

УДК 621.833.6

ПЛАНЕТАРНЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ВНЕЦЕНТРОИДНЫМ ВНУТРЕННИМ ЦЕВОЧНЫМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ (обзор)

С.О. КИРЕЕВ

(Донской государственный технический университет)

Рассмотрена история возникновения и применения планетарных передач с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением. Дана информация по величине их КПД, массогабаритным, инерционным характеристикам и виброактивности. Приведена конструкция наиболее перспективной схемы исполнения данных механизмов.

Ключевые слова: планетарные передачи, цевочное зацепление.

Введение. Применяемые в планетарных механизмах зубчатые передачи с эвольвентным зацеплением благодаря высокой конкурентоспособности занимают в машиностроении «монопольное» положение. Объясняется это известными технологическими и эксплуатационными достоинствами передачи, к которым относятся: простота формы исходного контура зуборезного инструмента, работающего по методу обката, сохранение передаточного отношения при изменении межосевого расстояния, прямолинейность линии зацепления, обеспечивающей постоянство направления действия силы нормального давления в зацеплении. Эти положительные качества эвольвентного зацепления стимулировали стандартизацию параметров исходного контура, способствовали созданию огромного парка специальных станков, обширной номенклатуры зуборезного и измерительного инструмента, а также разработке унифицированной технологии изготовления и контроля колёс прямозубых и косозубых эвольвентных передач с внешним и внутренним зацеплением. Из колёс с эвольвентным зубчатым венцом формируются рядовые ступенчатые передачи с неподвижными осями, планетарные зубчатые механизмы, коробки скоростей транспортных агрегатов и станков, komponуются механизмы подач технологического оборудования. Однако достигнутые успехи в производстве эвольвентных колёс не устраняют трудностей при совершенствовании эвольвентного зацепления посредством создания зуборезного инструмента отличного от стандартного [1]. В некоторых случаях эвольвентное зацепление теряет свои преимущества в сравнении с цевочным и циклоидальным зацеплениями, получившими признание в технике раньше эвольвентного.

Возникновение планетарных передач с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением (ВВЦЗ). Использовать эпициклоиду в качестве профиля зуба ведомого колеса в часовом механизме (ведущим является триб), предложил датский астроном Ремер в 1675 г. Геометрию циклоидных кривых изучали Лагир, Дезарг, Камус, Дидро, Понселе [2]. Техническое приложение циклоидные кривые нашли в виде цевочного и циклоидального зацеплений, изготавливаемых методом копирования. К недостаткам передач с этим зацеплением относятся чувствительность к изменению межосевого расстояния, криволинейность линии зацепления и сложность формы зуба исходного контура зуборезного инструмента при методе обката, что определило выбор эвольвентного зацепления в качестве преобладающего. Технический прогресс в станкостроении позволил преодолеть трудности воспроизводства сложных профилей, и в настоящее время на основе геометрии циклоидных кривых созданы роторно-поршневые двигатели внутреннего сгорания и компрессоры, гидромоторы и насосы, винтовые компрессоры и насосы, воздушходувки, планетарные передачи. Особого внимания заслуживают планетарные передачи [3].

Как известно, первые модели планетарных механизмов были созданы монахом Давидом в 1791 г. Эти четырехзвенные двухступенчатые механизмы, согласно классификации В.Н. Кудрявцева [4], имеют обозначение 2К-Н. К более простым схемам планетарного механизма отно-

сится трехзвенный одноступенчатый механизм К-Н, полученный обращенным движением рядовой однопарной зубчатой передачи с внутренним зацеплением. В механизме К-Н для передачи движения сателлита, совершающего сложное движение, ведомому валу, соосному с водилом, необходимо использовать механизм с передаточным отношением, равным единице. В дальнейшем этот механизм, по предложению В.Н. Кудрявцева [4], был назван механизмом W. По классификации, принятой в нашей стране, передача К-Н, содержащая механизм W, условно обозначается К-Н-V. Этот планетарный зубчатый механизм создавался и совершенствовался в течение нескольких десятилетий, о чем свидетельствует историческая справка по развитию конструкции и промышленному применению передач К-Н-V и 2К-V.

