1}^{S} b_j} \qquad (5)$$

где показатель степени $\sum_{j=1}^{S} b_j$ в соответствии с (4) должен быть натуральным рядом чисел от 0 до $(k-1)$.

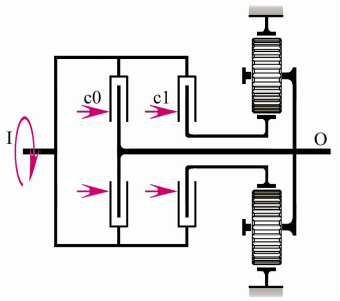
Представление этого ряда в виде (3), отображающем различные состояния коробки передач, даст $i_{IO} = \varphi^A$ и позволяет получить достаточное простое и удобное для синтеза выражение для определения передаточных отношений любого *j*-го модуля коробки:

$$i_j = \varphi^{a_{ji} k^{(j-1)}} \qquad (6)$$

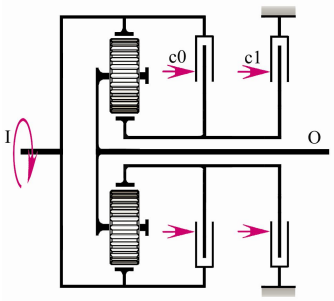
Построение и синтез модульной коробки передач из механизмов, имеющих *k* = 2 состояния, покажем на примере схем, представленных на *рис. 2*. Здесь каждый из механизмов имеет $n = 2$ степени свободы и управляется двумя муфтами с0 и с1. Если включена муфта с0, то имеет место прямая передача ($i = 1$); если же включена с1, то $i > 1$ – понижающая ступень. Эти состояния модуля определены числовым коэффициентом соответственно $a_1 = 0$ и $a_2 = 1$.



а



б



в

a_i	c0	c1
0	+	–
1	–	+

г

***Рис. 2**. Схемы модулей с двумя состояниями: а – рядовой с неподвижными осями валов; б – планетарный с неподвижным эпициклическим колесом; в – планетарный с неподвижным солнечным колесом; г – таблица состояний модуля.*

Задача 1. Необходимо синтезировать схему модульной коробки передач путем последовательного соединения механизмов *рис. 2* для получения $K = 8$ ступеней, образующих геометрический ряд от $i_{IO} = 1$ (прямая передача) до $i_{IO} = 8{,}75$.

Решение. Исходя из (1) определяем, что для получения $K = 8$ ступеней с помощью механизмов, имеющих $k = 2$ состояний, необходимо $S = \dfrac{\log K}{\log k} = 3$ механизма. Схема такой коробки, построенной на базе механизма *рис. 2, б*, представлена на *рис. 3*.

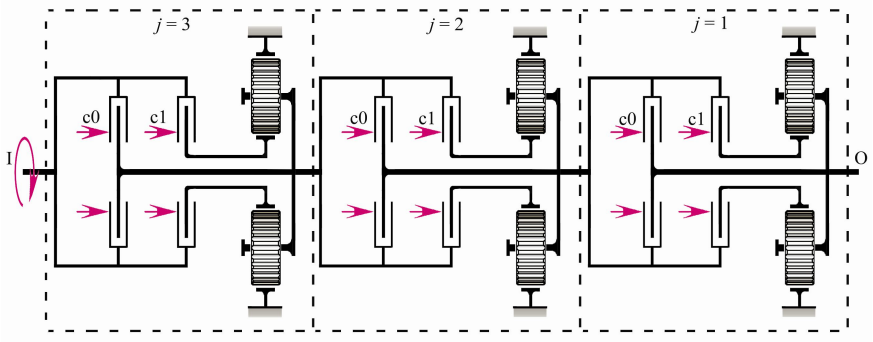


***Рис. 3**. Кинематическая схема 8-ми ступенчатой модульной коробки передач на базе механизма рис. 2, б.*

Исходя из заданного диапазона $D = 8{,}75$ и числа $K = 8$ ступеней, получим знаменатель φ заданного геометрического ряда в виде $\log\varphi = \dfrac{\log D}{K-1} = \dfrac{\log 8{,}75}{7} = 0{,}13457$, откуда $\varphi = 1{,}363$. Далее по (6) определяем передаточные отношения каждого модуля:

$$\text{для } j = 1: \quad i_{10} = \varphi^{0\cdot 2^0} = 1 \qquad i_{11} = \varphi^{1\cdot 2^0} = \varphi = 1{,}363$$

$$\text{для } j = 2: \quad i_{20} = \varphi^{0\cdot 2^0} = 1 \qquad i_{21} = \varphi^{1\cdot 2^1} = \varphi^2 = 1{,}858$$

$$\text{для } j = 3: \quad i_{30} = \varphi^{0\cdot 2^0} = 1 \qquad i_{31} = \varphi^{1\cdot 2^2} = \varphi^4 = 3{,}451$$

