

# TRENDS IN COMPUTER DESIGN OF REDUCTION GEAR

**Stamen I. Antonov**

*National Military University “Vasil Levski”, Artillery, AAD and CIS Faculty,  
stamantonov@abv.bg*

**Abstract:** *The article explores contemporary computer tools for design of reduction gear. The article is fully adapted to the need for knowledge and skills in the future work of engineers in machine engineering.*

**Key words:** *reduction gear, CAD software, geometric design, computer modeling.*

## СЪВРЕМЕННИ ТЕНДЕНЦИИ В КОМПЮТЪРНОТО ПРОЕКТИРАНЕ НА РЕДУКТОРИ С ЦИЛИНДРИЧНИ ЗЪБНИ КОЛЕЛА

**Стамен И. Антонов**

### **I. Въведение**

Проектирането на зъбните предавки, включващо: уточняване на вида на контактуващите зъбни повърхнини, определяне на техните геометрични параметри и извършването на якостните и кинематични пресмятания, до голяма степен се определя от предназначението им и от конкретните изисквания, поставени към тях. Съществуването и използването на съвременни CAD/CAM системи, позволява да бъдат автоматизирани процесите, свързани с моделирането и изработването на зъбните предавки. Това е основна предпоставка за създаване на нови зъбни механизми (включващо – моделиране, конструиране, изпитване, документиране, изработване), както и за оптимизиране на съществуващите такива. В доклада са отбелязани предимствата от използването на CAD/CAM системите за проектиране, отразена е последователността за моделиране на спрегнати зъбни предавки и са посочени възможностите за тяхното изработване.

### **II. Приложимост на CAD/CAM/CAE системите при проектиране на редуктори**

Системите за автоматизирано проектиране заемат изключително място сред компютърните приложения, тъй като те са индустриални технологии, влияещи непосредствено на материалното производство.

Приложението на съвременните CAD/CAM системи се използва за тримерно моделиране на отделни детайли, на механизми и машини с голям брой възли от високо ниво на сложност, от които се изготвя графичната част на конструкторската документация – чертежите (CAD); за инженерни изчисления и анализи (CAE); за бързо изготвяне на прототипи (Rapid Prototyping-RP); за технологична подготовка на производството (CAP); за изготвяне на управляващи програми за NC машини за изработване на различни по сложност изделия (CAM), както и за цялостно управление на проектите и инженерните данни (PDM) и документи (EDM) на дадена фирма [1].

*Якостни и кинематични пресмятания на зъбните предавки с помощта на CAD системи*

Якостните и кинематични пресмятания на зъбните предавки в даден редуктор с помощта на CAD системи се извършват автоматично при задаване на определени стойности на изходящите параметри. При това се извеждат непосредствено крайните резултати, необходими при конструирането на зъбни механизми. Съществуват две възможности:

1. При проектиране на стандартни зъбни предавки – цилиндрични, конусни и червячни. CAD продуктите от среден и висок клас (AutoCAD, TopSolid, SolidWorks, CATIA) извършват

автоматично пресмятане и генерират съответната предавка. Така получения модел може да бъде вграден директно в конструирания механизъм и може да бъде изменян многократно в зависимост от якостни, кинематични, конструктивни и естетически изисквания, поставяни към него.

2. При проектиране на нестандартни зъбни предавки – разработва се програма за тяхното якостно-геометрично изчисляване (на Mathcad, MATLAB, Excel и т.н.) или натоварванията се задават директно върху модела, при което отново при въведени първоначални данни се извеждат крайните резултати във вид удобен за ползване.