Первая попытка использовать схему К-Н с внутренним цевочным зацеплением была сделана фирмой Carl Hamann [5] в Германии в 1900 г. В механизме фирмы Hamann в качестве сателлита использовалось цевочное колесо с нечетным числом цевок. Неподвижное колесо имело четное число зубьев, профиль которых определялся по траектории цевки, а изготовление выполнялось методом копирования. Параллельно работающий сателлит отсутствовал. Сложное движение сателлита преобразовывалось во вращение ведомого вала посредством механизма параллельных кривошипов. Передаточное отношение этого планетарного механизма определяется как отношение числа зубьев сателлита к разности числа зубьев неподвижного колеса и сателлита. Из-за низкого уровня технологии механизм Hamann не получил признания.

В 1925 г. фирма Fr. Deckel создала на базе схемы К-Н-V [5] планетарную передачу с неподвижным цевочным колесом и двумя параллельно работающими сателлитами, зубья которых спрофилированы по эквидистанте нормальной эпициклоиды. Числа зубьев сателлитов и числа цевок неподвижного колеса этой передачи отличаются на единицу, а преобразование сложного движения сателлитов во вращение ведомого вала реализуется посредством муфты Ольдгема. Позднее профиль зубьев сателлита стал выполняться по эквидистанте укороченной эпициклоиды, а муфта Ольдгема заменена механизмом параллельных кривошипов. После доработки конструкции эта передача в 30-е годы была успешно внедрена в машиностроение Западной Европы.

Промышленное внедрение передач К-Н-V связано с производственной деятельностью фирмы Siemens-Schuckert-Werke (SSW). Эта фирма в конце тридцатых и начале сороковых годов прошлого столетия разработала и организовала промышленное изготовление гаммы мотор-редукторов с передачей К-Н-V. Данная передача также успешно применялась в электробарабанах ленточных конвейеров фирмы SSW, использовалась в механизме выдвижения шасси самолетов Фокке-Вульф 190А, в приводе макаронного прессы непрерывного действия (Италия) [5]. В нашей стране еще в двадцатых годах предпринималась попытка создать подобный планетарный механизм. Макет механизма К-Н-V был изготовлен в Харьковском технологическом институте в 1925 г. под руководством профессора Тира [5]. Однако по ряду причин эта разработка не была внедрена в производство.

Развитие планетарных передач с ВВЦЗ. За рубежом передачи типа К-Н-V получили широкое распространение и успешно используются в приводах различных промышленных объектов. Особого внимания заслуживают редукторы и мотор-редукторы фирмы Cyclo (Германия), созданные на базе передачи К-Н-V. Мотор-редукторы этой фирмы с одноступенчатыми передачами обеспечивают широкое поле эксплуатационных параметров (частота вращения выходного вала от 6,5 до 156 мин⁻¹, при диапазоне мощностей от 0,2 до 30 кВт) и отличаются высоким КПД (до 0,98). Смазка этих передач – консистентная, поэтому вертикальное исполнение не требует специальных уплотнительных устройств. Аналогичную конструкцию с некоторыми изменениями производит японская фирма Sumitomo Machinery Co, поставляя потребителю под маркой Cyclo Drive.

Дальнейшее развитие планетарные передачи с цевочным внецентроидным зацеплением получили в редукторе фирмы Sier Bath (США) [5], в котором к передаче К-Н-V добавлена эвольвентная ступень. Этой передаче в российской технической литературе присвоено условное обозначение 2К-V [5]. Передача 2К-V отличается высокой степенью упаковки деталей, компактностью, самоторможением и возможностью реализации передаточных отношений от 40 до 500. Такая передача нашла применение в приводах звеньев промышленных роботов и системах управления сервисными устройствами с требованием высокой жёсткости и точности позиционирования рабочего органа исполнительной системы. Фирма Teijin Seiki (Япония) и её наследница Nabtesco конструктивно усовершенствовали передачу Sier Bath и организовали серийный выпуск типоразмеров передач модели RV (Rotary Vector) (рис.1).