Поскольку каждый из модулей коробки имеет $k = 2$ состояния, а всего модулей $S = 3$, то состояние коробки описывается 3-х разрядным двоичным числом. Все возможные состояния и соответствующие передаточные отношения i_{IO} коробки приведены в табл. 3.

Таблица 3.

№ ступени	Передаточное отношение	i_{IO}	Состояние муфт $a_3\ a_2\ a_1$	Десятичное значение A двоичного числа $a_3\ a_2\ a_1$
1	8,739	$i_{11}\times i_{21}\times i_{31} = \varphi^7$	1 1 1	7
2	6,412	$i_{21}\times i_{31} = \varphi^6$	1 1 0	6
3	4,704	$i_{11}\times i_{31} = \varphi^5$	1 0 1	5
4	3,451	$i_{31} = \varphi^4$	1 0 0	4
5	2,532	$i_{11}\times i_{21} = \varphi^3$	0 1 1	3
6	1,858	$i_{21} = \varphi^2$	0 1 0	2
7	1,363	$i_{11} = \varphi$	0 0 1	1
8	1,00	φ^0	0 0 0	0

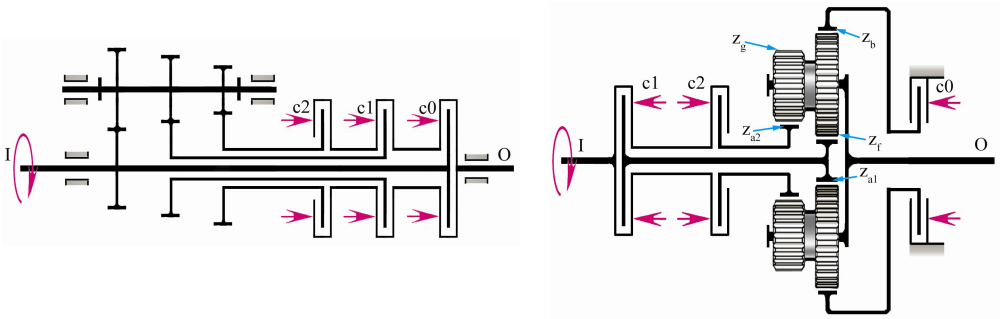
Цифра в младшем разряде двоичного числа определяет состояния муфт правого ($j = 1$) модуля в соответствии с *рис. 2, г*, а цифра во втором и старшем (третьем разряде) соответственно состояние второго и третьего модуля коробки. Отображение двоичного числа в десятичной системе счисления с помощью соотношения (3) дает значения A, равные показателю степени при знаменателе φ заданного ряда. Это позволяет достаточно просто управлять многоступенчатой коробкой передач: следует только представить необходимое передаточное отношение коробки (показатель степени при φ) в двоичном коде и полученное двоичное слово выдать на регистр управляющего устройства.

В заключение этой задачи отметим, что полученная коробка, имеющая K = 8 ступеней, в соответствии с (2) имеет число N = 4 степеней свободы, а количество управляемых муфт m = 6, что всего на единицу больше минимального значения m (см. табл. 1).

Модулями такой коробки могут быть механизмы *рис. 2, а, б, в* и аналогичные им в любом сочетании.

Задача 2. Необходимо синтезировать схему модульной коробки, имеющей K = 27 ступеней от $i_{IO} = 1$ до $i_{IO} = 8{,}75$ путем последовательного соединения механизмов с k = 3 состояниями.

