

Метод синтеза планетарных коробок передач с любым числом степеней свободы

Предложен новый универсальный метод структурного синтеза планетарных коробок передач с любыми числами степеней свободы и планетарных рядов, который можно применить для представления структуры любого трансформируемого элемента на ЭВМ.

Ключевые слова: структурный синтез, планетарная коробка передач, автоматизация структурного синтеза, матричное представление.

The new universal method of structural synthesis of epicyclic gearboxes with any numbers of degrees of freedom and planetary gear sets, which can be applied for computer representation of structure of any transformable element, is suggested.

Keywords: structural synthesis, epicyclic gearbox, structural synthesis automatization, matrix representation.

В связи с образованием единого таможенного союза между странами СНГ для предприятий автомобильной промышленности открылись новые перспективы и рынки сбыта. Поэтому в настоящее время конструкторские отделы и отделы систем автоматизированного проектирования (САПР) этих предприятий особое внимание уделяют созданию и расширению номенклатуры производимой ими техники. Создание высокоэффективных и конкурентоспособных изделий автомобилестроения в короткие сроки возможно только при применении технологий, основанных на использовании САПР.

Сегодня для таких предприятий, как БелАЗ, МЗКТ и МАЗ, особенно актуально создание большегрузных автомобилей с гидромеханическими трансмиссиями.

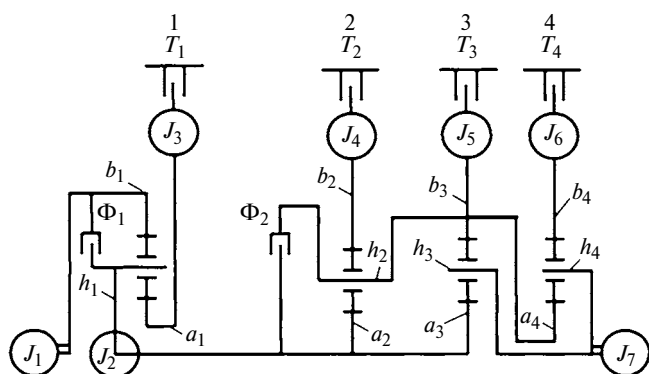


Рис. 1. Схема планетарной коробки передач БелАЗ-7516: 1÷4 — планетарные ряды; $J_1 \div J_7$ — инерционные звенья; $T_1 \div T_4$ — тормозные муфты соответственно планетарных рядов 1÷4; Φ_1, Φ_2 — фрикционные муфты

Применение в большегрузных автомобилях вальных коробок передач или невозможно из-за их больших габаритных размеров и сложной компоновки, или приводит к снижению надежности автомобиля из-за частых поломок таких коробок передач, вызываемых большими динамическими нагрузками. Поэтому для отделов САПР и конструкторских отделов предприятий автомобильной промышленности необходимо создание специализированных САПР для анализа и синтеза планетарных коробок передач.

Синтез планетарных коробок передач (ПКП) включает в себя структурный и параметрический синтезы. Структурный синтез позволяет сгенерировать все возможные варианты кинематических схем ПКП по заданному числу передач. При параметрическом синтезе поочередно перебирают варианты кинематических схем, сгенерированных при структурном синтезе, и решают задачи определения возможности реализации указанных передаточных чисел для рассматриваемого варианта кинематической схемы и вычисления значений параметров элементов ПКП. При этом должны быть соблюдены принятые ограничения угловых скоростей и вращающих моментов элементов ПКП, а также удовлетворены требования к ее компоновке по соосности, сборке, размещению, габаритным размерам, массе и т. д.

Проблемы автоматизации синтеза ПКП с любым числом степеней свободы до сих пор не решены.

Матричное представление структуры ПКП

Рассмотрим матричное представление структуры ПКП БелАЗ-7516 (рис. 1, табл. 1 и 2)¹. Инциденты (в табл. 1 — $a_1 \div a_4$; $h_1 \div h_4$; $b_1 \div b_4$) в матрице жестких связей принимают значение -1 , если элемент планетарного ряда (ПР) расположен на входном валу планетарного редуктора как инерционное звено J_1 (см. рис. 1). Строка матрицы жестких связей представляет собой сосредоточенную массу, образованную путем жесткого соединения элементов ПР, инциденты которых не равны нулю.

