

## Нови възможности за проектиране на цилиндрични зъбни предавки и редуктори (част I)

Емилия Ангелова, Петър Ненов, Велислав Върбанов, Божидар Калоянов

**New possibilities for gear drives and speed reducers design (part I):** The Manual, presented here is developed to improve the process Design of machine elements and to help the students in reaching better results. Different new ideas are given in his seven units, all of them accompanied with a proper authors' software system. Three of those systems are already successfully used in the design practice of our country and are giving solutions closed to the optimal. The given examples could be useful in developing skills for comparative analysis of design solutions from different positions - functional, technological, economical and in creating a design documentation with automated systems and packages.

**Key words:** Design of machine elements, documentation with automated systems.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Подготовката по дисциплините от групата на Общомашиностроителното конструиране (ОМК) е от съществено значение за успешното професионално развитие на студентите по машинно инженерство. Причина за това са специфичните цели, които трябва да бъдат постигнати в процеса на обучението:

- Изграждане на добро пространствено мислене;

- Обединяване на познанията по поредица университетски курсове, за решаването на конкретен проблем чрез разработването на реален проект;

- Развиване на умения за проучване, разработване и сравнителен анализ на конструкторски решения от различни позиции – функционалност, технологичност, икономичност, надеждност, безопасност, изпълнение на ергономични и естетически изисквания, на изисквания



Фиг.1. Обобщен екран на основните програмни системи, съпровождащи Пособието

за опазване на околната среда, изисквания на стандарти, изисквания и др.;

- Натрупване на опит за съставяне на изчислителни схеми, алгоритми, модели, оптимизационни процедури и др., необходим при изчисляване на машинни възли и елементи с помощта на съвременни методи и програмни продукти;

- Създаване на навици за разработване на конструкторска документация с автоматизирани системи и пакети и т.н.

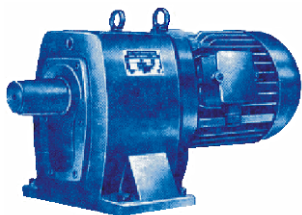
Постигането на добри резултати изисква съвместното използване на голям брой учебни форми и средства, което води и до значително разнообразие в съществуващите учебни планове, програми и пособия. Една от добрите възможности е да се върви към повишаване качеството на обучение чрез хармонизиране на учебните планове, учебните програми, учебния софтуер и учебните помагала. Представяното в работата практическо Пособие е разработено за да обслужва Курсовото проектиране по Машинни елементи в духа на споменатите идеи.

### ИЗЛОЖЕНИЕ Структура и обхват на Пособието

Пособието е базирано върху седем самостоятелно обособени учебно-методични материала, съпроводени и със съответни програмни единици (Фиг.1). Три от разделите се обслужват от извадки на авторски системи, утвърдени и доказали се в конструкторската практика. По-долу е дадено съкратено описание на съдържанието, концепциите и състава на първите 4 раздела.

## 1. Редуктори и зъбни предавки – Конструкции, Приложения, Технологии

Изясняването на специфичните конструктивни и технологични особености на отделни проектни решения е от съществено значение за подготовката по ОМК. В много случаи различията са в малки на пръв поглед предимства, постигнати чрез по-задълбочени предварителни проучвания, по-прецизен сравнителен анализ на съществуващи конструкции, по-точна оценка на условията на експлоатация и на

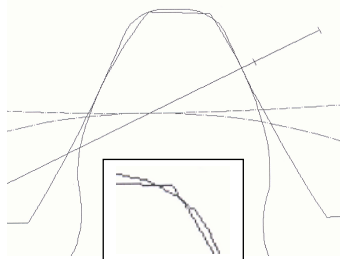


Фиг.2. Фамилия двустъпални съосни двигател редуктори – серийно производство

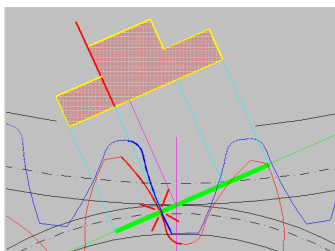
условията на производство. Качеството на тези дейности трудно се подава на оценка и силно зависи от “предварителния опит” натрупан чрез лично направеното, собствените постижения и собствените грешки. С подготовения пакет примери и с коментарите към тях се цели да бъде ускорено натрупването на конструкторски опит. Примерите са систематизирани в три групи – Конструкции, Приложения и Технологии. Водеща идея е, че връзката между тези групи е безусловна и реална, и че основните показатели и качества на изделията се постигат преди всичко в процеса на конструирането. Същественото им подобряване на по-късен етап е невъзможно или е много скъпо. Добра стратегия е отделни възли и елементи или цялата конструкция да се развиват във варианти, допълнително оценявани на технологичност, себестойност и др. Избраните примери представят различни конструкции, както и процеси от тяхното производство и експлоатация. Част от примерите са авторски разработки за практиката (Фиг.2).

