

УДК 621.86.01

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАНЕТАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СЕРВИСА «ПОИСК РЕШЕНИЙ» MICROSOFT EXCEL**

**THE DESIGN OF PLANETARY MECHANISMS
WITH MICROSOFT EXCEL SOLVER**

Выскубов Евгений Владимирович

кандидат технических наук,
доцент 105 кафедры механики,
филиал ВУНЦ ВВС «ВВА им. Ю.А. Гагарина и
профессора Н.Е. Жуковского» (г. Краснодар)

Терехов Владимир Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
заведующий 105 кафедрой механики,
филиал ВУНЦ ВВС «ВВА им. Ю.А. Гагарина и
профессора Н.Е. Жуковского» (г. Краснодар)
partner2002@front.ru

Аннотация. Рассмотрено применение сервиса «Поиск решений» табличного процессора при проектировании планетарных механизмов. Для более глубокого освоения теоретического материала, развития навыков практического применения информационных технологий.

Ключевые слова: теория механизмов и машин, планетарная передача, редуктор Джеймса, проектирование, табличный процессор, поиск решений.

Vyskubov Evgenij Vladimirovich

Ph.D., Docent of 105 Department of mechanics, Russian Air Force Military Educational and Scientific Centre «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Krasnodar branch)

Terekhov Vladimir Valerevich

Ph.D., associate professor, Head of 105 Department of mechanics, Russian Air Force Military Educational and Scientific Centre «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin» (Krasnodar branch)
partner2002@front.ru

Annotation. The application of MS Excel Solver add-in utility in the design of planetary mechanisms is reviewed. For deeper understanding of theoretical material, development of practical skills of information technologies applications.

Keywords: theory of mechanisms and machines, planetary mechanism, James reduction drive, design, spreadsheet application, finding solutions.

Дисциплина «механика» является одной из важнейших в системе подготовки инженерных кадров. При этом неотъемлемой частью дисциплины является раздел, посвященный механическим передачам. В зависимости от специфики вуза и конкретного учебного плана механические передачи могут изучаться в рамках дисциплины «механика», охватывающей все ее разделы, либо в таких специализированных курсах, как «техническая механика», «прикладная механика», «теория машин и механизмов», «детали машин и основы конструирования» и др.

С учетом того, что зубчатые механизмы являются составной частью привода большинства современных машин и приборов, традиционно большое внимание в учебном процессе уделяется вопросам, посвященным проектированию и анализу подобных механизмов.

При этом зачастую учебные задачи связаны с расчетом планетарных передач. Такие механизмы обладают несомненными достоинствами: меньшие габаритные размеры и масса, так как вращающий момент передается по нескольким потокам; большие передаточные числа в одной ступени; меньшие радиальные силы, приходящие на валы. Кроме того, планетарные передачи работают с меньшим шумом, что связано с повышенной плавностью внутреннего зацепления и меньшими размерами колес. Такие передачи можно использовать как редуктор с постоянным передаточным числом, коробку скоростей или дифференциальный механизм. В связи с этим планетарные передачи находят применение на транспорте, в станкостроении, приборостроении, в аэрокосмической технике и других отраслях промышленности.

В качестве примера проектирования зубчатой передачи рассмотрим подбор числа зубьев одной из самых простых и распространенных одноступенчатых планетарных передач — редуктора Джеймса (рис. 1).