В матрице переменных связей учтено направление потока энергии: значение -1 соответствует

¹ Евсеенко И. А. Методика автоматизированного построения динамических моделей планетарных коробок передач // Автомобильная промышленность. 2010. № 6. С. 36—39.

Таблица 1

Матрица жестких связей ПКП БелАЗ-7516 (см. рис. 1)

Инерционное звено	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2	a_3	h_3	b_3	a_4	h_4	b_4
J_1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J_2	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
J_3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J_4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
J_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
J_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
J_7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0

Таблица 2

Матрица переменных связей ПКП БелАЗ-7516 (см. рис. 1)

Инерционное звено	Φ_1	Φ_2	T_1	T_2	T_3	T_4
J_1	-1	0	0	0	0	0
J_2	1	-1	0	0	0	0
J_3	0	0	-1	0	0	0
J_4	0	0	0	-1	0	0
J_5	0	1	0	0	-1	0
J_6	0	0	0	0	0	-1
J_7	0	0	0	0	0	0

отводу потока энергии (ведущее звено фрикциона), значение 1 — его подводу (ведомое звено фрикциона).

Таким образом, на основе матриц жестких и переменных связей (см. табл. 1 и 2) можно осуществить перебор всех возможных структур ПКП (с заданными числами планетарных рядов и включаемых элементов управления на каждой передаче), заполняя матрицы нулями и единицами по строго определенным правилам и отбраковывая невозможные варианты.

Структурный синтез ПКП

Генерирование звеньев ПКП

Рассмотрим структурный синтез ПКП, которая имеет четыре ПР. ПКП состоит из звеньев (сосредоточенных масс) и элементов управления (фрикционных муфт и тормозов). Звено ПКП представляет собой сосредоточенную массу (инерционный элемент), образованную из одного или нескольких элементов различных ПР. В табл. 1 звено ПКП описывается строкой, т. е. ПКП БелАЗ-7516 имеет 7 звеньев. Элементы матрицы, принадлежащие одной строке и отличные от нуля, показывают из каких элементов каких планетарных рядов состоит

звено. Например, звено J_5 образовано путем жесткого соединения следующих элементов трех ПР: h_2 , b_3 , a_4 (см. табл. 1).

Таким образом, на первом этапе генерируется набор всех возможных звеньев ПКП, из которых будут составляться варианты структур ПКП.

Общее число звеньев определяется выражением

$$N_{зв} = \sum_{i=1}^{N_{пр}} C_{n.N_{пр}}^i = C_{n.N_{пр}}^1 + C_{n.N_{пр}}^2 + C_{n.N_{пр}}^3 + \dots + C_{n.N_{пр}}^{N_{пр}}, \quad (1)$$

где $N_{зв}$ — общее число звеньев, из которых можно составить ПКП; $N_{пр}$ — число ПР в ПКП; $C_{n.N_{пр}}^i$ — сочетание, позволяющее определить число звеньев, состоящих из i жестко соединенных элементов, находящихся в n планетарных рядах.

Для вычисления $N_{зв}$ по формуле (1) определим числа звеньев ПКП при $N_{пр} = 4$, $n = 3$ и $i = 1 \div 4$ (табл. 3—6):

при $i = 1$:

$$C_{3.N_{пр}}^1 = C_{12}^1 = 12/1 = 12;$$

при $i = 2$:

$$C_{3.N_{пр}}^2 = C_{12}^2 = \frac{12 \cdot 11}{1 \cdot 2} = 66;$$

при $i = 3$:

$$C_{3.N_{пр}}^3 = C_{12}^3 = \frac{12 \cdot 11 \cdot 10}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 220;$$

Таблица 3

Возможные составы звеньев ПКП, образованных из одного элемента ПР

Номер звена	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2	a_3	h_3	b_3	a_4	h_4	b_4
1	1											
2		1										
3			1									
4				1								
5					1							
6						1						
7							1					
8								1				
9									1			
10										1		
11											1	
12												1

при $i = 4$:

$$C_{3 \cdot N_{\text{пр}}}^4 = C_{12}^4 = \frac{12 \cdot 11 \cdot 10 \cdot 9}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 495.$$

Отбраковка звеньев

После генерации всех звеньев (793 звена) необходимо отбраковать звенья, в состав которых входят два или три элемента, принадлежащих одному ПР. После отбраковки сведем полученную совокупность в табл. 7 ($N_{\text{ЗВ}} = 255$).