Примерами таких модулей являются механизмы, представленные на *рис. 4*.



a_i	c0	c1	c2
0	+	–	–
1	–	+	–
2	–	–	+

а

a_i	c0	c1	c2
0	–	+	+
1	+	–	+
2	+	+	–

б

Рис. 4: *а – механизм на основе рядовых передач с таблицей состояний муфт; б – планетарный механизм с двухвенцовым сателлитом и соответствующая таблица состояний муфт.*

Механизм на *рис. 4, а* имеет n = 2 степени свободы, а в механизме *рис. 4, б* значение n = 3. В один тип их объединяет одинаковое число состояний: при $a_1 = 0$ имеем прямую передачу – на *рис. 4, а* входной вал напрямую соединяется муфтой c0 с выходным; на *рис. 4, б* при включении муфт c1 и c2 планетарный механизм блокируется и вращается как единое целое. При $a_2 = 1$ и $a_3 = 2$ на обоих механизмах имеем понижающие ступени с $i > 1$. В планетарном механизме при $a_2 = 1$ имеем $i = 1 + \frac{z_b}{z_{a2}} \cdot \frac{z_g}{z_f}$; при $a_3 = 2$ соответственно $i = 1 + \frac{z_b}{z_{a1}}$, где z – число зубьев колес, показанных на *рис. 4, б*.

Решение. Как следует из (1) для получения K = 27 ступеней необходимо S = 3 модуля с k = 3 состояниями. Схема такой коробки, построенной на основе планетарного механизма *рис. 4, б* представлена на *рис. 5*.

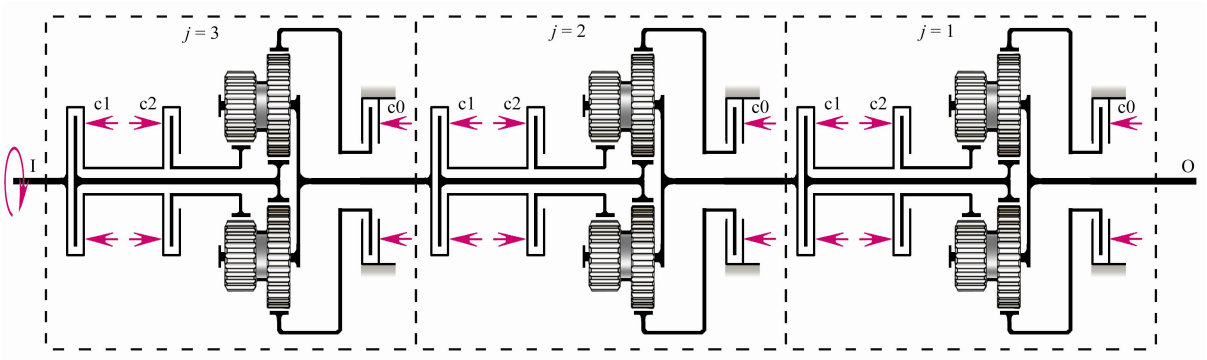


***Рис. 5**. Кинематическая схема 27-ми ступенчатой модульной коробки передач на базе механизма рис. 4, б.*

При диапазоне D = 8,75 и числе K = 27 получим $\log\varphi = \dfrac{\log D}{K-1} = 0{,}03623$, откуда $\varphi = 1{,}087$. Используя соотношение (6), рассчитываем передаточные отношения каждого модуля. Результаты сводим в табл. 4.

Таблица 4.

j	i_{j0}	i_{j1}	i_{j2}
1	1	$\varphi = 1{,}0870$	$\varphi^2 = 1{,}1816$
2	1	$\varphi^3 = 1{,}2844$	$\varphi^6 = 1{,}6497$
3	1	$\varphi^9 = 2{,}1189$	$\varphi^{18} = 4{,}4888$

Любое состояние полученной коробки передач и ее передаточное отношение определяется трехразрядным троичным числом. Все возможные состояния приведены в табл. 5.

Таблица 5.