#### *Симулация на движенията с помощта на модулите в CAD/CAM/CAE системите*

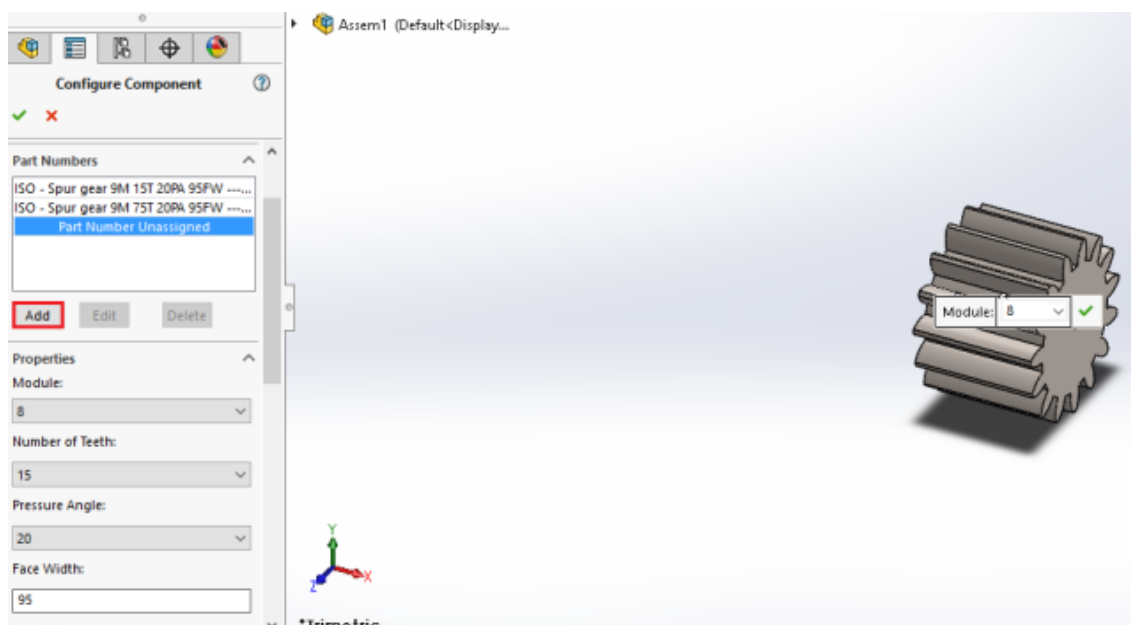
За симулация на движенията се възпроизвежда задружната работа на спрегнатите зъбни колела в предавките и се симулират движенията в зъбния механизъм, от където се проследява нормалната работа и се правят изводи за съответните граници на заклиняване, колизии, хлабини и др.

#### *Технология на изработка*

Подходящо използвания САМ продукт директно генерира от моделите на зъбните колела програми за тяхната изработка на съответната NC машина (ерозийна, обработващ център и т.н.) с подходящ избор на режещи инструменти (за груба и чиста изработка) и с необходимите режими на рязане. Симулира се процеса на изработване и се анализират получените повърхнини.

#### *Моделиране на спрегнати зъбни предавки*

Геометричното CAD моделиране на зъбни предавки може да се извърши по три начина. До голяма степен изборът на вариант се определя от това, дали те са стандартизирани или не са, т.е. дали те са заложили в CAD програмите и техните приложения и позволяват ли използваните CAD системи това моделиране да стане.



Фиг. 1. Геометрични параметри на стандартни зъбни предавки, заложили в CAD програмите