Генерирование кинематических схем ПКП

Общее число возможных кинематических схем ПКП определяется выражением

$$N_{\text{к.с}} = \sum_{i=J_{\text{min}}}^{J_{\text{max}}} C_{N_{\text{ЗВ}}}^i = C_{N_{\text{ЗВ}}}^{J_{\text{min}}} + \dots + C_{N_{\text{ЗВ}}}^{J_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где $C_{N_{\text{ЗВ}}}^i$ — сочетание, позволяющее определить число кинематических схем, состоящих из i сосредоточенных масс; J_{min} и J_{max} — минимальное

Таблица 4

Возможные составы звеньев ПКП, образованных из двух элементов ПР

Номер звена		a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2	a_3	h_3	b_3	a_4	h_4	b_4	Номер звена		a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2	a_3	h_3	b_3	a_4	h_4	b_4	
п/п	сум-марный													п/п	сум-марный													
1	13	1	1											34	46				1				1					
2	14	1		1										35	47				1					1				
3	15	1			1									36	48				1						1			
4	16	1				1								37	49				1							1		
5	17	1					1							38	50				1								1	
6	18	1						1						39	51					1	1							
7	19	1							1					40	52					1		1						
8	20	1								1				41	53					1			1					
9	21	1									1			42	54					1				1				
10	22	1										1		43	55					1					1			
11	23	1											1	44	56					1						1		
12	24		1	1										45	57					1							1	
13	25		1		1									46	58						1	1						
14	26		1			1								47	59						1		1					
15	27		1				1							48	60						1			1				
16	28		1					1						49	61						1				1			
17	29		1						1					50	62						1					1		
18	30		1							1				51	63						1						1	
19	31		1								1			52	64							1	1					
20	32		1									1		53	65							1		1				
21	33		1										1	54	66							1			1			
22	34			1	1									55	67							1				1		
23	35			1		1								56	68							1					1	
24	36			1			1							57	69								1	1				
25	37			1				1						58	70								1		1			
26	38			1					1					59	71								1			1		
27	39			1						1				6	72								1				1	
28	40			1							1			61	73									1	1			
29	41			1								1		62	74									1		1		
30	42			1									1	63	75									1			1	
31	43				1	1								64	76										1	1		
32	44				1		1							65	77										1		1	
33	45				1			1						66	78											1	1	

Таблица 5

Возможные составы звеньев ПКП, образованных из трех элементов ПР

Номер звена		a ₁	h ₁	b ₁	a ₂	h ₂	b ₂	a ₃	h ₃	b ₃	a ₄	h ₄	b ₄
п/п	сум-марный												
1	79	1	1	1									
2	80	1	1		1								
3	81	1	1			1							
4	82	1	1				1						
5	83	1	1					1					
6	84	1	1						1				
7	85	1	1							1			
8	86	1	1								1		
⋮													
110	188			1		1		1					
111	189			1		1			1				
112	190			1		1				1			
113	191			1		1					1		
114	192			1		1						1	
115	193			1		1							1
116	194			1			1	1					
117	195			1			1		1				
118	196			1			1			1			
⋮													
220	298										1	1	1

и максимальные возможные числа инерционных звеньев, из которых состоит кинематическая схема:

$$J_{\min} = N_{\text{пр}} + 2; \quad (3)$$

$$J_{\max} = 3N_{\text{пр}} - (N_{\text{пр}} - 1) = 2N_{\text{пр}} + 1. \quad (4)$$

Число J_{\min} находим с учетом того, что каждый ПР может иметь не более двух жестких связей с соседним ПР. Число звеньев ПКП, меньшее J_{\min} , свидетельствует об избыточности жестких связей и планетарных рядов.

Число J_{\max} находим с учетом того, что каждый ПР соединен с соседним только одной жесткой связью.

Для ПКП с четырьмя планетарными рядами $J_{\min} = 6$, $J_{\max} = 9$.

