

# САД-СИМУЛАЦИОННО МОДЕЛИРАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА ИНЕРЦИОНЕН ТРАНСФОРМАТОР НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ ПРИ БЛОКИРАН ИЗХОДЕН ВАЛ

Димитър ПЕТРОВ, Валери БАКЪРДЖИЕВ

[dimgog@abv.bg](mailto:dimgog@abv.bg), [inj.bakardjiev@abv.bg](mailto:inj.bakardjiev@abv.bg)

ТУ – София, Филиал Пловдив, ФМУ, кат.МУ  
гр. Пловдив, ул. “Цанко Дюстабанов” №25

## Резюме

Във въведението се дава обобщената схема, принципа на действие на механичните инерционни трансформатори на въртящ момент, както и техните предимства, недостатъци и перспективни направления за развитие и изследване. Накратко се описва се изградената посредством САД-софтуер тримерен модел на инерционен трансформатор на въртящ момент. Дават се накратко методиката за и резултатите от симулацията на движението на предавката при блокиран изходен вал. Резултатите от симулацията се сравняват с аналитично получени стойности. Правят се някои изводи.

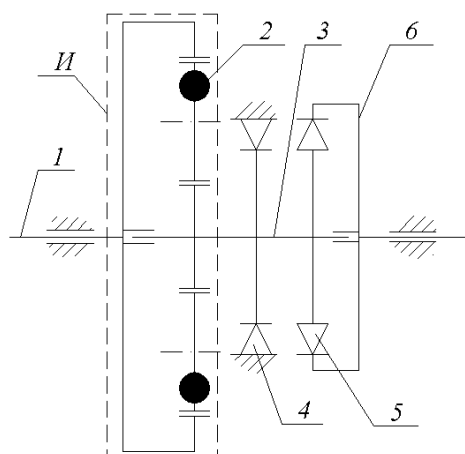
## Ключови думи

Инерционен трансформатор на въртящ момент (ИТВМ), еднопосочен съединител, САД

## Въведение

В много съвременни машини е необходимо регулиране скоростта на изпълнителните органи в зависимост от условията на технологичния процес, от възникващите съпротивления и т.н. Обикновено е необходимо предавателното отношение на предавката между двигателя и работната машина да нараства при нарастване на полезния съпротивителен момент. Съществуват стъпално и безстъпално (плавно) изменение на предавателното отношение, като плавното е по-добро, но по-трудно осъществимо. Това може да стане чрез механични, хидравлични или електрически предавки. Инерционните трансформатори на въртящ момент (ИТВМ) представляват механични автоматични безстъпални предавки отличаващи се с редица предимства: компактна конструкция, висок КПД, широк диапазон на трансформиране на въртящия момент и т.н. Могат да преминават от режим на т.нар. динамичен съединител (при нисък съпротивителен момент) през режим на трансформация на въртящия момент до т.нар. „стопов” режим (двигателят се върти дори при блокиран изходен вал). Обобщената схема (фиг.1) на ИТВМ съдържа импулсен механизъм И (механична система с две степени на свобода

имаща ексцентрични товари 2), три вала (входен 1, междинен 3 и изходен с маховик 6) и два еднопосочни съединителя 4 и 5, известни още като съединители със свободен ход (4 отвежда отрицателния импулс на въртящ момент към корпус, а 5 предава положителния импулс към изходния вал 6).



Фиг. 1 Обобщена схема на ИТВМ.

Тези предавки обаче, все още не са получили широко разпространение, поради сравнително по-сложната теория за изучаване и изчисляване, както и проблеми свързани с надеждността на еднопосочните съединители.

Върху тези предавки усилено се работи в Русия и някои западни изследователски центрове [Lester W. T., 2012], но в България почти няма публикации по темата.

В [Алюков С.В., 2012] се формулират основните направления на изследователските търсения в областта на инерционните трансформатори на въртящ момент – усъвършенстване методите за изследване и за изчисление, разработване на нови конструкции на тези предавки, както и на нови високонадеждни конструкции еднопосочни съединители. В [Алюков С.В., 2012] се казва още, че въпреки несложната конструкция на тези предавки, движението им се описва със сложни системи нелинейни диференциални уравнения, недопускащи точни методи за решаването им. Променливата структура на тези предавки кара изследователите им да съставят системите от диференциални уравнения по участъци от цикъла им на работа [Леонов А.И., 1978]. На практика тези уравнения се решават с помощта на приближени числени методи по участъци, а след това решенията се „сшиват“ по границите на участъците.

Трудностите свързани с изчислението и математическо изследване на тези предавки са предпоставка да се търсят други методи за предварителна проектна инженерна оценка на работата им. Един от тези методи е използването на специализиран софтуер за компютърна симулация на динамиката за изследване параметрите на движението на механизмите.