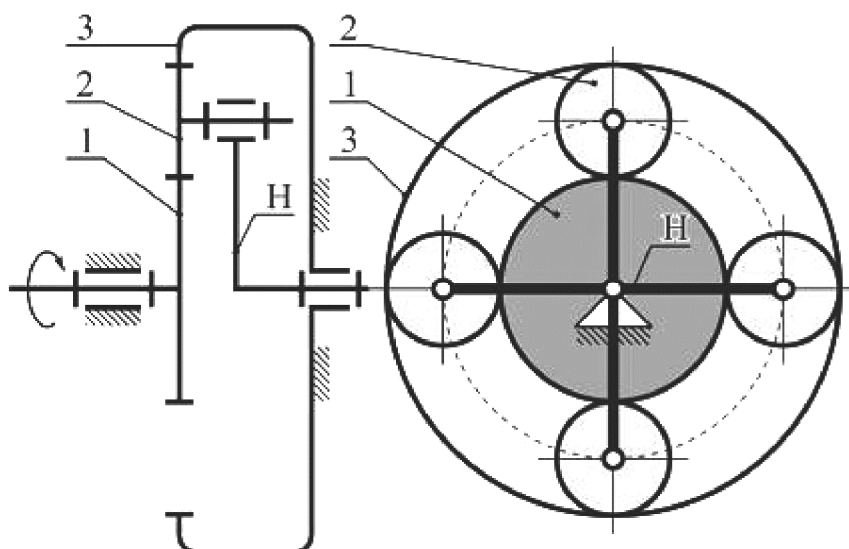


Рис. 1. Редуктор Джеймса

Редуктор состоит из вращающегося центрального (солнечного) колеса 1 с наружным зацеплением, неподвижного центрального (коронного) колеса 3 с внутренним зацеплением и водила H , на котором закреплены оси сателлитов 2. Сателлиты совершают планетарное движение, т.е. вращаются вокруг своих осей и вокруг солнечного колеса. При неподвижном коронном колесе движение может передаваться от солнечного колеса к водилу и наоборот.

Для определения передаточных отношений планетарных механизмов применяют принцип обращения движения (или метод остановки водила, метод Виллиса), суть которого в том, что всему механизму мысленно задают вращение с частотой, равной по величине и противоположной по направлению частоте вращения водила [1]. Тогда водило рассматривается как неподвижное, а весь механизм — как простая зубчатая передача.

Если ведущим является солнечное колесо, то в соответствии с формулой Виллиса передаточное отношение U_{1H} редуктора Джеймса:

$$U_{1H} = 1 + \frac{z_3}{z_1} = 1 - U_{13}^H,$$

где z_i — число зубьев i -го колеса; U_{ij}^H — передаточное отношение от колеса i к колесу j при остановленном водиле H .

При проектировании планетарных механизмов считают передаточное отношение заданным. Все зубчатые колёса имеют одинаковый модуль, причем зубчатые колеса образуют нормальное (неисправленное) зацепление. В этом случае проектирование сводится к подбору чисел зубьев колёс и количества сателлитов. Решение такой задачи должно учитывать следующие условия [2]:

- условие соосности входного и выходного валов механизма, что означает равенство межосевого расстояния первой передачи и межосевого расстояния второй передачи (окружности вершин соседних сателлитов не должны касаться друг друга):

$$z_1 + z_2 = z_3 - z_2;$$

- условие отсутствия заклинивания зацепления которое заключается в том, что число зубьев на меньшем колесе не должно быть меньше, чем:

– для внешнего зацепления: $z_{\min} = 2 \cdot \frac{\sqrt{U_{12}^2 + (2U_{12} + 1) \cdot \sin^2 \alpha} + U_{12}}{(2U_{12} + 1) \cdot \sin^2 \alpha} \leq 17,$

– для внутреннего зацепления:
$$z_{2\min} = 2 \cdot \frac{\sqrt{U_{23}^2 + (2U_{23} - 1) \cdot \sin^2 \alpha} + U_{23}}{(2U_{23} - 1) \cdot \sin^2 \alpha} \leq 17,$$

где $\alpha = 20^\circ$ — угол зацепления;

- условие совместности (или соседства), которое учитывает возможность свободного размещения сателлитов без соприкосновения их друг с другом; это условие будет выполнено, если расстояние между осями сателлитов будет больше диаметра окружности вершин сателлитов:

$$(z_1 + z_2) \cdot \sin \frac{\pi}{p} > z_2 + 2,$$

где p — число сателлитов;

- условие сборки с симметрией зон зацепления, т.е. условие размещения сателлитов с равными углами между их осями:

$$\frac{z_1 + z_3}{p} = k,$$

где k — целое число; при невыполнении условия сборки или соседства уменьшают число сателлитов на единицу.