Для определения общего числа $N_{\text{к.с}}$ кинематических схем находим:

$$C_{255}^6 = \prod_{i=1}^6 \left(\frac{N_{\text{зв}} - i + 1}{i} \right) = 359\,895\,314\,625;$$

$$C_{255}^7 = \prod_{i=1}^7 \left(\frac{N_{\text{зв}} - i + 1}{i} \right) = 12\,801\,990\,477\,375;$$

$$C_{255}^8 = \prod_{i=1}^8 \left(\frac{N_{\text{зв}} - i + 1}{i} \right) = 396\,861\,704\,798\,625;$$

$$C_{255}^9 = \prod_{i=1}^9 \left(\frac{N_{\text{зв}} - i + 1}{i} \right) = 10\,891\,649\,009\,473\,374.$$

Таблица 6

Возможные составы звеньев ПКП, образованных из четырех элементов ПР

Номер звена		a ₁	h ₁	b ₁	a ₂	h ₂	b ₂	a ₃	h ₃	b ₃	a ₄	h ₄	b ₄
п/п	сум-марный												
1	299	1	1	1	1								
2	300	1	1	1		1							
3	301	1	1	1			1						
4	302	1	1	1				1					
5	303	1	1	1					1				
6	304	1	1	1						1			
7	305	1	1	1							1		
8	306	1	1	1								1	
9	307	1	1	1									1
10	308	1	1		1	1							
11	309	1	1		1		1						
12	310	1	1		1			1					
13	311	1	1		1				1				
⋮													
243	541		1			1			1			1	
244	542		1			1			1				1
245	543		1			1				1	1		
246	544		1			1				1		1	
247	545		1			1				1			1
248	546		1			1					1	1	
249	547		1			1					1		1
250	548		1			1						1	1
251	549		1				1	1	1				
252	550		1				1	1		1			
253	551		1				1	1			1		
254	552		1				1	1				1	
255	553		1				1	1					1
256	554		1				1		1	1			
257	555		1				1		1		1		
258	556		1				1		1			1	
259	557		1				1		1				1
260	558		1				1			1	1		
261	559		1				1			1		1	
⋮													
491	789								1	1	1	1	
492	790								1	1	1		1
493	791								1	1		1	1
494	792								1		1	1	1
495	793									1	1	1	1

Таблица 7

Возможные составы звеньев ПКП после отбраковки

Номер звена	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2	a_3	h_3	b_3	a_4	h_4	b_4
1	1											
2		1										
3			1									
4				1								
5					1							
6						1						
7							1					
8								1				
⋮												
124			1	1						1		
125			1	1							1	
126			1	1								1
127			1		1		1					
128			1		1			1				
129			1		1				1			
130			1		1					1		
131			1		1						1	
132			1		1							1
133			1			1	1					
134			1			1		1				
135			1			1			1			
136			1			1				1		
⋮												
252			1			1		1				1
253			1			1			1	1		
254			1			1			1		1	
255			1			1			1			1

Таблица 8

Возможные составы звеньев ПКП, образованных из одного элемента ПР

Номер звена	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2
1	1					
2		1				
3			1			
4				1		
5					1	
6						1

Таблица 9

Возможные составы звеньев ПКП, образованных из двух элементов ПР

Номер звена	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2	
1	7	1	1				
2	8	1		1			
3	9	1			1		
4	10	1				1	
5	11	1					1
6	12		1	1			
7	13		1		1		
8	14		1			1	
9	15		1				1
10	16			1	1		
11	17			1		1	
12	18			1			1
13	19				1	1	
14	20				1		1
15	21					1	1

Таблица 10

Возможные составы звеньев ПКП после отбраковки

Номер звена	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2
1	1					
2		1				
3			1			
4				1		
5					1	
6						1
7	1			1		
8	1				1	
9	1					1
10		1		1		
11		1			1	
12		1				1
13			1	1		
14			1		1	
15			1			1

Согласно формуле (2) $N_{к.с} = C_{255}^6 + C_{255}^7 + C_{255}^8 + C_{255}^9 = 11\,301\,672\,600\,064\,000$.

Рассмотрим пример составления кинематических схем ПКП с двумя ПР. Данные о звеньях ПКП приведены в табл. 3 и 4.

