

doi: 10.32620/oikit.2021.92.08

УДК 621.833.6

В.Н. Данилов

Подбор чисел зубьев планетарных механизмов схем АА, II, AI, IA, \overline{AI} и \overline{IA} с помощью программного обеспечения

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Большинство методов подбора чисел зубьев планетарных механизмов основываются на генеральных уравнениях, в которых учтены три основных условия их существования: 1) обеспечение заданного передаточного отношения, 2) условие соосности, 3) условие сборки. Остальные условия в систему решаемых уравнений не входят и проверяются дополнительно. Однако в таком подходе есть ряд недостатков, связанных с дискретностью генеральных уравнений в зависимости от нескольких параметров. Поэтому предложен метод подбора чисел зубьев с помощью уравнений, полученных только при учете двух обязательных условий существования планетарных механизмов: 1) обеспечения заданного передаточного отношения, 2) условия соосности. Представлены уравнения для подбора этим методом. Остальные условия существования планетарных передач проверяются отдельно, и в результате исключаются неподходящие варианты решений. Такой подход обеспечивает подбор всех существующих вариантов решений в заданном диапазоне чисел зубьев при сравнительно малом количестве итераций, однако рационален только при использовании на ЭВМ. В связи с этим написано соответствующее программное обеспечение – программа Planmex.exe. Приведено описание этой программы, которая позволяет подбирать числа зубьев колес предложенных схем планетарных передач при целом и дробном передаточном отношении, различных модулях колес на сдвоенном сателлите, разном количестве сателлитов в заданном диапазоне чисел зубьев в зависимости от выбранного ведущего звена. Предложены три варианта оптимизации полученных результатов подбора чисел зубьев: 1) минимальная масса, 2) максимальное быстродействие, 3) максимальный КПД. Введены коэффициенты для сравнения результатов внутри каждого варианта оптимизации и предложены уравнения для их определения. Приведен пример подбора чисел зубьев при различных модулях зубчатых колес на сдвоенном сателлите планетарного механизма схемы AI предложенным методом с помощью программы Planmex.exe. Полученные результаты оптимизированы по трем критериям с учетом области существования заданной схемы.

Ключевые слова: планетарный механизм, передаточное отношение, генеральные уравнения, метод сомножителей, минимальная масса, максимальное быстродействие, максимальный КПД.

Введение

Как известно, для планетарных механизмов характерно сравнительно большое передаточное отношение от ведущего звена к выходному при малой массе и габаритах, что делает их использование рациональным в таких областях машиностроения, как авиация, космонавтика, приборостроение и пр. Однако проектирование передач на основе таких механизмов связано помимо выбора схемы самого механизма еще с подбором чисел зубьев колес, входящих в его состав. В результате необходимо осуществлять этот подбор, учитывая ряд условий, основными из которых являются: 1) обеспечение заданного передаточного отношения, 2) условие соосности, 3) условие соседства, 4) условие сборки, 5) отсутствие подреза, 6) отсутствие заклинивания.

В ряде источников, например, [1, 2, 3], зубья колес планетарных передач подбираются с помощью так называемых генеральных уравнений, которые выводят для каждой конкретной схемы механизма, и учитывают три из шести перечисленных выше условий: 1) обеспечение заданного передаточного отношения, 2) условие соосности, 3) условие сборки. Оставшиеся три условия проверяют отдельно.

Как известно, генеральные уравнения представляют собой следующие зависимости для чисел зубьев z_i :

$$z_i = f(U, k, \lambda, \chi, P, Q), \quad (1)$$

где U – передаточное отношение между входящим и выходящим звеньями;

k – количество сателлитов;

$\lambda = \frac{m_1}{m_2}$ – отношение модулей колес m_1 и m_2 сдвоенного сателлита;

$\chi = \frac{z_2}{z_3}$ – отношение чисел зубьев колес z_2 и z_3 сдвоенного сателлита;

P и Q – любые целые числа, показывающие, какие по счету зубья соответственно входящего и выходящего звена, начиная от зацепления первого сателлита, необходимо совместить с линией центров второго сателлита, чтобы последний сателлит поставить в положение первого.

В общем случае зависимости (1) представляют собой дробные дискретные функции, имеющие множество не связанных и не последовательных решений, которые требуют еще дополнительных проверок.

Поскольку числа зубьев колес должны быть всегда целыми и положительными, то подбор чисел зубьев колес планетарного механизма с помощью уравнений (1) создает следующие проблемы:

- 1) сложно учесть нецелое (дробное) передаточное отношение;
- 2) учесть наличие разных модулей колес на сдвоенном сателлите;
- 3) найти все возможные решения для заданной схемы механизма в определенном диапазоне чисел зубьев колес z_i ;

- 4) определить максимальное количество сателлитов;

- 5) выполнить оптимизацию полученных решений.