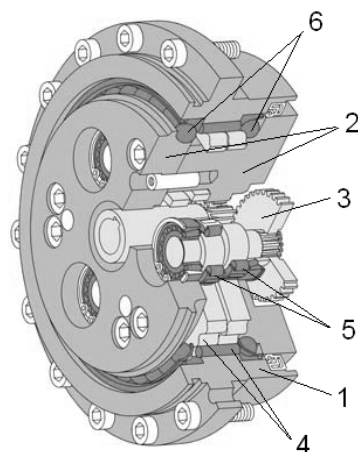


Рис.1. Планетарно-цевочный редуктор типа RV (схема 2К-V): 1 – корпус; 2 – водило; 3 – эвольвентный сателлит быстроходной ступени; 4 – эпициклоидный сателлит и цевка внецентроидного внутреннего цевочного зацепления; 5 – цилиндрические роликовые подшипники; 6 – шарики радиально-упорных совмещённых опор качения

Последующая эволюция трехзвенного планетарного механизма К-Н наблюдается в так называемой волновой передаче, на которую в 1959 году в США получил патент С. В. Мессер. Получили распространение волновые передачи с эвольвентными профилями зубьев, которые находятся в зацеплении с весьма малой несопряжённостью. Область применения таких передач ограничивается приводами кратковременного действия. Фирмами USM (США) и Harmonic Drive (Япония) налажено серийное производство волновых передач общего назначения.

Основные характеристики планетарных механизмов с ВВЦЗ. Выполненный обзор планетарных механизмов, созданных на базе схемы К-Н, свидетельствует о разнообразии технических решений, реализованных в их конструкциях. Из этой группы планетарных механизмов по признакам последовательности складываемых простейших движений выделяется подгруппа Cyclo, RV и Harmonic. Выделенную группу целесообразно сопоставить по рабочим характеристикам. На рис.2 представлены сравнительные характеристики по массе, механическому КПД, маховому моменту и вибрационным показателям, приводимые фирмой Teijin Seiki (Япония) [3].