Определим число звеньев, образованных из одного элемента ПР (табл. 8).

$$C_{3 \cdot N_{\text{пр}}}^1 = C_6^1 = 6/1 = 6.$$

Определим число звеньев, образованных из двух элементов ПР (табл. 9):

$$C_{3 \cdot N_{\text{пр}}}^2 = C_6^2 = \frac{6 \cdot 5}{1 \cdot 2} = 15.$$

После отбраковки получим совокупность звеньев (табл. 10).

Возможные составы кинематических схем ПКП из двух ПР и четырех инерционных звеньев

Номер схемы	Инерционное звено				Номер схемы	Инерционное звено				Номер схемы	Инерционное звено			
	1-е	2-е	3-е	4-е		1-е	2-е	3-е	4-е		1-е	2-е	3-е	4-е
1	1	2	3	4	457	2	4	7	15	913	4	5	13	14
2	1	2	3	5	458	2	4	8	9	914	4	5	13	15
3	1	2	3	6	459	2	4	8	10	915	4	5	14	15
4	1	2	3	7	460	2	4	8	11	916	4	6	7	8
5	1	2	3	8	461	2	4	8	12	917	4	6	7	9
⋮														
22	1	2	4	14	478	2	4	11	14	934	4	6	9	13
⋮														
224	1	5	9	10	680	3	4	8	11	1136	5	10	11	12
225	1	5	9	11	681	3	4	8	12	1137	5	10	11	13
226	1	5	9	12	682	3	4	8	13	1138	5	10	11	14
227	1	5	9	13	683	3	4	8	14	1139	5	10	11	15
228	1	5	9	14	684	3	4	8	15	1140	5	10	12	13
229	1	5	9	15	685	3	4	9	10	1141	5	10	12	14
230	1	5	10	11	686	3	4	9	11	1142	5	10	12	15
231	1	5	10	12	687	3	4	9	12	1143	5	10	13	14
232	1	5	10	13	688	3	4	9	13	1144	5	10	13	15
233	1	5	10	14	689	3	4	9	14	1145	5	10	14	15
⋮														
250	1	6	7	13	706	3	5	6	7	1162	6	7	8	15
⋮														
452	2	4	7	10	908	4	5	11	14	1364	11	13	14	15
453	2	4	7	11	909	4	5	11	15	1365	12	13	14	15
454	2	4	7	12	910	4	5	12	13					
455	2	4	7	13	911	4	5	12	14					
456	2	4	7	14	912	4	5	12	15					

Таким образом, для ПКП, состоящей из двух планетарных рядов с $N_{зв} = 15$, согласно формулам (3) и (4) $J_{\min} = 4$, $J_{\max} = 5$.

Определим общее число возможных вариантов кинематических схем ПКП, состоящих из двух ПР:

$$N_{к.с} = C_{15}^4 + C_{15}^5 = 1365 + 3003 = 4368.$$

Данные кинематических схем ПКП, состоящих из двух ПР с четырьмя инерционными звеньями $J_1 \div J_7$, приведены в табл. 11.

Отбраковка кинематических схем ПКП

Рассмотрим схему 22 (см. табл. 11). Данные о звеньях берем из табл. 9. Структура схемы 22 приведена в табл. 12. Эта кинематическая схема ПКП не реализуема, так как звено b_2 отсутствует.

Таким образом, после генерирования кинематических схем ПКП, необходимо провести отбраковку по следующим правилам:

1. Сумма элементов каждого столбца должна быть равна единице, т. е. каждый элемент ПР дол-

Таблица 12

Состав кинематической схемы 22 ПКП

Номер звена	a_1	h_1	b_1	a_2	h_2	b_2
1	1					
2		1				
4				1		
14			1		1	

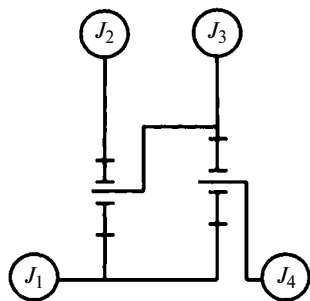


Рис. 2. Схема планетарной коробки передач из двух ПР и четырех инерционных звеньев $J_1 \div J_4$