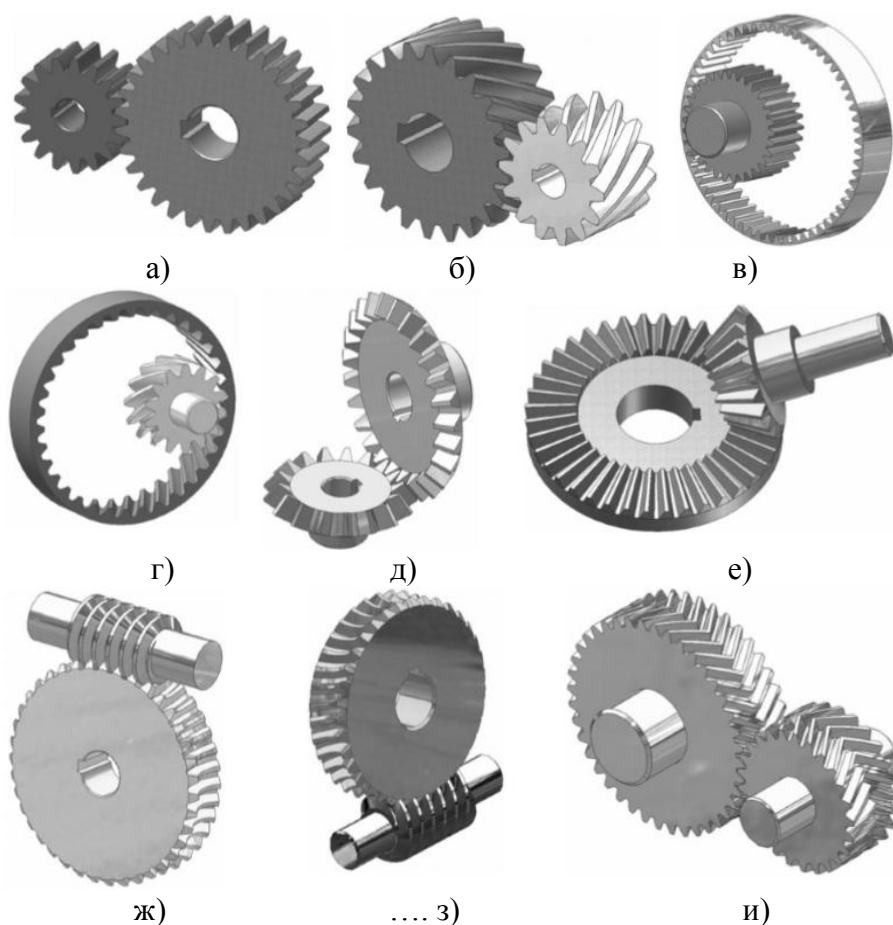
#### *Моделиране на спрегнати зъбни предавки, непосредствено от извършения CAD синтез*

Такова моделиране е възможно при пълна съвместимост на използваните CAD продукти. При него се извършва обмен на данни без загуба на информация, при което получените аналитични зависимости и графично визуализирани повърхнини от едната CAD система се трансферира в друга и се генерират твърдетелните модели на синтезираните предавки. Този начин е приложим най-вече за нестандартните зъбни предавки. Интерес представлява факта, че стандартните модели, заложили в CAD системите, по които се генерират желаните предавки, са получени по този начин.

#### *Моделиране на стандартни зъбни предавки*

За моделиране на стандартни зъбни предавки се използват вградените в CAD системите приложения. За да се получи моделът на желаната предавка, за нея се задават необходимите геометрични параметри (фиг.1) и силови натоварвания. Изчисляването се извършва автоматично,

извеждат се крайните резултати и се генерират зъбни предавки. При необходимост, те могат да бъдат пре моделирани чрез промяна на своите параметри, в зависимост от изменението на натоварванията и кинематиката и в зависимост от желаните дизайн и конструктивни особености. На фиг. 2 са показани модели на стандартни зъбни предавки, получени с CAD продукта Solid-Works [4].



Фиг. 2. CAD модели на стандартни зъбни предавки

- а) Цилиндрична зъбна предавка с външно зацепване с прави еволвентни зъби
- б) Цилиндрична зъбна предавка с външно зацепване с наклонени еволвентни зъби
- в) Цилиндрична зъбна предавка с вътрешно зацепване прави еволвентни зъби
- г) Цилиндрична зъбна предавка с вътрешно зацепване с наклонени еволвентни зъби
- д) Конусна зъбна предавка с ортогонални оси на ротация
- е) Конусна зъбна предавка с неортогонални оси на ротация
- ж) Червячна предавка с едноходов червяк
- з) Червячна предавка с триходов червяк
- и) Шевронна зъбна предавка

### III. Пресмятане и моделиране на елементите на едностъпален редуктор

В доклада е представен пример за изчисляване, проектиране и симулация работата на едностъпален редуктор с цилиндрични зъбни колела с прави зъби. Стъпките за моделирането и последователността на изпълнението им са изложени по-долу. Всяка от посочените стъпки при изчислението и моделирането може да бъде извършена по повече от един начини, в зависимост от гледната точка на конструктора.