В некоторых частных случаях удается найти решение перечисленных выше проблем. Использование ЭВМ для решения генеральных уравнений (1) значительно ускоряет и расширяет поиск решений по подбору чисел зубьев колес и теоретически позволяет найти решение для любой задачи, если оно есть. Однако здесь возникают новые проблемы, связанные с дробной и дискретной спецификой самих решаемых уравнений:

- 1) могут быть пропущенные варианты решений при обычном циклическом переборе переменных величин;

- 2) алгоритм решения может заметно замедляться, т.к. требует многократного повтора при новых параметрах (возможно повторное получение уже ранее полученных решений или множественные получения невозможных решение, которые необходимо отсеивать);

- 3) алгоритм решения может заметно усложняться, так как требует построения сложных аналитических схем, отражающих специфику уравнений.

В связи с этим предлагается осуществлять подбор чисел зубьев для шести схем планетарных механизмов AA , II , AI , IA , \overline{AI} и \overline{IA} в обход генеральных уравнений с помощью соответствующего подготовленного программного обеспечения.

1. Метод подбора чисел зубьев планетарных передач

Как известно, используя метод Виллиса можно выразить для любого планетарного механизма соотношение между его передаточным отношением и числами зубьев его колес [4, 5]. Полученное уравнение, если его записывать в виде отношения простых натуральных чисел, является строгим равенством и первым необходимым условием существования планетарного механизма.

Вторым необходимым условием, имеющим вид строгого равенства, является условие соосности. Это условие определяет параллельное положение оси сателлита относительно главной оси вращения всех зубчатых цилиндрических колес.

Используя эти два условия, можно получить системы уравнений с меньшим количеством параметров, чем в генеральных уравнениях (1), для любых планетарных механизмов, схемы которых известны, что делает их решение на ЭВМ намного проще. Данные уравнения можно также решать методом сомножителей [6], при котором числа зубьев колес представляют в виде произведения некоторых подлежащих определению величин (сомножителей), подбор которых определяет числа зубьев колес для заданной схемы планетарной передачи.

В данной работе рассмотрены планетарные механизмы шести схем рис. 1).

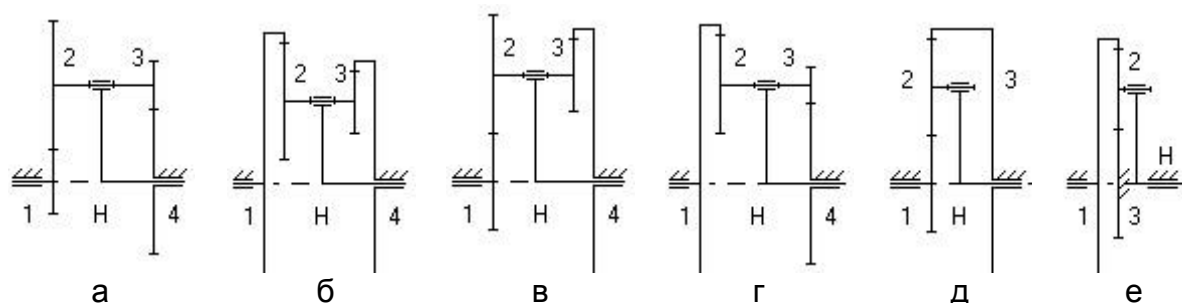


Рис.1. Планетарные механизмы:

а – схема AA ; б – схема II ; в – схема AI ; г – схема IA ; д – схема \overline{AI} ; е – схема \overline{IA} ;
1, 2, 3, 4 – номера зубчатых колес; Н – водило

Для данных схем планетарных механизмов получены системы (2) – (7), состоящие из двух уравнений, выражающие только зависимости чисел зубьев колес z_i , передаточное отношение U между входным и выходным звеньями планетарной передачи и модули колес на сдвоенном сателлите m_1 и m_2 . В отличие от метода сомножителей их решение в программе Plantex осуществляется путем перебора z_i в заданном диапазоне при заданных параметрах U , m_1 и m_2 .

Для показаних на рис. 1 планетарних механізмів уравнения подбора чисел зубьев имеют вид:

– для схемы *AA*

$$\begin{cases} z_4 = \frac{m_1 \cdot z_1 \cdot (1-U) \cdot (z_1 + z_2)}{m_2 \cdot (z_2 + z_1 \cdot (1-U))} ; \\ z_3 = \frac{m_1}{m_2} \cdot (z_1 + z_2) - z_4 \end{cases} \quad (2)$$

– для схемы *II*

$$\begin{cases} z_4 = \frac{m_1 \cdot z_1 \cdot (1-U) \cdot (z_1 - z_2)}{m_2 \cdot (z_1 \cdot (1-U) - z_2)} ; \\ z_3 = z_4 - \frac{m_1}{m_2} \cdot (z_1 - z_2) \end{cases} \quad (3)$$

– для схемы *AI*

$$\begin{cases} z_4 = \frac{m_1 \cdot z_1 \cdot (U-1) \cdot (z_1 + z_2)}{m_2 \cdot (z_1 \cdot (U-1) - z_2)} ; \\ z_3 = z_4 - \frac{m_1}{m_2} \cdot (z_1 + z_2) \end{cases} \quad (4)$$