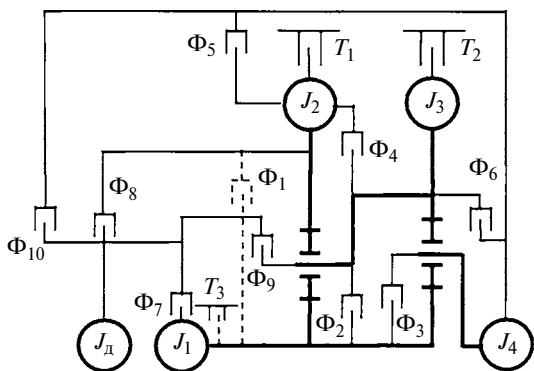


Рис. 3. Схема планетарной коробки передач после установки всех возможных элементов управления

жен только один раз входить в состав инерционного звена. Если сумма элементов столбца превышает единицу, то элемент ПР входит в состав нескольких инерционных звеньев. Если сумма элементов столбца равна нулю, то элемент ПР не входит в состав звеньев ПКП.

2. Планетарные ряды не должны быть разъединены между собой, т. е. для каждого ПР должна быть хотя бы одна строка, сумма элементов которой для двух ПР должна быть больше единицы. Все ПР должны быть рассмотрены попарно.

Генерирование тормозных механизмов

На этом этапе поочередно рассматриваются кинематические схемы ПКП, полученные на предыдущем этапе.

Рассматриваемая кинематическая схема ПКП дорабатывается установкой тормозных механизмов. Число N_T тормозных механизмов определяется выражением $N_T = N_j - 2$, где N_j — число инерционных звеньев ПКП.

Тормозные механизмы предусматриваются на всех инерционных звеньях ПКП, кроме входного и выходного.

Генерирование фрикционных муфт

На этом этапе поочередно рассматриваются полученные на предыдущем этапе кинематические схемы ПКП с установленными тормозными механизмами.

Рассматриваемую кинематическую схему ПКП дополняют фрикционными муфтами, число которых определяется выражением $N_\Phi = C_{N_j}^2 + N_j$, учитывающим кроме сочетания из всех инерционных элементов ПКП по два (первое слагаемое) возможность установки фрикционных муфт между двигателем и каждым из инерционных звеньев (второе слагаемое).

Рассмотрим ПКП, состоящую из двух ПР и четырех инерционных звеньев (рис. 2).

Определим числа тормозных механизмов и фрикционных муфт:

$$N_T = N_j - 2 = 4 - 2 = 2;$$

$$N_\Phi = C_{N_j}^2 + N_j = 6 + 4 = 10.$$

Возможные варианты расположения фрикционных муфт приведены в табл. 13. В результате получим схему, представленную на рис. 3.

Очевидно, что большая часть фрикционных муфт служит для получения прямой передачи ПКП. Однако для этого достаточно одной муфты. Выбором фрикционной муфты достигают снижения динамических нагрузок, материалоемкости, габаритных размеров и отсутствия длинных или трубчатых валов для соединения ведущего и ведомого дисков фрикциона, т. е. муфта должна находиться по возможности ближе к входу ПКП и соединять зубчатые колеса (a) внешнего зацепления с водилами (h). Кроме того, некоторые фрикционные муфты нель-

Таблица 13

Возможные варианты расположения фрикционных муфт

Номер п/п	Обозначение	Звенья фрикциона	
1	Φ_1	1	2
2	Φ_2	1	3
3	Φ_3	1	4
4	Φ_4	2	3
5	Φ_5	2	4
6	Φ_6	3	4
7	Φ_7	Двигатель	1
8	Φ_8	Двигатель	2
9	Φ_9	Двигатель	3
10	Φ_{10}	Двигатель	4

зя установить, так как они охватывают тормозной механизм или одна из муфт мешает установке другой (на рис. 3 показаны штриховыми линиями).

В связи с добавлением инерционного звена J_d появляется возможность установки дополнительного тормозного механизма T_3 на звено J_1 , так как оно не является входным звеном ПКП. Однако тормозной механизм T_3 , расположенный внутри контура, образованного фрикционной муфтой Φ_8 или Φ_9 будет препятствовать передаче потока мощности. Поэтому исключим тормозной механизм T_3 из рассмотрения.

Генерирование комбинаций включаемых элементов управления (ЭУ) на передачах

Число инерционных звеньев ПКП и число включаемых ЭУ на каждой передаче взаимосвязаны и определяются числом степеней свободы ПКП: число степеней свободы на единицу больше числа включаемых ЭУ на передаче.