Редукторът, който е разгледан в примера е едностепенен, с цилиндрични зъбни колела с прави зъби. Корпусът му се състои от две части: основа и капак, които се разделят от равнина минаваща през осите на валове. При изчисленията основно се използва техническият справочник „Пресмятане и конструиране на машинни елементи [2]“.

### 1. Определяне на предавателното число на редуктора (i)

За определяне на предавателното число на даден редуктор се вземат под внимание следните фактори: взаимно разположение на двата вала, големина и предаван на въртящ момент (Мв), скорост на въртене, ограничение в масата и габаритните размери на детайлите ако има такива [2].

Основен принцип при избора на предавателното число за цилиндрични зъбни колела с прави зъби е  $i \leq 8 \div 10$ .

### 2. Определяне на оборотите на вала

Обороти на входящия вал са в зависимост от предавателното число [2]:

$$(1) n_1 = n_2 \cdot i$$

### 3. Избор на материал за зъбните колела

Оснвния материал за изработка на зъбните колела е стомана, като се допуска при малки натоварвания зъбните колела да се изработват от чугун. Изборът на стомана зависи от условията и режима на работа на редуктора, както и от установения начин на смазване. За зъбни предавки с ниски обороти до  $100 \text{ min}^{-1}$  се приема, че твърдостта на материала не е от значение. Зъбните редуктори с обороти над  $100 \text{ min}^{-1}$  задължително работят в условие на смазване и се изчисляват на контактна якост и твърдост на зъбите за избрания материал.

Ако натоварването е придружено с удари или вибрации се налагат допълнителни изчисления за жилавост на сърцевината им. За средните натоварвания се използва качествена въглеродна стомана от следните марки: ст.35, ст.40, ст.45, ст.50.

При тежки натоварвания и вибрации за изработка на зъбни колела се използва легирана стомана. Най-използвани марки са: 40х, 40хн, ст.35хгс

Задължителната твърдост на зъбите по Бринел е  $\leq 350$ .

Зъбни колела с малки размери се изработват заедно със съответния вал.

### 4. Определяне на допустимото напрежение на огъване в зъбната предавка

Допустимото напрежение на огъване при отчитане на умората на материала се определя основно от формула за симетрично знакопроменливо натоварване на зъбите в двете посоки [2]:

$$(2) [\sigma]_{ог} = \frac{\sigma_{-1}}{n \cdot K_{\sigma}} \cdot k_{ц.ог} \text{ [MPa]}$$

Където  $\sigma_{-1}$  е граница на умора на материала при симетричен цикъл на натоварване. Границата на умора може да се определи от приблизителен способ или при изчисляване при отчитане видът на стоманата [2].

$$(3) \sigma_{-1} = 0,22(\sigma_b + \sigma_s) + 50$$

- [n] представлява коефициент на сигурност при пресмятане на двойни колела;
- ( $K_{\sigma}$ ) представлява ефективен коефициент на концентрация на напрежение;
- $k_{ц}$  – коефициент на огъване отчитащ броя на циклите на огъване;

Напреженията на огъване се изчисляват за всяко зъбно колело.

### 5. Пресмятане на зъбни колела

Силите, които натоварват работещите зъбни колела, създават напрежения, които са пропорционални на входящия въртящ момент, който е зададен по условие. Напрежението в зъбите на зъбните колела не е постоянно по място и време и е неравномерно разпределено по дължината на зъбите поради неуспоредност между осите на зъбните колела, затова зъбните колела се изчисляват при отчитане на допустимите напрежения на огъване.