– для схемы *IA*

$$\begin{cases} z_4 = \frac{m_1 \cdot z_1 \cdot (U-1) \cdot (z_1 - z_2)}{m_2 \cdot (z_2 + z_1 \cdot (1-U))} ; \\ z_3 = \frac{m_1}{m_2} \cdot (z_1 - z_2) - z_4 \end{cases} \quad (5)$$

– для схемы \overline{AI}

$$\begin{cases} z_2 = \frac{z_1 \cdot (U-2)}{2} ; \\ z_3 = z_1 + 2 \cdot z_2 \end{cases} \quad (6)$$

– для схемы \overline{IA}

$$\begin{cases} z_3 = z_1 \cdot (U-1) \\ z_2 = \frac{z_1 - z_3}{2} \end{cases} \quad (7)$$

В уравнениях (2) – (5) следует подбирать значения z_1 , z_2 и получать значения z_3 , z_4 . В уравнениях (6), (7) необходимо подбирать значение z_1 и получать значения z_2 , z_3 .

После получения всех чисел зубьев z_i осуществляется проверка на условие соседства и условие сборки для заданной схемы в зависимости от количества сателлитов k [1].

Если использовать в рассчитываемом механизме только нулевые колеса, то условие отсутствия подреза будет учтено, если числа зубьев выбирать больше 17. Для тех же нулевых колес условие отсутствия заклинивания проверяется только для внутреннего зацепления и, как известно, имеет вид неравенства, в котором разность чисел зубьев между колесом с внутренним и внешним зацеплением должна быть больше 8, что реализовано в программе Planmex.

В случае ненулевых колес в планетарном механизме условия отсутствия подреза и заклинивания необходимо проверять отдельно и в рамках данной работы не рассматривается.

Отметим также, что можно выделить еще ряд дополнительных условий, которые ограничивают область существования заданной схемы планетарного механизма. Большую часть этих условий можно свести к величине отношения диаметров на сдвоенном сателлите или произведению $\lambda \cdot \chi$ в зависимости от количества сателлитов k . Этот параметр также определяется в программе Planmex и требует дополнительной проверки по [1], чтобы установить возможность существования схемы планетарной передачи при подобранных числах z_i .

2. Описание программы Planmex

Для подбора чисел зубьев планетарных механизмов необходимо открыть программу Planmex.exe. Эта программа работает автономно, и для ее работы в среде Windows не требуется установки дополнительного программного обеспечения. В результате откроется главное окно программы.

Для работы программы необходимо задать количество сателлитов, модули зубчатых колес на сателлите, передаточное отношение и выбрать тип (схему) механизма.

Количество сателлитов и модули колес можно задавать вручную или используя меню переключателя. В программе учтено, что количество сателлитов – всегда положительное целое число, а модули колес имеют стандартные значения в диапазоне от 0,05...100 мм. Передаточное отношение надо задавать точно без погрешности расчета. В связи с этим предусмотрена его запись в виде не только вещественного числа с разделителем, но и простой дроби.

После ввода всех параметров необходимо нажать кнопку «Расчет». В результате в верхнем правом окне появятся все подобранные варианты решений, которые можно просмотреть нажатием на кнопки «Вперед» или «Назад» (рис. 2).

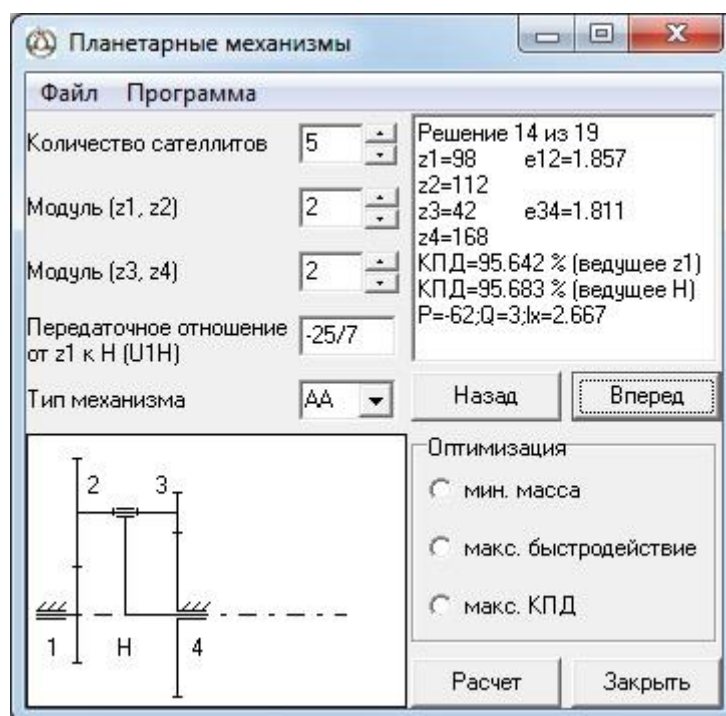


Рис. 2. Главное окно программы Planmex

Для каждого варианта показаны числа зубьев колес; коэффициенты торцевого перекрытия ε_{α} для пары входящих в контакт колес; КПД в зависимости от выбранного ведущего звена; числа P и Q , необходимые для правильной сборки механизма; дополнительный показатель $\lambda \cdot \chi$, определяющий условие существования планетарного механизма выбранной схемы.