Минимальное число включаемых ЭУ для рассматриваемой схемы на каждой передаче $N_{ЭУ \min} = 1$ при отсутствии инерционного звена двигателя J_d , так как имеется жесткая связь между J_d и одним из звеньев ПКП — J_1 , J_2 или J_3 , и $N_{ЭУ \min} = 2$ в противном случае. Максимальное число включаемых ЭУ на каждой передаче определяется выражением $N_{ЭУ \max} = N_j - N_{пр} - 1$.

Очевидно, что при числе включаемых ЭУ на каждой передаче, меньшем $N_{ЭУ \max}$, ПКП будет работать как дифференциал.

Рассмотрим составление возможных комбинаций включения ЭУ для ПКП, представленной на рис. 3. Для этой ПКП $N_{ЭУ \max} = 2$.

Число возможных комбинаций включаемых ЭУ для каждой схемы ПКП определяется формулой

$$N_{\text{ком}} = C_{N_{\Phi} + N_T}^{N_{ЭУ}} = 66.$$

Возможные комбинации включения ЭУ приведены в табл. 14.

После генерирования возможных комбинаций включаемых ЭУ необходимо провести их отбраковку. Очевидно, что при использовании звена "двигатель" необходимо, чтобы в комбинации включаемых ЭУ участвовал фрикцион, связанный с "двигателем", иначе не будет осуществлен подвод энергии к ПКП. Кроме того, недопустимо, чтобы комбинация состояла из фрикционов, связанных с двигателем, так как в этом случае получится прямая передача.

Включение фрикциона Φ_{10} приводит к получению прямой передачи вне зависимости от второго

включаемого элемента, так как этот фрикцион соединяет вход и выход ПКП. Поэтому комбинации включаемых ЭУ с использованием этого фрикциона можно исключить. После отбраковки получим совокупность, представленную в табл. 15.

Построение кинематической схемы ПКП

Предварительно необходимо разработать элементную базу для представления кинематической схемы ПКП и алгоритма автоматизированного построения с возможностью определения нереализуемых кинематических схем или невозможности установки ЭУ.

Таблица 14
Возможные комбинации включаемых ЭУ

Номер п/п	Включаемые ЭУ		Номер п/п	Включаемые ЭУ	
	Φ_1	Φ_2		Φ_4	Φ_8
1	Φ_1	Φ_2	34	Φ_4	Φ_8
2	Φ_1	Φ_3	35	Φ_4	Φ_9
3	Φ_1	Φ_4	36	Φ_4	Φ_{10}
4	Φ_1	Φ_5	37	Φ_4	T_1
5	Φ_1	Φ_6	38	Φ_4	T_2
6	Φ_1	Φ_7	39	Φ_5	Φ_6
7	Φ_1	Φ_8	40	Φ_5	Φ_7
8	Φ_1	Φ_9	41	Φ_5	Φ_8
9	Φ_1	Φ_{10}	42	Φ_5	Φ_9
10	Φ_1	T_1	43	Φ_5	Φ_{10}
11	Φ_1	T_2	44	Φ_5	T_1
12	Φ_2	Φ_3	45	Φ_5	T_2
13	Φ_2	Φ_4	46	Φ_6	Φ_7
14	Φ_2	Φ_5	47	Φ_6	Φ_8
15	Φ_2	Φ_6	48	Φ_6	Φ_9
16	Φ_2	Φ_7	49	Φ_6	Φ_{10}
17	Φ_2	Φ_8	50	Φ_6	T_1
18	Φ_2	Φ_9	51	Φ_6	T_2
19	Φ_2	Φ_{10}	52	Φ_7	Φ_8
20	Φ_2	T_1	53	Φ_7	Φ_9
21	Φ_2	T_2	54	Φ_7	Φ_{10}
22	Φ_3	Φ_4	55	Φ_7	T_1
23	Φ_3	Φ_5	56	Φ_7	T_2
24	Φ_3	Φ_6	57	Φ_8	Φ_9
25	Φ_3	Φ_7	58	Φ_8	Φ_{10}
26	Φ_3	Φ_8	59	Φ_8	T_1
27	Φ_3	Φ_9	60	Φ_8	T_2
28	Φ_3	Φ_{10}	61	Φ_9	Φ_{10}
29	Φ_3	T_1	62	Φ_9	T_1
30	Φ_3	T_2	63	Φ_9	T_2
31	Φ_4	Φ_5	64	Φ_{10}	T_1
32	Φ_4	Φ_6	65	Φ_{10}	T_2
33	Φ_4	Φ_7	66	T_1	T_2