### 6. Изчисляване на нормалния модул

Нормалният модул се изчислява по формулата [2].

$$(4) m \geq C_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{M_b \cdot 10 \cdot K_k \cdot K_d}{Z_1 \cdot \Psi_m \cdot Y \cdot \sigma \cdot 10^6}}$$

Където  $C_2$  е коефициент, отчитащ вида на предавката;

- $M_b$  е въртящ момент, който се задава по условие;

- Кк представлява концентрация на натоварване;
- Кд е коефициент, който отчита условията на динамичност, т.е той отчита динамичните сили, които възникват при въртенето на зъбните колела поради неточност в изработката и зацепването им;
- $Z1$  - брой зъби на водещото зъбно колело;
- $\Psi m$  - коефициент, който отчита дължината на зъба спрямо модула;
- $Y$  - коефициент, който отчита формата на зъба;
- $[\sigma]$  - допустимо напрежение на огъване за водещото колело.

#### 7. Определяне на основните параметри на цилиндричната предавка

Броят зъби на водимото зъбно колело ( $Z2$ ) се определя по формулата:

$$(5) Z2=Z1.i$$

- Междусосовото разстояние ( $A$ ) се определя по формулата:

$$(6) A = \frac{Z2+Z1}{2} \cdot m$$

- Диаметърът на делителната окръжност на водещото зъбно колело се определя по формулата:

$$(7) D_d = Z1 \cdot m [\text{mm}]$$

- Външния диаметър на водещото зъбно колело се определя по формулата:

$$(8) D_k = m \cdot (Z1+2)$$

- Дължината на зъба на водещото колело ( $b$ ) е функция от следните параметри:

$$(9) b = \Psi m \cdot m + 5$$

По аналогичен начин се изчисляват и параметрите на водимото зъбно колело от едностъпалния редуктор с цилиндрични зъбни колела с прави зъби.

#### 8. Изчисляване на задвижващия вал

Задвижващият вал на редуктора се изчислява на огъване и усукване едновременно:

$$(10) [\sigma]_{ог} = \frac{M_{ог}}{W_{ог}} = \frac{32M_{ог}}{\pi \cdot d^3} \leq [\sigma]_{ог}$$

Където:

- $M_{ог}$  е огъващ момент;
- $[\sigma]_{ог}$  е допустимо напрежение на огъване;
- $W_{ог}$  е съпротивителен момент.

#### 9. Изчисляване на диаметъра на задвижващия вал.

Диаметъра на задвижващия вал се определя по формулата [2]:

$$(11) d1 \geq \sqrt[3]{\frac{M_{ог}}{0,1 \cdot [\sigma]_{ог}}}$$

#### 10. Изчисляване на задвижвания вал.

Огъващия момент на задвижвания вал се определя по следната формула:

$$(12) M_{ог} = M_v = 9554 \cdot \frac{N}{n} [\text{N.m}]$$

Където:

- $N$  е предавана мощност
- $n$  са оборотите на задвижваното зъбно колело

Диаметъра на вала се изчислява по следната формула [2]:

$$(13) d2 \geq \sqrt[3]{\frac{M_{ог}}{0,1 \cdot [\sigma]_{ог}}}$$

Изчисляваните диаметри на валовете са диаметри за лагерите и са минимални диаметри за валовете. Диаметрите на лагерните шийки се оформят конструктивно в зависимост от избраните лагери.

#### 14. Изчисляване и избор на лагери.

Изчисляването на лагерите се извършва за динамична товарносимост, като последователно това се прави за задвижващия и за задвижвания вал по формулата:

$$(14) C = \frac{td}{fn \cdot ft} \cdot P [\text{kN}],$$

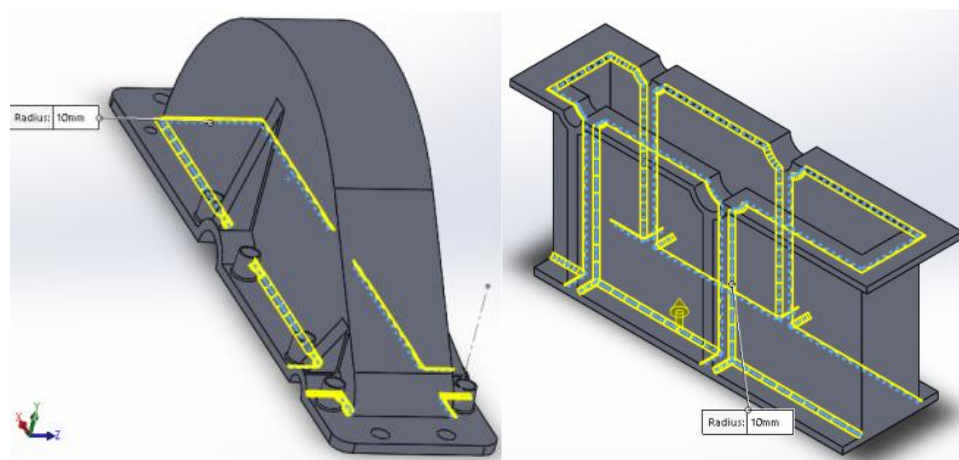
където:

- $ft$  е коефициент за динамично натоварване;
- $fn$  е коефициент за честотата на въртене;
- силата  $P$  се приема, че има стойност, наполовина на зададения мъртящ момент ( $M_v$ ).

След якостните и кинематични изчисления следва примерното моделиране на едностъпалния редуктор с цилиндрични зъбни колела с прави зъби.

Примерното моделиране на машиностроителен детайл с помощта на CAD системите се извършва в следната последователност [5]:

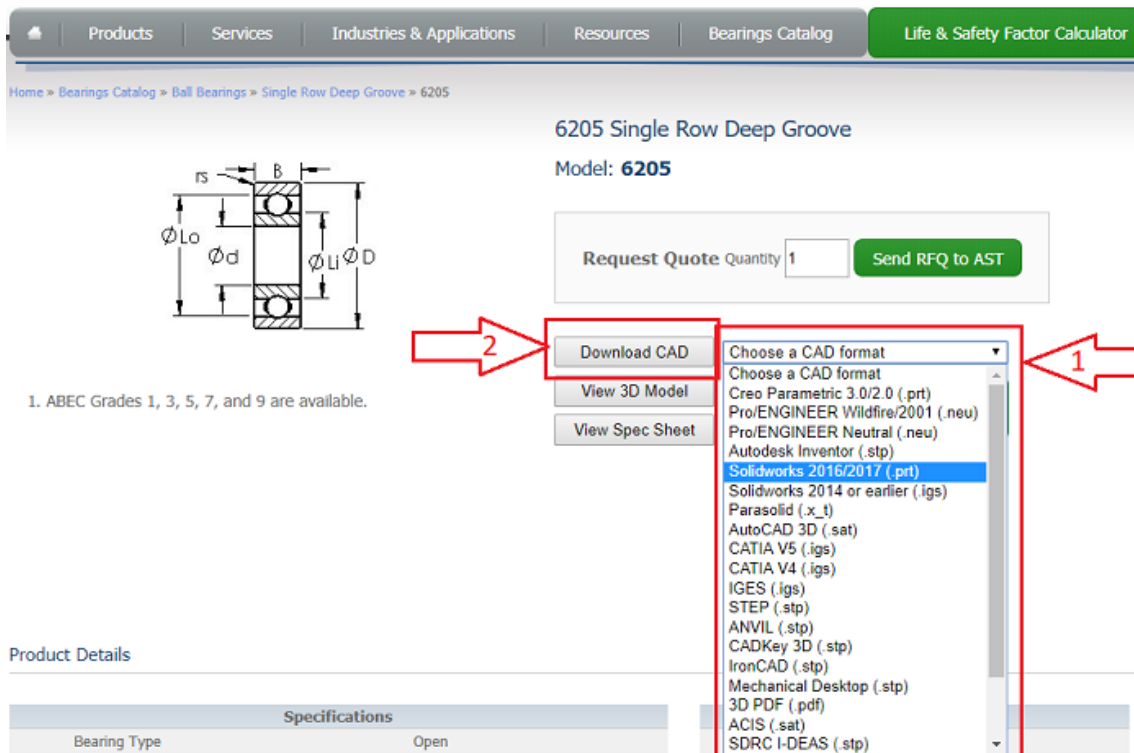
- анализира се датайлът и се взема решение за неговото разделяне на елементарни конструктивни елементи, които могат да се създават с използваната система;
- определя се елементът, който ще се използва за базов;
- приема се ред за създаване на конструктивните елементи;
- избират се начините за построяване на конструктивните елементи;
- построяват се конструктивните елементи в приетия ред, като към тях се прилагат съответните конструктивни операции (фиг. 3);
- преглед и корекция на създадените елементи за реализиране на възприетата стратегия за моделиране на детайла.