В левом нижнем окне появляется отмасштабированный рисунок схемы самого механизма с указанными номерами колес.

Поскольку определен тип планетарного механизма может обеспечивать передаточное отношение только в определенном диапазоне, то если неправильно его задать, может возникнуть ситуация, когда подбор зубьев невозможен, т.е. получаются нулевые решения. В связи с этим в программе Planmex предусмотрена подсказка, которая возникает при наведении мыши на строку задания передаточного отношения (рис. 3).

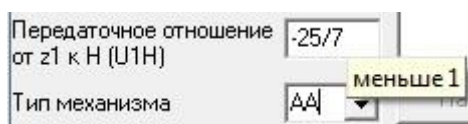


Рис. 3. Выбор передаточного отношения

Программа Planmex по умолчанию подбирает числа зубьев в диапазоне от 18 до 180 при ведущем колесе z_1 , коэффициенте трения скольжения 0.1, потерях в подшипниках и на смазку по 1%. Эти параметры можно изменить, если открыть «Файл», затем «Настройки» или нажать F4. В результате появится окно настроек программы (рис. 4).

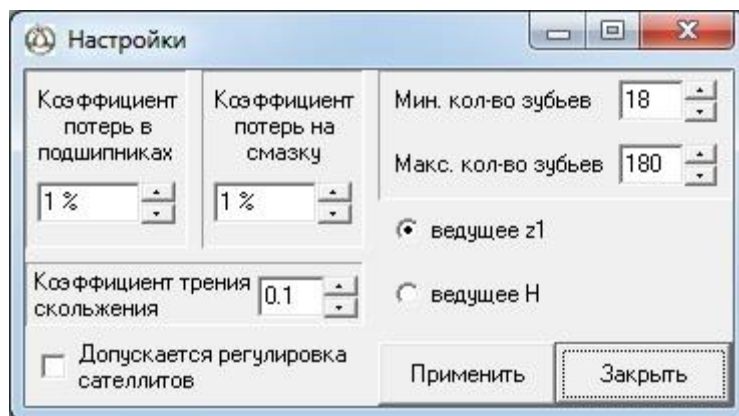


Рис. 4. Окно настроек программы Planmex

Кроме того в окне настроек при необходимости можно отключить условие сборки планетарных механизмов (допустить регулировку сателлитов). Этот случай подбора подразумевает, что возможен поворот одного колеса сдвоенного сателлита относительно другого вокруг своей оси вращения на необходимый угол для обеспечения их равномерного размещения в планетарном механизме. В этом случае количество вариантов решений может увеличиться.

3. Оптимизация полученных решений

Оптимизация полученных решений по подбору чисел зубьев для рассчитанных по программе Planmex планетарных механизмов осуществляется по трем критериям: 1) минимальная масса, 2) максимальное быстродействие, 3) максимальный КПД (см. рис. 2). При этом будет выбран один или два (в случае совпадения) варианта из предложенных вариантов решений.

Под оптимизацией планетарного механизма по минимальной массе подразумевается, что из нескольких рассчитанных вариантов будет выбран тот, суммарная площадь сплошных зубчатых колес для которого минимальна. При этом площадь одного колеса S в зависимости от вида зацепления определяется как:

$$\begin{cases} S_1 = \pi \cdot r^2, \\ S_2 = \pi(r + 3m)^2 - \pi \cdot r^2, \end{cases} \quad (8)$$

где S_1 – площадь зубчатого колеса с внешним зацеплением;

S_2 – площадь зубчатого колеса с внутренним зацеплением;

r – радиус делительной окружности;

m – модуль зубчатого колеса.

Массы водила, соединительных частей и корпуса не учитываются.

Таким образом, в качестве критерия минимальной массы введен коэффициент $\mu = 4 \cdot \sum S_i / \pi$, который в программе Planmex определяется по формулам (9) – (14):

– для схемы AA

$$\mu = z_1^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_2^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_3^2 \cdot m_2^2 + z_4^2 \cdot m_2^2; \quad (9)$$

– для схеми *II*

$$\mu = (z_1 + 6)^2 \cdot m_1^2 - z_1^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_2^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_3^2 \cdot m_2^2 + (z_4 + 6)^2 \cdot m_2^2 - z_4^2 \cdot m_2^2; \quad (10)$$

– для схеми *AI*

$$\mu = z_1^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_2^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_3^2 \cdot m_2^2 + (z_4 + 6)^2 \cdot m_2^2 - z_4^2 \cdot m_2^2; \quad (11)$$