Комбинации включаемых ЭУ после отбраковки

Номер комбинации	Включаемые элементы управления	
1	Φ_7	T_1
2	Φ_7	T_2
3	Φ_7	Φ_1
4	Φ_7	Φ_2
5	Φ_7	Φ_3
6	Φ_7	Φ_4
7	Φ_7	Φ_5
8	Φ_7	Φ_6
9	Φ_8	T_1
10	Φ_8	T_2
11	Φ_8	Φ_1
12	Φ_8	Φ_2
13	Φ_8	Φ_3
14	Φ_8	Φ_4
15	Φ_8	Φ_5
16	Φ_8	Φ_6
17	Φ_9	T_1
18	Φ_9	T_2
19	Φ_9	Φ_1
20	Φ_9	Φ_2
21	Φ_9	Φ_3
22	Φ_9	Φ_4
23	Φ_9	Φ_5
24	Φ_9	Φ_6

На этом этапе осуществляется упорядочение ПР и исключение ЭУ, которые невозможно включить в рассматриваемую кинематическую схему ПКП. Расстановка планетарных рядов позволяет определить ПР, элементы которого связаны с выходом ПКП, т. е. крайний правый ряд.

Имеется возможность зеркального отражения кинематической схемы ПКП. В результате крайний правый ПР, связанный с выходными звеньями ПКП, станет крайним левым, связанным с двигателем, и наоборот, элементы бывшего крайнего левого ПР будут связаны с выходом ПКП.

Число анализируемых кинематических схем будет увеличено в 3 раза: $N_{а.к.с} = 3N_{к.с}$. Поочередно привязываем выход ПКП к каждому из трех элементов крайнего правого ряда. При этом число кинематических схем вновь увеличивается в 3 раза, т. е. $N_{а.к.с} = 3N_{к.с}$.

Параметрический синтез ПКП проводится по известной ее структуре и заданным значениям передаточных чисел.

На первом этапе параметрического синтеза определяются ЭУ, включаемые на каждой конкретной передаче. Для решения этой задачи необходимо найти зависимости передаточных чисел коробки передач при включении различных ЭУ:

$$u_k = f_k(p_1, p_2, \dots, p_{N_{пр}}). \quad (5)$$

Принимая приблизительно средние значения кинематических параметров возможного диапазона, можно получить ряд передаточных чисел для соответствующих комбинаций включенных ЭУ. Анализ этой информации позволяет выбрать необходимые комбинации включаемых ЭУ для соответствующей передачи и отбраковать невозможные комбинации.

На втором этапе определяются значения кинематических параметров путем решения системы уравнений (5) относительно $p_1, p_2, \dots, p_{N_{пр}}$ при заданных значениях передаточных чисел.

На третьем этапе происходит выбор чисел зубьев зубчатых зацеплений для полученных значений кинематических параметров при выполнении условий соосности, сборки и размещения планетарных рядов.

Заключительный этап синтеза включает в себя кинематический и силовой анализы ПКП для проверки допустимых значений угловых скоростей и нагрузок в звеньях ПКП.

Таким образом, предложен новый универсальный метод структурного синтеза планетарных коробок передач с любыми числами степеней свободы и планетарных рядов, который может быть применен для редукторов любой сложности и конфигурации.

Новизна предлагаемого метода заключается в применении специфического матричного представления структуры трансформируемых элементов сложной конфигурации, позволяющего не только отразить в удобной форме постоянные и переменные связи между элементами ПКП, но и осуществить последовательный перебор всех возможных структур ПКП и накладываемых связей.

Преимуществом метода является универсальность — возможность применения для представления на ЭВМ структуры любого трансформируемого элемента. Метод позволяет автоматизировать формирование структуры трехмерных моделей трансформируемых элементов при решении задач компоновки ПКП.