## 2. Онагледяване на зацепването и на неговите параметри за качество

Част от теорията на еволвентното зацепване включва абстрактни и трудно разбираеми изводи и обобщения, които могат да бъдат изяснени чрез онагледяване на зъбната предавка и на основни постановки от областта на кинематиката,



Фиг.3А.Интерференция във върховете на зъбите



Фиг.3В. Среден удар в зацепването при  $r_{b1}(\text{задвигващо з.к.}) > r_{b2}(\text{задвигвано})$

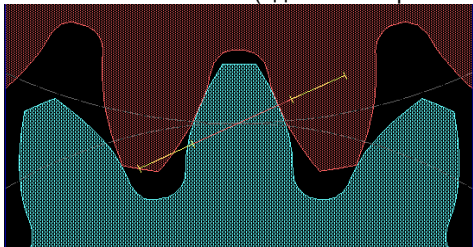
Фиг.3. Анимации на интерференция и среден удар

геометрията и натоварването. При зацепването става въпрос предимно за взаимодействия, които в този раздел се моделират чрез последователно наслагване и комбиниране на определени базови елементи. В резултат на това от статична картина визуализацията се превръща в процес, развитието на който следва определена логика и изяснява това, което става в зацепването. На отделни места онагледяването се подпомага от кратки спомагателни текстове. С компютърното 3D изображение се изяснява, че при цилиндричните предавки с наклонени зъби формата на зъба по широчина на колелото не е линейна а винтова, че наклонът на зъбите по различните диаметри е различен, че те влизат в зацепването от единия си край към другия, че двете зацепени колела са с обратни направления на винтовите линии и т.н. На Фиг.3А е показана интерференция във върховете на зъбите. Визуализирани са също разпределянето на натоварването между отделните зъбни

двойки в зоната на зацепване и натоварването по работния профил, възникването на удари (Фиг.3В) и др. Дадени са прецизно подготвени визуализации за комбинираното влияние на z и x върху формата на зъбите. Показано е как при големи положителни измествания се стига до заостряне на зъбите, но в същото време те стават по-дебели в основата. При малък брой зъби на колелото с подходящи положителни измествания на изходния контур може не само да се избегне подрязването, но да се увеличи значително и товароносимостта на зъбите по критерия "якост на огъване". При големи премествания на зъбонарезната рейка към оста на нарязаното колело, зъбите се стесняват и се стига до подрязване.

### 3. Геометрично изчисляване на зъбни предавки със системата GEOMER

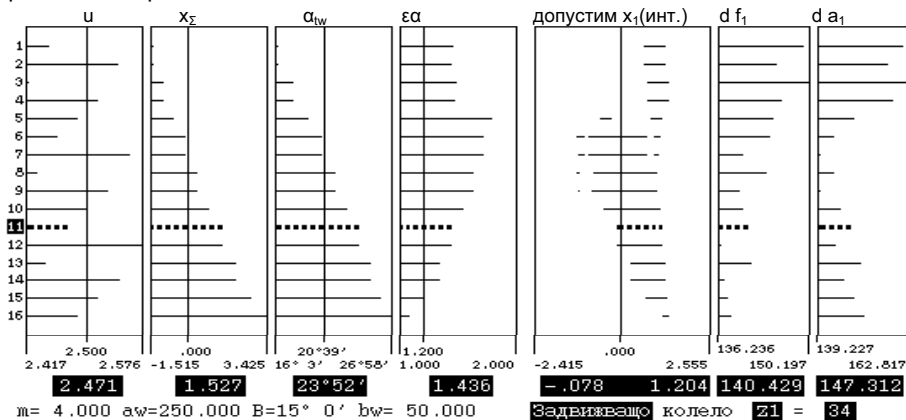
Третият раздел третира геометрията на зъбната предавка. На нея е посветена системата GEOMER (една от първите версии на български софтуер по тези



Фиг.4 Мащабно изображение на предавка в движение

проблеми). Пълният вариант на системата решава четири основни задачи: Първата от тях (П1) третира геометрията на предавките. В Пособието е включен фрагментът, осигуряващ изчисленията на размерите на предавката и основните показатели за качество на зацепването. Възприетият подход към диалога на програмата GEOMER отразява позицията ни, че добрата система не

заменя, а подпомага конструктора, особено когато той познава достатъчно добре решавания проблем.