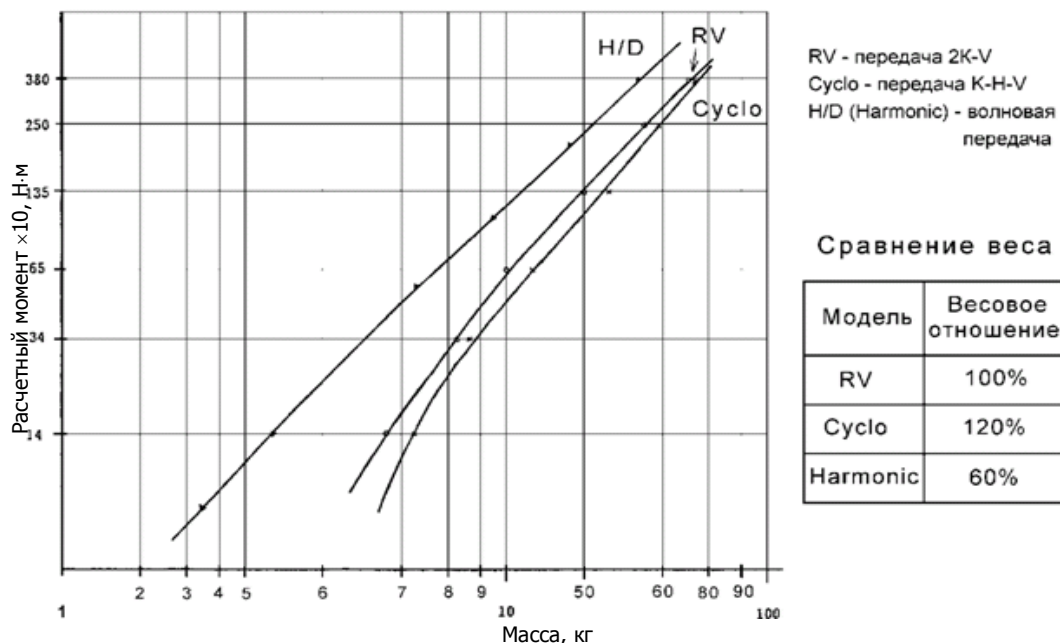


Рис.2. Характеристики планетарных механизмов по массе

По весовым характеристикам (см. рис.2) модель RV занимает промежуточное положение между Cyclo и Harmonic. Анализ графиков КПД (рис.3, где Showa's Albania EPRO – тип консистентной смазки) свидетельствует о том, что потери на трение в модели RV на 10% ниже, чем у Cyclo и на 20% меньше чем у Harmonic. По моменту инерции на входном валу (рис.4) RV также превосходит Cyclo в 4 раза, а Harmonic в 25 раз. Вибрационные свойства сравниваемых планетарных механизмов представлены резонансными кривыми крутильных колебаний передач (рис.5).