№ ступени	Передаточное отношение	i_{IO}	Состояние муфт $a_3\ a_2\ a_1$	Десятичное значение A троичного числа $a_3\ a_2\ a_1$
1	8,7492	$i_{32}\times i_{22}\times i_{12} = \varphi^{26}$	2 2 2	26
2	8,0489	$i_{32}\times i_{22}\times i_{11} = \varphi^{25}$	2 2 1	25
3	7,4047	$i_{32}\times i_{22} = \varphi^{24}$	2 2 0	24
4	6,8121	$i_{32}\times i_{21}\times i_{12} = \varphi^{23}$	2 1 2	23
5	6,2669	$i_{32}\times i_{21}\times i_{11} = \varphi^{22}$	2 1 1	22
6	5,7653	$i_{32}\times i_{21} = \varphi^{21}$	2 1 0	21
7	5,3038	$i_{32}\times i_{12} = \varphi^{20}$	2 0 2	20
8	4,8793	$i_{32}\times i_{11} = \varphi^{19}$	2 0 1	19
9	4,4888	$i_{32} = \varphi^{18}$	2 0 0	18
10	4,1295	$i_{31}\times i_{22}\times i_{12} = \varphi^{17}$	1 2 2	17
11	3,7990	$i_{31}\times i_{22}\times i_{11} = \varphi^{16}$	1 2 1	16
12	3,4950	$i_{31}\times i_{22} = \varphi^{15}$	1 2 0	15
13	3,2152	$i_{31}\times i_{21}\times i_{12} = \varphi^{14}$	1 1 2	14

14	2,9579	$i_{31} \times i_{21} \times i_{11} = \varphi^{13}$	1 1 1	13
15	2,7212	$i_{31} \times i_{21} = \varphi^{12}$	1 1 0	12
16	2,5034	$i_{31} \times i_{12} = \varphi^{11}$	1 0 2	11
17	2,3030	$i_{31} \times i_{11} = \varphi^{10}$	1 0 1	10
18	2,1187	$i_{31} = \varphi^{9}$	1 0 0	9
19	1,9491	$i_{22} \times i_{12} = \varphi^{8}$	0 2 2	8
20	1,7931	$i_{22} \times i_{11} = \varphi^{7}$	0 2 1	7
21	1,6496	$i_{22} = \varphi^{6}$	0 2 0	6
22	1,5176	$i_{21} \times i_{12} = \varphi^{5}$	0 1 2	5
23	1,3961	$i_{21} \times i_{11} = \varphi^{4}$	0 1 1	4
24	1,2844	$i_{21} = \varphi^{3}$	0 1 0	3
25	1,1816	$i_{12} = \varphi^{2}$	0 0 2	2
26	1,0870	$i_{11} = \varphi$	0 0 1	1
27	1,0000	φ^{0}	0 0 0	0

Здесь также как и в предыдущей задаче, число A, получаемое переводом троичного числа в десятичное с помощью (3), равно показателю степени при φ, т.е. полностью определяет передаточное отношение коробки.

В заключение данной задачи отметим, что в соответствии с (2) число степеней свободы синтезированной коробки $N = 7$ при числе управляемых муфт $m = 9$. Если бы коробка создавалась на базе рядовых передач, то при том же числе муфт она бы имела $N = 4$ степени свободы.

Модульность конструкции коробок передач дает широкие преимущества с точки зрения увеличения числа ступеней путем наращивания количества простых однотипных механизмов. Известны работы [7, 8], посвященные выявлению рациональных схем построения модульных коробок передач. В работе [7] приведены примеры построения схем модульных коробок передач для реализации 64-х ступеней на базе модуля с 4-мя состояниями. При этом вместо четверичной системы счисления для синтеза использована логика двоичной системы счисления.

Методика синтеза модульных коробок передач, изложенная в настоящей работе, отличается общностью подхода, большей строгостью выкладок и лаконичностью формализованного описания.

Литература

1. Крейнес М.А., Розовский М.С. Зубчатые механизмы (выбор оптимальных схем). М.: Наука, 1972.
2. Красненьков В.И., Вашец А.Д. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин. М.: Машиностроение, 1986.
3. Волков Д.П., Крайнев А.Ф. Трансмиссии строительных и дорожных машин (Справочное пособие). М.: Машиностроение, 1974.
4. Иванченко П.Н., Сушков Ю.А., Вашец А.Д. Автоматизация выбора схем планетарных коробок передач (Справочное пособие). Л.: Машиностроение, 1974.
5. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Автомобиле- и тракторостроение» направления

подготовки дипломированных специалистов «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы». М.: Машиностроение, 2004.
6. Планетарные передачи (Справочник). [под ред. Кудрявцева В.Н. и Кирдяшева Ю.Н.] Л.: Машиностроение, 1977.
7. Патент US 4559848, 24.12.1985.
8. Патент РФ № 2298713, 10.05.2007.

Поступила: 03.12.09.