Фиг.5. Графично представяне на съпоставими параметри на предавки с изад=2.5 и отклонения от него в границите  $\Delta u$  гор = 3.5 % и  $-\Delta u$  дол = -3.5 %

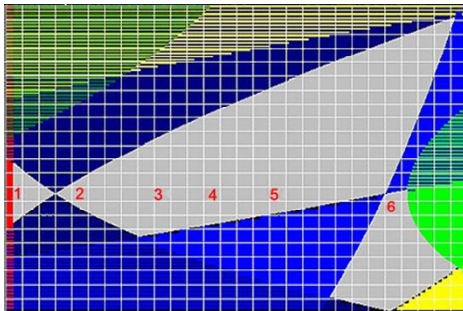
Текущата информация, систематизирана в таблици дава необходимите сведения за изпълнението на параметрите за качество на зацепването и то е гарантирано когато зъбите не са заострени или подрязани и не интерферират. Качеството изисква да бъде осигурен и зададеният коефициент на припокриване. Освен по табличната информация параметрите могат да се оценят и при наблюдаване работата на предлаганото мащабно изображение на зацепването.

Чрез групата П4 за зададени стойности на  $a_{\omega}$ , модул  $m$ , ъгъл на наклон  $\beta$ , предавателно число „u“ и неговите допустими отклонения се генерират всички възможни предавки, удовлетворяващи изходните условия (Фиг.5). Графиката от

фигурата съдържа и редица важни сравняеми параметри на конкурентните предавки.

#### 4. Геометрични блокиращи контури (ГБК) тип $x_1-a_w$ и техните възможности

Малко са случаите, когато зъбната предавка е с параметри, които са твърдо фиксирани. На практика известни

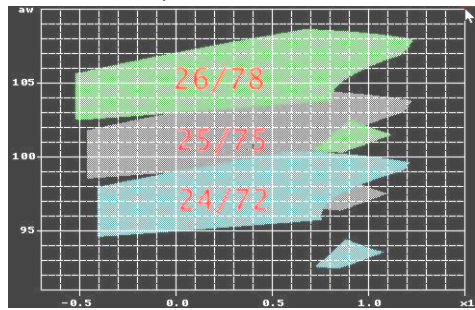


Фиг.6. Първа проекция на ГБК от типа  $x_1-a_w$   
( $z_1=35$   $z_2=86$   $m=4$  mm  $\beta=15^\circ$   $b_w=40$  mm)

промени в предавателните числа, в броя зъби, междуосовите разстояния, коефициентите на изместване на изходния контур, диаметрите на върховете окръжности и др. са напълно допустими и не са загуба на качество. В същото време подходящите стойности на тези параметри могат да подобрят качеството на зъбната предавка. Въпросът е как да се улесни търсенето на по-висококачествени решения. Добри възможности за този процес предлага създаването и

анализът на ГБК от типа  $x_1-a_w$ . В случая той е базиран на системата GEOMER.

Примерите към този раздел имат за задача да изяснят начина за търсене на по-подходящата геометрия. На Фиг.6 е даден автоматизирано създаден ГБК на предавка с посочените параметри на изходния контур (ПИК), брой на зъбите, модул и др. В контура са показани областите на допустимите комбинации на  $a_w$  и на коефициентите  $x_{1,2}$ . Те са отделени от недопустимите съчетания с цветовете, носещи информация за ограничаващите ги параметри за качество на зацепването.

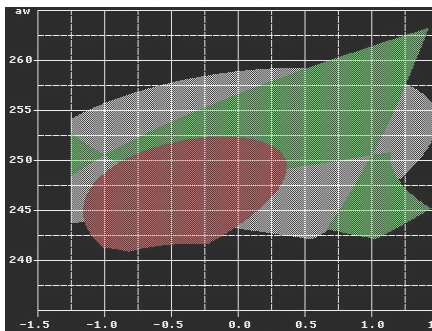


Фиг.7. Изображения на ГБК при еднакви модули и предав. числа, но с различен брой зъби на колелата

Цифрите върху изображението показват примерните места на предавки с т.н. височинна корекция, при която  $x_2=0$ ,  $x_1=-x_2$ ,  $a_w$  и ъгълът на зацепване се запазват едни и същи.