Фиг. .3 Примерни модели на корпуса и капака на проектирания редуктор

Машинните елементи за обезпечаване на въртливо движение – лагери могат да бъдат подбрани от интегрираните софтуерно библиотеки или да се изтеглят директно от web страницата на производителя на лагерите (фиг. 4).

Използваният за целта на доклада продукт за автоматизация на инженерния труд Solid-Works има библиотека с над 700,000 стандартни елемента, поддържа множество международни чертожни стандарти и позволява на потребителите да създават детайли и да документират създадени дигитални прототипи [4].



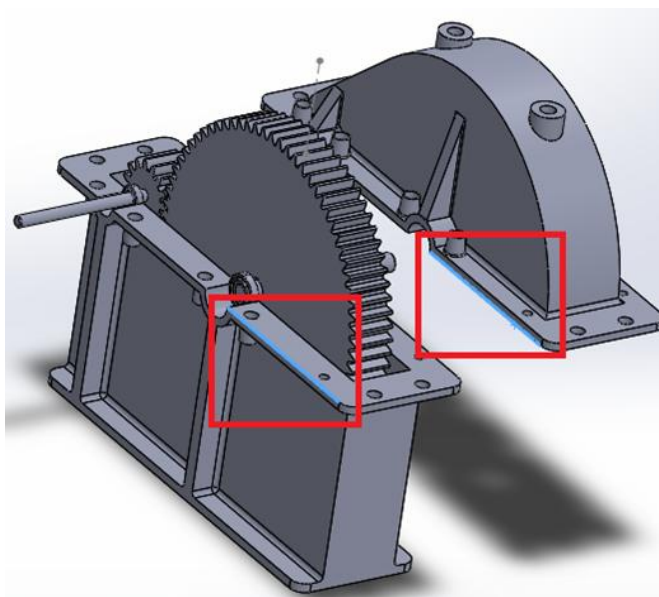
Фиг. 4. Подбор и оразмеряване на стандартни машинни елементи

#### IV. Асемблиране на сглобен механизъм и създаване на чертежи

При автоматизираното проектиране могат да се създават регламентирани от стандарта два вида сглобени единици:

- сглобени единици, състоящи се само от детайли;
- сглобени единици, съдържащи детайли и други сглобени единици.

След разполагане на компонентите във файла на механизма, те трябва да бъдат сглобени. При сглобяването на компонентите се ограничават степените им на свобода. Съществуват шест възможности за движение на твърдо тяло в пространството - три транслационни премествания по направление на координатните оси и три ротационни движения около координатните оси. Компонентите се сглобяват като се използват връзки. Те дават възможност за позициониране на отделните детайли от сглобената единица в строго съответствие един с друг (Фиг. 5).



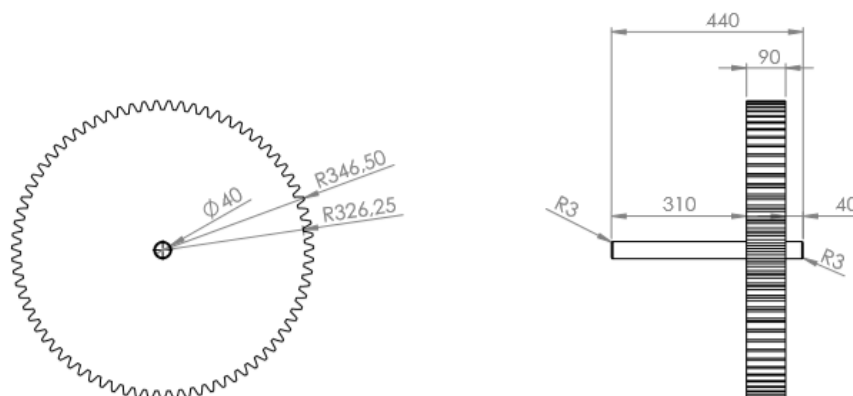
Фиг. 5. Фиксиране на компоненти в сглобената единица