– для схеми *IA*

$$\mu = (z_1 + 6)^2 \cdot m_1^2 - z_1^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_2^2 \cdot m_1^2 + k \cdot z_3^2 \cdot m_2^2 + z_4^2 \cdot m_2^2; \quad (12)$$

– для схеми \overline{AI}

$$\mu = \left(z_1^2 + k \cdot z_2^2 + (z_3 + 6)^2 - z_3^2 \right) \cdot m_1^2; \quad (13)$$

– для схеми \overline{IA}

$$\mu = \left((z_1 + 6)^2 - z_1^2 + k \cdot z_2^2 + z_3^2 \right) \cdot m_1^2. \quad (14)$$

Под максимальным быстродействием планетарного механизма подразумевается, что его приведенный момент инерции I_{np} к ведущему звену от всех зубчатых колес имеет минимальное значение.

В качестве критерия максимального быстродействия введен коэффициент β , который в общем виде можно определить по формуле

$$\beta = \frac{32 \cdot I_{np} \cdot U_{1H}^2}{\pi \cdot b \cdot \gamma \cdot m_1^4}, \quad (15)$$

где U_{1H} – передаточное отношение от первого колеса к водилу;

b – толщина зубчатых колес;

γ – удельный вес.

В программе Planmex коэффициент быстродействия определяется по формулам (16) – (19):

– для схем *AA* и *AI*

$$\beta = z_1^4 U_{1H}^2 + 2kz_2^2 (z_1 + z_2)^2 + \frac{kz_2^4 m_1^2 (z_1 + z_2)^2}{z_3^2 m_2^2} + \frac{3kz_3^2 m_1^2 (z_1 + z_2)^2}{m_1^2}; \quad (16)$$

– для схем *II* и *IA*

$$\beta = 144(z_1 + 3)^2 U_{1H}^2 + 2kz_2^2 (z_1 - z_2)^2 + \frac{kz_2^4 m_1^2 (z_1 - z_2)^2}{z_3^2 m_2^2} + \frac{3kz_3^2 m_1^2 (z_1 - z_2)^2}{m_2^2}; \quad (17)$$

– для схеми \overline{AI}

$$\beta = z_1^4 U_{1H}^2 + 3kz_2^2 (z_1 + z_2)^2 \quad (18)$$

– для схеми \overline{IA}

$$\beta = 144(z_1 + 3)^2 U_{1H}^2 + 2kz_2^2 (z_1 - z_2)^2 \quad (19)$$

При расчете коэффициента полезного действия подразумевалось, что планетарный механизм длительно работает при сравнительно постоянных внешних силах и моментах, исключая режимы пуск-остановка. При этом численное значение его равно отношению работы сил производственного сопротивления к работе движущих сил, вычисленное за время, равное периоду установившегося движения [1].

Таким образом, КПД в зависимости от ведущего колеса z_1 или H , знака передаточного отношения U_{1H} или U_{H1} с учетом коэффициента потерь ψ в программе Planmex определяется по формулам, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты полезного действия

Тип механизма	Ведущее колесо	Передаточное отношение	
		$U_{1H} < 0$ или $U_{H1} < 0$	$U_{1H} > 0$ или $U_{H1} > 0$
AA	z_1	$\eta = 1 - \frac{U_{1H} - 1}{U_{1H}} \cdot \psi$	$\eta = \frac{U_{1H} - \psi}{U_{1H} \cdot (1 - \psi)}$
	H	$\eta = 1 - \frac{U_{H1} - 1}{U_{H1}} \cdot \psi$	$\eta = \frac{U_{H1} - \psi}{U_{H1} \cdot (1 - \psi)}$
II	z_1	$\eta = 1 - \frac{U_{1H} - 1}{U_{1H}} \cdot \psi$	$\eta = \frac{U_{1H} - \psi}{U_{1H} \cdot (1 - \psi)}$
	H	$\eta = \frac{1 - \psi}{1 - U_{H1} \cdot \psi}$	$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{U_{1H}} - 1 \right) \cdot \psi}$
AI, IA, \overline{AI} и \overline{IA}	z_1	–	$\eta = 1 - \frac{U_{1H} - 1}{U_{1H}} \cdot \psi$
	H	–	$\eta = \frac{1 - \psi}{1 - U_{H1} \cdot \psi}$

Коэффициент потерь механизма ψ в программе Planmex складывается из трех частей [7]: 1) потери в подшипниках, 2) потери на смазку, 3) потери на трение скольжения в зубчатой паре колес:

$$\Psi = \Psi_{подш} + \Psi_{см} + \Psi_{тр} \quad (20)$$

Первые два коэффициента $\Psi_{подш}$ и $\Psi_{см}$ можно задать в окне «Настройки» (см. рис. 4), а коэффициент потерь на трение $\Psi_{тр}$ определяется в рабочей части программы PlanTex по формулам (21), (22):

– для схем AA, II, AI, IA

$$\Psi_{тр} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_{\alpha 12} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{z_2} \pm \frac{1}{z_1} \right)}{2} + \frac{\pi \cdot \varepsilon_{\alpha 34} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{z_3} \pm \frac{1}{z_4} \right)}{2}; \quad (21)$$

– для схем \overline{AI} , \overline{IA}

$$\Psi_{тр} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_{\alpha 12} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{z_2} \pm \frac{1}{z_1} \right)}{2} + \frac{\pi \cdot \varepsilon_{\alpha 23} \cdot f \cdot \left(\frac{1}{z_2} \pm \frac{1}{z_3} \right)}{2}, \quad (22)$$

где $\varepsilon_{\alpha ij}$ – коэффициенты торцевого перекрытия для пары колес z_i и z_j ;

f – коэффициент трения скольжения.