В случаите, когато  $x_{\Sigma} \neq 0$  корекцията се счита за ъглова,  $a_w$  и ъгълът на зацепване се променят.

Силният алгоритъм на системата GEOMER, нейната структура и избраните координати на блокиращите контури предлагат изключително добри възможности за нов, по-различен и ефикасен подход при решаването на редица специфични проблеми. Става въпрос главно за характерни конструкции, в които предавките се явяват „свързани“ по определен начин – фамилии



Фиг.8 ГБК на зъбни предавки с различни коефициенти на радиална хлабина  
 $m=4$  mm,  $z_1=35$ ,  $z_2=86$ ,  $\beta=15^\circ$ ,  $b_w=40$  mm;  
Коефициенти на радиална хлабина:  
a)  $c^*_{f,r}=0,25$  (3 части); b)  $c^*_{f,r}=0,45$ ; c)  $c^*_{f,r}=0,65$

редуктори, скоростни кутии на металорежещи машини и на транспортни средства, планетни предавки и др.

Този нов подход се базира главно на две особености, които ще илюстрираме с примери.

На Фиг.7 са дадени контурите на три предавки, изчертани върху обща мрежа, в еднакъв мащаб. Тази група представя възможностите за реализиране на предавателно число 3,00 при всяко междуосово разстояние от един широк диапазон. Дори и при ограничаване на коефициента на изчестване  $x_1$  в интервала 0-0,5 (с цел запазване на високи коефициенти на припокриване) междуосовото разстояние може да бъде променено в широки граници (от 95-108 mm), при това запазвайки стандартните параметри на изходния контур. Възможността за промяна на  $a_w$  е особено полезна при проектирането на скоростни кутии.

Примерът от Фиг.8 илюстрира втората от споменатите особености. Той показва как може да се изменят формата и разположението на ГБК на дадена предавка чрез промяна на коефициентите на радиална хлабина, т.е. намаляване диаметрите на върховите окръжности.

Анализът на други примери от раздела показва къде е мястото на предавките с големи коефициенти на припокриване (което е една от гаранциите за плавна и безшумна работа), как може да се влияе върху дебелините на зъбите по върховите окръжности и т.н.

При липса на основания за постигане на предварително зададено междуосово разстояние, ъгловата корекция може да се използва и като средство за търсене на оптимални решения. Варирането със стойностите на междуосовите разстояния и коефициенти на изместване в границите на целия геометричен блокиращ контур изисква наличието на мощен програмен пакет, ориентиран към такава стратегия на проектиране. Разглежданите в това пособие програмни пакети GEOMER и GEAR позволяват проектиране в предлагания стил.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Осигуряването на високи параметри на редукторите изисква задълбочено проучване и обхванат сравнителен анализ на конструкциите, производството и условията на експлоатация.

2. Използването на ГБК е мощно средство за качествено проектиране на свързани предавки.

3. Разработването на богати анимации на зацепването и модели на примерни конструкции и натоварвания са мощно средство за въвеждането на нови идеи и технологии в учебния процес и стъпка към изграждането на по-ефективен подход в обучението по конструиране.

### **ЛИТЕРАТУРА**

Пособието доразвива и допълва „Курсово проектиране по машинни елементи“ с автори П.Ненов, Д.Андреев, П.Стаматов и И.Спасов, изд. Техника – С.,2002, 2007 и монографията „Параметрично оптимизиране на зъбни предавки“ с автор П.Ненов, изд. Техника, С. 2002.

То отразява опита и на автори, цитирани в споменатите издания.

#### **За контакти:**

проф. д-р инж. Петър Ненов, e-mail: pnenov@gmail.com  
доц. д-р инж. Емилия Ангелова, e-mail: ang@ru.acad.bg  
Русенски университет „Ангел Кънчев“, гр.Русе, Катедра “Машинознание и машинни елементи”, тел.: 082-888 461

д-р инж. Велислав Върбанов, e-mail: Varbanov@gmail.com

н.с.инж.Божидар Калоянов, e-mail: Bojidar.Kaloyanov@russe.nssi.bg

**Докладът е рецензиран.**