Създаването на чертеж от 3D модел се свежда до генериране на проекции на базата на тримерните модели, придружени със съответните размери, означения за грапавост, геометрични допуски, технически изисквания и др.

Чертежите и тримерните модели представляват взаимосвързани документи, т.е. промените в модела на детайл или схлобена единица променят и съответните чертежи. Възможно е и обратното, чрез промяна на размери в чертежа да се променят моделите. Чертожните файлове винаги трябва да се придружават от съответните моделни файлове. Чертежите се записват в отделни файлове със съответното разширение, в зависимост от използвания САД продукт за работа. Чертожният файл може да съдържа един или няколко чертожни листа, като в даден момент само един от тях е активен.

Създаването на чертеж включва:

- избор на формат на чертожния лист, рамка и таблица с основния надпис;
- настройване на графичната среда – метод на проектиране (европейска или американска позиция [4]), подразбиращ се мащаб, символи за означаване на изгледи, разрези и технологични бази, начини за представяне на основни елементи от чертежа (линии, размери, шриховка, геометрични допуски, надписи и др.);
- композиране на чертежа чрез създаване на изгледи и разрези, оразмеряване, надписване и др. (фиг.6);
- попълване на таблицата с основен надпис;
- отпечатване на чертежа на периферно устройство.



NOTES:  
75 TEETH, MODULE 9 SPUR GEAR

Фиг. 6. Композиране на чертеж в графична среда

## V. Технология на изработване

Нарязването на зъбните колела може да се извърши на металорежеща машина с ЦПУ с профилиран режещ инструмент по метода на копирането, като инструмента се движи по апроксимирана крива, доближаваща се до контура на напречното сечение на нарязваните зъби.

Зъбните колела на моделирания в доклада редуктор могат да бъдат изработвани на обработващ център или нишкова ерозионна машина с CNC управление. За целта е нужно да бъде генерирана програма от подходящо избрана САМ система. Независимо от типа на използваната САМ система, при съставяне на управляващите програми се използват създадените с САД системите модели на обработваните модели. От твърдотелния модел автоматично се разпознават различните геометрични елементи. Информацията, получена от тях се използва за избиране на необходимите инструменти за обработка. Траекториите на инструментите, генерирани с САМ система са в асоциативна връзка с оригиналния САД модел и при редактиране на 3D геометрията, траекториите се променят автоматично. САМ системата симулира и проверява пътя на инструмента и отнемането на материала от модела, като инструментът, държачът, заготовката и приспособленията за базиране и захващане са включени в симулацията и представят реалистично процеса на обработка.



## **VI. Заключение**

В доклада е представена последователността за пресмятане и геометрично моделиране на зъбни предавки посредством CAD системи и са посочени начините за механичното им изработване.

Направена е обосновка за използване на CAD/CAM системи, като са посочени предимствата им при проектиране на зъбни предавки в редукторите.

## **References:**

1. Донков Д., CAD/CAM системи в машиностроенето, Част 2, УИ "В. Априлов", Габрово, 2001.
2. Д. Христов, Г. Петков, Н. Чавушян, С. Начев, М. Проданов, Пресмятане и конструиране на машинни елементи, София, 1980.
3. [http://www.academia.edu/36663133/DESIGN\\_AND\\_ANALYSIS\\_OF\\_A\\_TWO\\_STAGE\\_REDUCTION\\_GEARBOX](http://www.academia.edu/36663133/DESIGN_AND_ANALYSIS_OF_A_TWO_STAGE_REDUCTION_GEARBOX)
4. <https://www.solidworks.com>
5. <https://store.topsolid.com/cad.htm>