Подбор чисел зубьев колёс и числа сателлитов проводится в следующей последовательности:

- из условия соосности и формулы для передаточного отношения выражаются передаточные отношения U_{12}^H и U_{23}^H ;
- определяются минимальные числа зубьев колёс из условия отсутствия заклинивания передачи;
- вычисляются числа зубьев всех колёс;
- проверяется условие соосности;
- выбирается число сателлитов планетарного редуктора.

Искомое решение может быть получено как вручную, так и, учитывая легкость формализации алгоритма, с помощью ЭВМ. Мы предлагаем использовать для этого надстройку «Поиск решений» табличного процессора Excel из пакета Microsoft Office. Использование офисного пакета имеет то преимущество, что при этом не требуется знаний какого-либо языка программирования и навыков его практического применения. Вся работа по «программированию» сводится к вводу расчетных формул и описанию системы ограничений.

При синтезе зубчатых механизмов выбор его параметров производится по доминирующему показателю, каковым является точность воспроизведения передаточного отношения при удовлетворении системы заданных ограничений [3].

Применительно к редуктору Джеймса задачу синтеза можно сформулировать так: определить числа зубьев z_1 , z_2 , z_3 и количество сателлитов p , при которых имеет минимум целевая функция

$$I = \left| U_{1H} - \left(1 + \frac{z_3}{z_1} \right) \right|$$

и выполнены все ограничения соответственно указанным выше условиям.

Зададимся, например, передаточным отношением редуктора $U_{1H} = 6$.

Тогда параметры поиска решения можно задать как показано на рисунке 2.

Первое ограничение — условие соосности.

Следующие два ограничения являются условиями отсутствия заклинивания.

Далее, два ограничения задают условия подбора количества сателлитов.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Дано:	$U_{1H} =$	6		<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Параметры поиска решения</p> <p>Оптимизировать целевую функцию: <input type="text" value="\$C\$21"/></p> <p>До: <input type="radio"/> Максимум <input checked="" type="radio"/> Минимум <input type="radio"/> Значения: <input type="text" value="0"/></p> <p>Изменяя ячейки переменных: <input type="text" value="\$C\$12:\$C\$16"/></p> <p>В соответствии с ограничениями:</p> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;"> <p>$\\$C\\$12 = \\$C\\$14 - 2 * \\$C\\13 $\\$C\\$12 \geq \\$D\\9 $\\$C\\$13 \geq \\$D\\10 $\\$C\\$15 = \text{целое}$ $\\$C\\$15 \geq 1$ $\\$C\\$16 = \\$C\\18 $\\$C\\$16 = \text{целое}$ $\\$C\\$17 \geq (\\$C\\$13 + 2) / (\\$C\\$12 + \\$C\\$13)$</p> </div> <p><input type="button" value="Добавить"/> <input type="button" value="Изменить"/> <input type="button" value="Удалить"/></p> <p><input type="button" value="Сбросить"/> <input type="button" value="Загрузить/сохранить"/></p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Сделать переменные без ограничений неотрицательными</p> <p>Выберите метод решения: <input type="text" value="Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ"/> <input type="button" value="Параметры"/></p> <p>Метод решения</p> <p>Для гладких нелинейных задач используйте поиск решения нелинейных задач методом ОПГ, для линейных задач - поиск решения линейных задач симплекс-методом, а для негладких задач - эволюционный поиск решения.</p> <p><input type="button" value="Справка"/> <input type="button" value="Найти решение"/> <input type="button" value="Закрыть"/></p> </div>						
2		$\alpha =$	20								
3		$z_{\min} =$	17								
4											
5		$U_{13} =$	5								
6		$U_{12} =$	2								
7		$U_{23} =$	2,5								
8			расчет								
9		$z_{1\min} =$	14,16	17							
10		$z_{2\min} =$	20,96	21							
11											
12		$z_1 =$	17								
13		$z_2 =$	34								
14		$z_3 =$	85								
15		$p =$	3								
16		$k =$	34								
17		$\sin(\pi/p)$	0,866								
18		K	34								
19											
20		$U_{1H} =$	6								
21		$I =$	0								
22											