В формулах (21), (22) знак «+» необходимо брать для внешнего зацепления, «-» – для внутреннего.

При расчете КПД в программе учитывается явление самоторможения.

Если коэффициент потерь ψ в (20) слишком большой, то для схем AA и II может оказаться, что при ведущем колесе z_1 КПД принимает отрицательные значения и возникает явление самоторможения. Программа PlanTex отобразит этот результат (рис. 5).

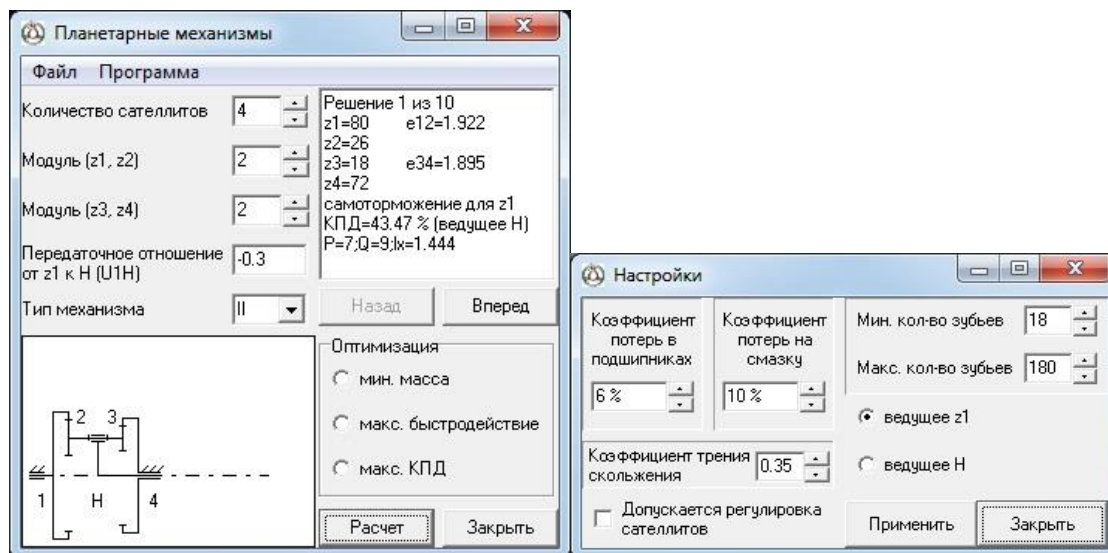


Рис. 5. Самоторможение для планетарного механизма схемы II

На рис. 5 показан результат работы программы для схемы механизма II при следующих параметрах: $k = 4$, $m_1 = m_2 = 2$ мм, $U_{1H} = -0,3$, $\Psi_{подш} = 6\%$,

$\psi_{см} = 10\%$, $f = 0,35$. В этом случае, как видно, работа планетарной передачи при ведущем z_1 невозможна.

4. Пример решения задачи

Рассмотрим планетарный механизм схемы *AI* (см. рис. 1, в). Возьмем для него передаточное отношение $U_{IH} = 7$, количество сателлитов $k = 5$, модуль колес $m_1 = 3$ мм для первой зубчатой пары z_1 и z_2 .

Рассмотрим вариант с разными стандартными модулями на сдвоенном сателлите. При этом модуль колес m_2 второй зубчатой пары z_3 и z_4 будем изменять в диапазоне от 3 до 6 мм.

Оптимизируем полученные решения по трем рассмотренным выше критериям (минимальная масса, максимальное быстродействие, максимальный КПД).

Результаты подбора чисел зубьев программой PlanTex представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты подбора чисел зубьев колес