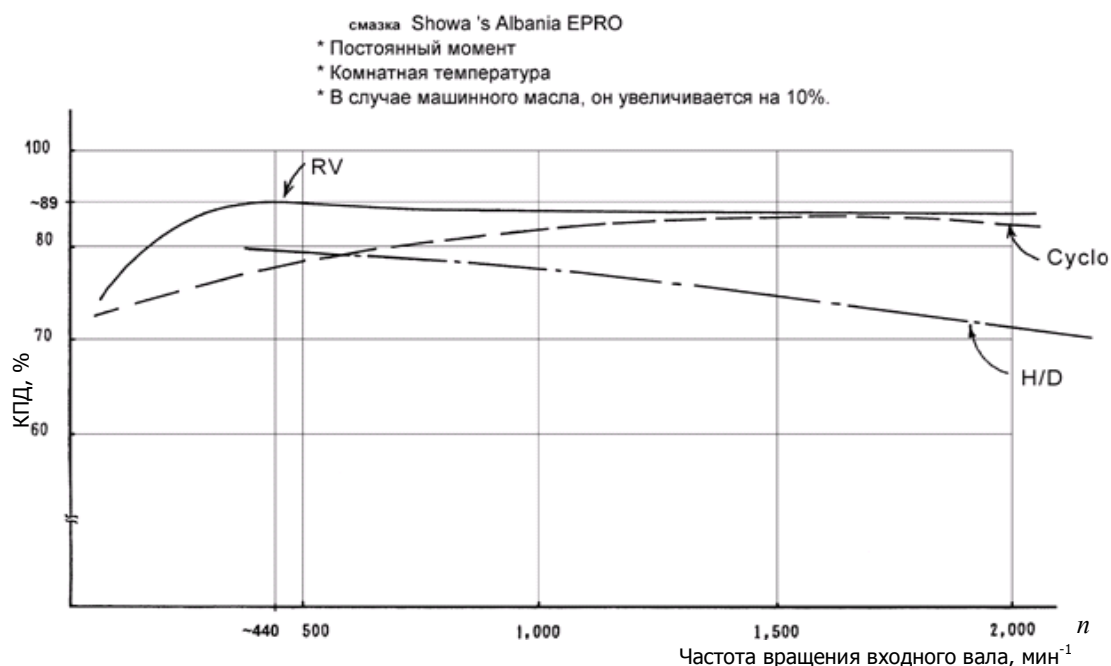


Рис.3. Механический коэффициент полезного действия

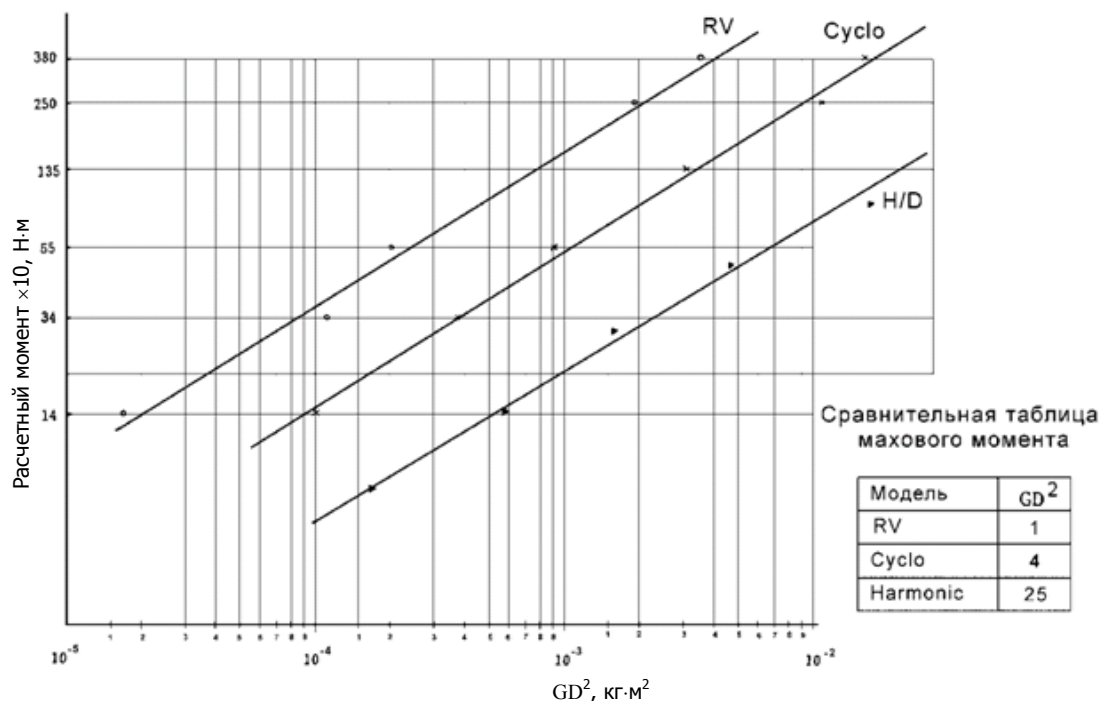


Рис.4. График зависимости махового момента от величины передаваемого вращающего момента

С целью получения вибрационных характеристик отобранных типов передач (RV, Cyclo, Harmonic) той же фирмой Teijin Seiki (Япония) [3] проводились испытания с их образцами, объединёнными в группы сравнения, рабочие параметры которых практически совпадают (см. табл. на рис.5).