Рис. 2. Параметры поиска решения

В связи с тем, что в сервисе «Поиск решения» ограничение может быть числом, простой ссылкой или формулой с числовыми значениями, а отношения «целое» можно использовать только в ограничениях для ячеек переменных решения, в ячейке \$C\$18 число k вычисляется в соответствии с условиями сборки, а ограничения, связанные с ячейкой \$C\$16, это условие определяют.

Последнее ограничение — видоизмененное условие соседства.

По результатам поиска решения может быть сформирован отчет (рис. 3).

Ячейка целевой функции (Минимум)

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение
\$C\$21	I= расчет	0	0

Ячейки переменных

Ячейка	Имя	Исходное значение	Окончательное значение	Целочисленное
\$C\$12:\$C\$16				

Ограничения

Ячейка	Имя	Значение ячейки	Формула	Состояние	Допуск
\$C\$12	z1= расчет	17	$\$C\$12 = \$C\$14 - 2 * \$C\13	Привязка	0
\$C\$16	k= расчет	34	$\$C\$16 = \$C\18	Привязка	0
\$C\$17	$\sin(\pi/p)$ расчет	0,866025404	$\$C\$17 \geq (\$C\$13 + 2) / (\$C\$12 + \$C\$13)$	Без привязки	0,160143051
\$C\$12	z1= расчет	17	$\$C\$12 \geq \$D\9	Привязка	0
\$C\$13	z2= расчет	34	$\$C\$13 \geq \$D\10	Без привязки	13
\$C\$15	p= расчет	3	$\$C\$15 \geq 1$	Без привязки	2
\$C\$15	Целочисленное				
\$C\$16	Целочисленное				

Рис. 3. Отчет

Предлагаемый подход позволит достичь сразу нескольких целей. Во-первых, формализация вычислительного алгоритма (и даже механический ввод формул и описание сценария поиска решения) неизбежно будет способствовать более глубокому осмыслению и пониманию изучаемой темы. Во-вторых, таким образом проявляется междисциплинарная связь, что является стимулом для более ответственного отношения к дисциплинам, не являющимся дисциплинами специализации: знания, умения и навыки, полученные при их изучении, позволят впоследствии более легко и быстро решать задачи, имеющие непосредственное отношение к профессиональной деятельности. И, наконец, в-третьих, несомненно полезным будет более глубокое изучение средств наиболее распространённого табличного процессора, применяемого для автоматизации вычислительных процессов в различных областях.

Литература:

1. Детали машин и основы конструирования: конспект лекций для студентов факультета летательных аппаратов / Б.М. Силаев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 224 с.
2. ТММ. Проектирование и анализ зубчатых механизмов: метод. указ. / сост. : П.А. Галкин, Л.Х. Никитина. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 32 с.
3. Теория механизмов и машин : Учебник / К.И. Заблонский, И.М.Белоконев, Б.М. Щечкин. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 376 с.
4. Зеньковский В.А. Применение Excel в экономических и инженерных расчетах. – М. : СОЛОН-Пресс, 2009. – 192 с.

References:

1. Machine elements and design principles: lecture notes for students of faculty of aircraft / B.M. Silaev. – Samara : Publishing house of Samar. normal Aeroacom, University press, 2011. – 224 p.
2. TMM. Design and analysis of gears: method. the decree / comp. : P.A. Galkin, L.H. Nikitin. – Tambov : Publishing house of compromise. state technical. University press, 2008. – 32 p.
3. Theory of mechanisms and machines: Textbook / K.I. Jablonski, I.M. Belokonev, M.B. Shchekin. – Kyiv : Vyshcha school. Head publishing house, 1989. – 376 p.
4. Zenkovsky, V.A. Application of Excel in economic and engineering calculations. – M. : SOLON-Press, 2009. – 192 p.