Модуль второй пары колес	Критерий оптимизации			Кол-во вариантов решений
	Минимальная масса	Максимальное быстродействие	Максимальный КПД	
$m_2 = 3,5$ мм	$z_1 = 70, z_2 = 70,$ $z_3 = 24, z_4 = 144$		$z_1 = 70, z_2 = 84,$ $z_3 = 33, z_4 = 165$	3
$m_2 = 4$ мм	$z_1 = 60, z_2 = 60,$ $z_3 = 18, z_4 = 108$		$z_1 = 80, z_2 = 96,$ $z_3 = 33, z_4 = 165$	10
$m_2 = 4,5$ мм	$z_1 = 60, z_2 = 72,$ $z_3 = 22, z_4 = 110$		$z_1 = 90, z_2 = 120,$ $z_3 = 40, z_4 = 180$	12
$m_2 = 5$ мм	$z_1 = 60,$ $z_2 = 75,$ $z_3 = 20,$ $z_4 = 104$	$z_1 = 60,$ $z_2 = 80,$ $z_3 = 24,$ $z_4 = 108$	$z_1 = 90, z_2 = 120,$ $z_3 = 36, z_4 = 162$	11
$m_2 = 5,5$ мм	$z_1 = 60, z_2 = 72,$ $z_3 = 18, z_4 = 90$		$z_1 = 120,$ $z_2 = 144,$ $z_3 = 36, z_4 = 180$	8
$m_2 = 6$ мм	$z_1 = 60, z_2 = 80,$ $z_3 = 20, z_4 = 90$		$z_1 = 120,$ $z_2 = 160,$ $z_3 = 40,$ $z_4 = 180$	24

При подборе чисел зубьев значения параметров в меню «Настройки» не

менялись (см. рис. 4). В табл. 2 представлены только оптимальные варианты решений, тогда как имеются и другие варианты решений. Кроме того, в случае необходимости можно использовать нестандартные значения модулей m_1 и m_2 . Параметр $\lambda \cdot \chi$ во всех представленных в табл. 2 вариантах лежит в диапазоне от 2 до 2,5, что не создает противоречий для существования подобного рода планетарного механизма [1].

Выводы

Предложенная программа Planтех позволяет подбирать числа зубьев планетарных механизмов для шести схем: AA , II , AI , IA , \overline{AI} и \overline{IA} . При этом обладает рядом достоинств:

- подбираются все с математической точки зрения решения в заданном в «настройках» программы диапазоне z_i ;
- решение на современных компьютерах осуществляется за малый промежуток времени менее 1 с, т.е. практически мгновенно;
- возможен расчет при разных модулях на сдвоенном сателлите, что очень сложно при расчете вручную;
- программа учитывает различные коэффициенты потерь, и как следствие этого, может определить, в каком случае возникнет явление самоторможения для схем AA , II ;
- возможен подбор чисел зубьев, как при ведущем колесе z_1 , так и при ведущем водиле H , в результате чего могут быть получены взаимозаменяемые симметричные варианты чисел зубьев колес;
- можно получать дополнительные варианты решений, если разрешить регулировку сателлитов, т.е. проводить расчет без условия сборки;
- программа оптимизирует полученные результаты по трем критериям: минимальная масса, максимальное быстродействие, максимальный КПД.

Список литературы

1. Ткаченко, В. А. Планетарные механизмы / В. А. Ткаченко. – Харьков: ХАИ, 2003. – 446 с.
2. Кавецкий, С. Н. Синтез планетарных механизмов AI и \overline{AI} со связанными и несвязанными колесами с учетом углов зацепления // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – Вып. 29. – С. 115-120.
3. Синтез чисел зубів планетарних механізмів: навч. посіб. / Ю. Г. Король, О. Ю. Кладова, В. М. Павленко. – Харків: ХАІ, 2004. – 54 с.
4. Усік, В.В. Курс теорії механізмів і машин: навч. посіб. / В. В. Усік, В. О. Меньшиков. – Харків: ХАІ, 2019. – 320 с.
5. Кіницький, Я. Т. Практикум з теорії механізмів і машин: навч. посіб. / Я. Т. Кіницький. – Львів: Афіша, 2004. – 453 с.
6. Коннова, Г. В. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин: учеб. пособие / Г. В. Коннова, А. В. Ступин, В. К. Фурсов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – 107 с.
7. Планетарные передачи. Справочник под ред. докторов техн. наук В. Н. Кудрявцева и Ю. Н. Кирдяшева. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 536 с.

References

1. Tkachenko, V. A. Planetarni mekhanizmy / V. A. Tkachenko. – Kharkiv: Nats. aerokosm. un-t «Khark. aviatsiya. in-t », 2003. – 446 s.
2. Kavetskiy S.N. Sintez planetarnykh mekhanizmov AI i \overline{AI} so svyazannymi i nesvyazannymi kolesami s uchetom uglov zatsepleniya // Vestnik NTU «KHPI» . – 2008. – Vyp. 29. – S. 115-120.
3. Syntez chysel zub'yiv planetarnykh mekhanizmov: navch. posib. /YU. N. Korol', O. YU. Kladova, V. M. Pavlenko. – Kharkiv: KHAI, 2004. – 54 c.
4. Usik, V.V. Kurs teorii mekhanizmov i mashyn: navch. posib / V. V. Usik, V.O. Men'shykov. – Kharkiv: KHAI, 2019. – 320 s.
5. Kinyts'kyu, YA. T. Praktikum z teorii mekhanizmov y mashyn: navch. posib. / YA. T. Kinyts'kyu. – L'viv: Afisha, 2004. – 453 s.
6. Konnova, G. V. Kursovoye proyektirovaniye po teorii mekhanizmov i mashin: ucheb. posobiye / G. V. Konnova, A. V. Stupin, V. K. Fursov. – Komsomol'sk-na-Amure: FGBOU VPO «KnAGTU», 2013. – 107 s.
7. Planetarnye peredachy. Spravochnyk pod red. doktorov tekhn. nauk V. N. Kudryavtseva y YU. N. Kyrdyasheva. – Lenynhrad: Mashynostroenye, 1977. – 536 s.