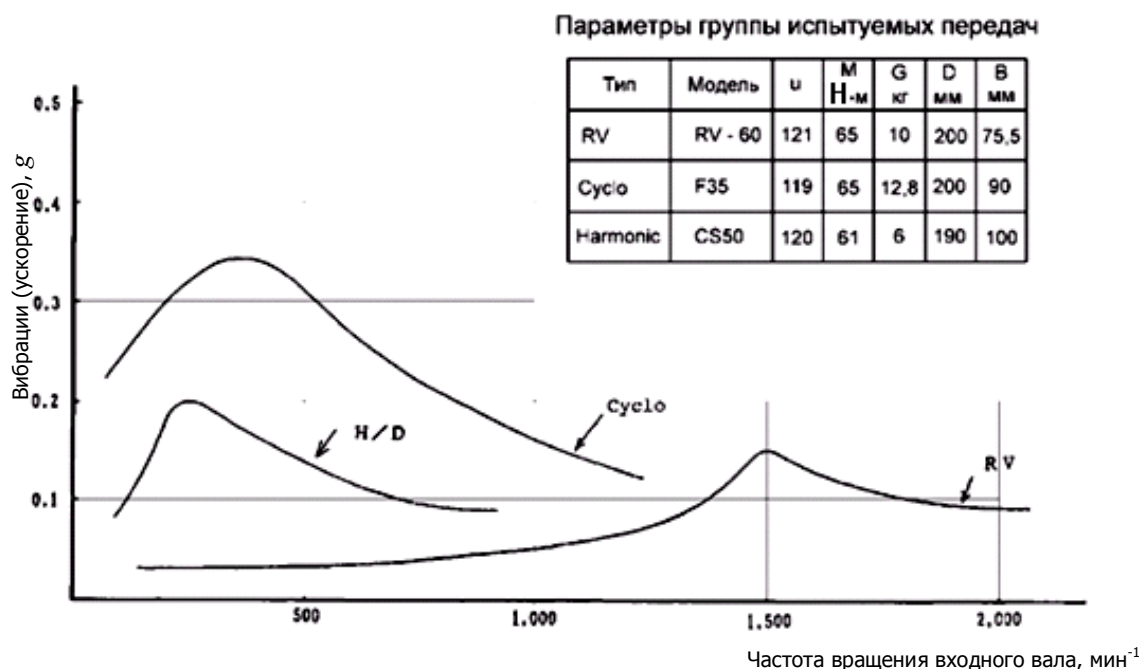


Рис.5. Вибрационные характеристики: G – масса, D – габаритный диаметр;
 B – габаритная ширина; M – расчётный момент

Полученные значения собственных частот колебаний передач позволяют сопоставить их по жёсткости и инерционным показателям. При сравнении собственных частот колебаний передач RV и Cyclo, отличающихся жёсткостью деталей (по технологическим причинам), выявляется более высокий момент инерции на ведомом валу системы Cyclo. Сравнение собственных частот передач RV и Harmonic даёт основание считать, что волновая передача обладает пониженными свойствами по показателям жёсткости и инерционным характеристикам нежели передача RV. Следовательно, передача RV выгодно отличается от Cyclo и Harmonic распределением массы в её конструкции. Кроме того, у резонансной кривой передачи RV на всём протяжении дорезонансного участка амплитуда вынужденных колебаний значительно меньше, чем у аналогичных кривых передач Cyclo и Harmonic. Таким образом по вибрационным показателям передача RV выгодно отличается от передач Cyclo и Harmonic.

Заключение. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что по рабочим характеристикам выделяется передача RV, выполненная по схеме 2K-V с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением. В связи с этим в рамках госбюджетных работ по созданию зубчатых передач с нетрадиционными видами зацеплений, под руководством автора была разработана гамма передач такого типа [3], представленная в табл.1, с габаритными размерами, приведёнными на рис.6. и табл.2.

Таблица 1

Гамма планетарно-цевочных передач типа 2К-V

Но- мер габа- ба- рита	Модель* (типораз- мер)	Передаточные отношения		Номер передачи	Z_4	Момент M_H^{**} , Н·м	Мощность, P^{***} , кВт
		u_{1H}^4	u_{14}^H				
1	ПЦ2-23	43	42	1	14	105	0,240
		49	48	2	16		
		60	61	3	20		
		79	78	4	26		
		103	102	5	34		
2	ПЦ2-28	57	56	6	14	140	0,330
		65	64	7	16		
		81	80	8	20		
		105	104	9	26		
		121	120	10	30		
3	ПЦ2-34	57	56	11	14	214	0,500
		81	80	12	20		
		105	104	13	26		
		121	120	14	30		
		153	152	15	38		
		161	160	16	40		
4	ПЦ3-40	57	56	17	14	380	0,875
		81	80	18	20		
		105	104	19	26		
		121	120	20	30		
		153	152	21	40		
5	ПЦ3-45	65	64	22	16	820	1,90
		81	80	23	20		
		105	104	24	26		
		121	120	25	30		
		153	152	26	40		
6	ПЦ3-51	65	64	27	16	1050	2,30
		81	80	28	20		
		105	104	29	26		
		121	120	30	30		
		153	152	31	40		
		177	176	32	44		
7	ПЦ3-56	61	60	33	12	1300	3,00
		81	80	34	16		
		101	100	35	20		
		121	120	36	24		
		161	160	37	32		
		181	180	38	36		
		201	200	39	40		
8	ПЦ3-67	61	60	40	12	2160	5,00
		81	80	41	16		
		101	100	42	20		
		121	120	43	24		
		161	160	44	32		
		181	180	45	36		
		201	200	46	40		

Примечание: *) П – планетарный; Ц – цевочный; 2 – двухваловая модель; 3 – трехваловая модель; две последние цифры – межосевое расстояние эвольвентной ступени; **) Номинальный момент (момент, гарантирующий номинальный срок эксплуатации подшипника эпициклоидного сателлита, $L_H = 2000$ ч) при оборотах на выходе $n_H = 20$ об/мин.; ***) Величина входной мощности определена с учетом к.п.д. Номинальная частота вращения входного вала, $n_1 = 1500$ об/мин, Z_4 – число цевков.

Таблица 2

Параметры гаммы передач 2К-V

Модель	Момент, 10, Н·м	Передаточное число	Масса, кг	A,	B,	C,	D,	E,	F,
				мм					
ПЦ 2-28	14	57,65,81,105,121	3,5	132	105	90	18	62	65
ПЦ 2-34	21,4	57,81,105,121,153,161	5,0	157	130	110	21	75	78
ПЦ 3-40	38	57,81,105,121,153	7,0	193	160	120	22	78	81
ПЦ 3-45	82	65,81,105,121,153	10	219	180	140	27	90	97
ПЦ 3-51	105	65,81,105,121,153,177	15	242	200	155	28	93	101
ПЦ 3-56	130	61,81,101,121,161,181,201	20	262	220	175	28	103	111

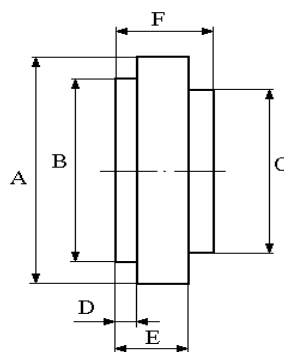


Рис.6. Габаритные размеры гаммы передач 2К-V

Следует отметить, что данные устройства называются передачами, а не редукторами в связи с тем, что относятся к дифференциальным механизмам и могут встраиваться в привод по различным схемам установки: неподвижным звеном может быть как корпус передачи, так и её водило. Это изменяет и передаточное отношение, что отражено в табл.1. В третьем столбце приведено передаточное отношение при закреплённом корпусе передачи (цевочном колесе) в четвёртом – при закреплённом водиле. Несложно заметить, что эти передаточные отношения отличаются лишь на единицу.

Библиографический список

1. Вулгаков Э.Б. Теория зубчатых зацеплений / Э.Б. Вулгаков. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.
2. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 455 с.
3. Киреев С.О. Теоретические основы методов анализа и синтеза планетарных механизмов с внецентроидным цевочным зацеплением: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ИМАШ РАН, 2002.
4. Кудрявцев В.Н. Планетарные передачи / В.Н. Кудрявцев. – Л.: Машиностроение, 1966. – 307 с.
5. Киреев С.О. Структура, кинематика и геометрия планетарных передач с внецентроидным цевочным зацеплением / С.О. Киреев, В.Н. Ковалёв. – Новочеркасск : НГТУ, 1995. – 98 с.

Материал поступил в редакцию 16.05.2011.

References

1. Vulgakov E`.B. Teoriya zubchaty`x zaceplenij / E`.B. Vulgakov. – M.: Mashinostroenie, 1995. – 320 s. – In Russian.
2. Litvin F.L. Teoriya zubchaty`x zaceplenij / F.L. Litvin. – M.: Nauka, 1968. – 455 s. – In Russian.
3. Kireev S.O. Teoreticheskie osnovy` metodov analiza i sinteza planetarny`x mexanizmov s vnecentroidny`m cevochny`m zacepleniem: dis. ... d-ra texn. nauk. – M.: IMASH RAN, 2002. – In Russian.
4. Kudryavcev V.N. Planetarny`e peredachi / V.N. Kudryavcev. – L.: Mashinostroenie, 1966. – 307 s. – In Russian.
5. Kireev S.O. Struktura, kinematika i geometriya planetarny`x peredach s vnecentroidny`m cevochny`m zacepleniem / S.O. Kireev, V.N. Kovalyov. – Novocherkassk : NGTU, 1995. – 98 s. – In Russian.

PLANETARY GEAR WITH OFF-CENTROID INNER COGGING IN MECHANICAL ENGINEERING (survey)

S.O. KIREYEV

(Don State Technical University)

The origination and application history of planetary gearing with the off-centroid inner cogging is considered. Data on their mechanical efficiency, mass-dimensional and inertial characteristics and vibro-activity is presented. A structure model of the most promising design is given.

Keywords: planetary gear, cogging.