Надійшла до редакції 10.05.2021, розглянута на редколегії 11.05.2021

Підбір кількості зубців планетарних механізмів схем AA , II , AI , IA , \overline{AI} і \overline{IA} за допомогою програмного забезпечення

Більшість методів підбору кількості зубців планетарних механізмів ґрунтуються на генеральних рівняннях, в яких враховані три основні умови їх існування: 1) забезпечення заданого передаточного відношення, 2) умова співвісності, 3) умова складання. Решта умов у систему розв'язуваних рівнянь не входять і перевіряються додатково. Однак у такому підході є ряд недоліків, пов'язаних з дискретністю генеральних рівнянь залежно від декількох параметрів. Тому запропоновано метод підбору кількості зубців за допомогою рівнянь, отриманих тільки при обліку двох обов'язкових умов існування планетарних механізмів: 1) забезпечення заданого передаточного відношення, 2) умова співвісності. Наведено рівняння для підбору цим методом. Решта умов існування планетарних передач перевіряються окремо, і в результаті позбавляються невідповідних варіантів рішень. Такий підхід забезпечує підбір усіх існуючих варіантів рішень у заданому діапазоні чисел зубців при порівняно малій кількості ітерацій, однак є раціональним тільки при використанні на ЕОМ. У зв'язку з цим написано відповідне програмне забезпечення – програма Planmex.exe. Наведено опис цієї програми, яка дозволяє підбирати числа зубців коліс запропонованих схем планетарних передач при цілому і дрібному передаточному відношенні, різних модулях коліс на здвоєному сателіті, різній кількості сателітів у заданому діапазоні чисел зубців залежно від вибраної провідної ланки. Запропоновано три варіанти оптимізації отриманих результатів підбору чисел зубців: 1) мінімальна маса, 2) максимальна швидкодія, 3) максимальний ККД. Введено коефіцієнти для порівняння результатів всередині кожного варіанта оптимізації та запропоновано рівняння для їх визначення. Наведено приклад підбору чисел зубців при різних модулях зубчастих коліс на здвоєному сателіті планетарного механізму схеми AI запропонованим методом

за допомогою програми Planmex.exe. Зроблено оптимізацію отриманих результатів за трьома критеріями з урахуванням області існування заданої схеми.

Ключові слова: планетарний механізм, передаточне відношення, генеральні рівняння, метод співмножників, мінімальна маса, максимальна швидкодія, максимальний ККД.

Selection of tooth numbers of planetary mechanisms of schemes AA, II, AI, IA, \overline{AI} and \overline{IA} using software.

Most of the methods for selecting the numbers of teeth of planetary mechanisms are based on general equations that take into account three main conditions for their existence: 1) ensuring a given gear ratio, 2) the condition of alignment, 3) the condition of assembly. The rest of the conditions are not included in the system of equations to be solved and are checked additionally. However, this approach has a number of disadvantages associated with the discreteness of the general equations depending on several parameters. Therefore, a method is proposed for selecting the number of teeth using equations obtained only when taking into account two mandatory conditions for the existence of planetary mechanisms: 1) ensuring a given gear ratio, 2) the condition of alignment. Equations for fitting by this method are presented. The remaining conditions for the existence of planetary gears are checked separately and as a result, unsuitable solutions are excluded. This approach ensures the selection of all existing solutions in a given range of teeth numbers with a relatively small number of iterations, but it is rational only when used on a computer. In this regard, the corresponding software has been written - the Planmex.exe program. A description of this program is given, which allows you to select the number of teeth of the wheels of the proposed schemes of planetary gears with a whole and fractional gear ratio, different modules of wheels on a double satellite, a different number of satellites in a given range of numbers of teeth, depending on the selected driving link. Three variants of optimization of the obtained results of selection of the number of teeth are proposed: 1) minimum mass, 2) maximum speed, 3) maximum efficiency. Coefficients are introduced to compare the results within each optimization option and equations are proposed to determine them. An example of the selection of the number of teeth for different modules of gears on a double satellite of the planetary mechanism of the AI scheme by the proposed method using the Planmex.exe program is given. The optimization of the obtained results is made according to three criteria, taking into account the region of existence of the given scheme.

Keywords: planetary gear, gear ratio, general equations, method of factorization, minimum weight, maximum speed, maximum efficiency.

Сведения об авторах:

Данилов Виталий Николаевич – старший преподаватель каф. 202 «Теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем» Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: v.danylov@khai.edu, ORCID 0000-0001-7420-5349