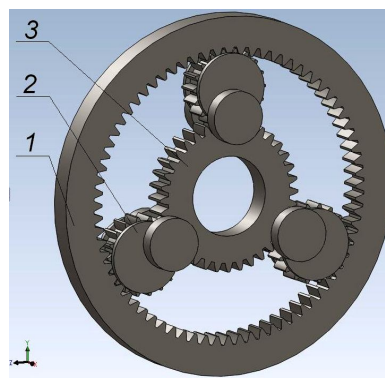
### Формулиране на проблема

Показателен режим на работа на този тип предавки е т.нар. „стопов“ режим, който се реализира при блокиран изходен вал 6 (виж фиг.1) и въртящ се входен вал 1. При този режим фактически е неподвижен и междинния вал 3, поради това че обратните импулси се спират през корпусния еднопосочен съединител 4 от корпуса, а правите - през изходния еднопосочен съединител 5 от блокирания изходен вал 6. Изследването на работата на механизма в този режим позволява сравнително лесно да се определят импулсите на въртящ момент идващи от импулсния механизъм и действащи на междинния вал. Съществува голямо разнообразие от импулсни механизми [Леонов А.И., 1978], но на схемата от фиг.1 е показан епициклически импулсен механизъм на Левин, при който входният вал 1 върти чрез вътрешно нарязан зъбен венец сателитите 2 имащи ексцентрично разположен център на масата в т.С. Инерционните сили от сателитите

създават знакопроменлив момент върху междинния вал 3 чрез зацепването си с централното зъбно колело, монтирано като едно цяло към вала 3. Определянето на характера на изменение (като амплитуда и честота) на този знакопроменлив момент е задача на тази работа.

### 3-D моделиране на предавката

Използва се софтуерния продукт за CAD проектиране SolidWorks. За целта, която е поставена тук, важните за моделиране на движението са елементите (фиг.2) - задвижващ зъбен венец 1, сателити 2 с ексцентрични маси и неподвижно зъбно колело 3 от междинния вал.



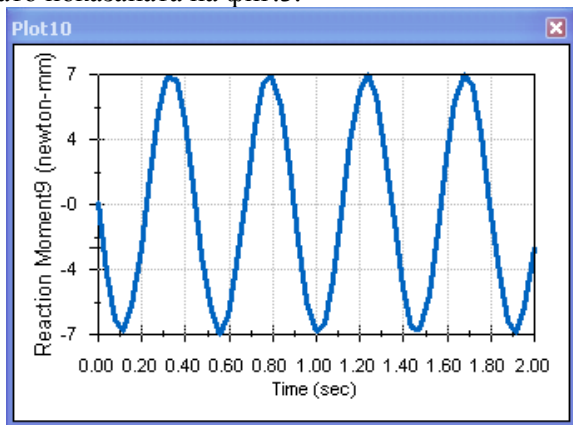
Фиг. 2 3-D модел на ВМИТ

Моделираните зъбни колела от фиг.2 са с модул  $m=1,5$  mm и брой на зъбите  $z_1 = 72$ ,  $z_2 = 18$  и  $z_3 = 36$ . Броят на сателитите най-често е 6, може да бъде и друг брой, но на фиг.2 са показани 3. Важни за симулацията и следващата проверка на верността са масовите характеристики на всеки от сателитите, които могат да се извлекат от меню **Tools**, инструмент **Mass Properties**. За този модел и стомана **AISI 4340 Steel** масата на сателитите се получава  $m = 0,081864$  kg, а ексцентрицитата на масовия център  $S$  спрямо оста на въртене  $C$  се получава  $h = 0,003615$  m. Симулирането на зъбните зацепвания става като в **Mate** на сглобения механизъм се избира **Mechanical Mates, Gear** между нарочно генерираните повърхности на делителните цилиндри съответно на зъбния венец 1 и един от сателитите 2 и между един от сателитите 2 и централното зъбно колело 3.

### Методика и резултати от динамичната симулация на механизма в CAD-средата

В средата на SolidWorks динамични симулации се извършват чрез модула **Dynamics Motions** (активен при избрано **Tools, Add-Ins, SolidWorks Motion, OK**), който се извиква чрез меню **Insert**, инструмент **New Motion Study**. В панела на **MotionManager**, който се появява отдолу на графичното поле се избира **Motion**

**Analysis** от падащия списък тип на изследването **Type of Study** Motion Analysis. От лентата с инструменти на **MotionManager** се избира **Motor** и в **PropertyManager** на този инструмент се избират ротационно движение, посочва се венца 1 за елемент въртян от мотора в **Motor Location**, посока на въртене в **Motor Direction**, в полето **Component to Move Relative to** се посочва корпусен детайл и за установен режим на движение се задава числената стойност на постоянната честота на въртене - примерно **Constant Speed** и **100 RPM**. След потвърждаване на зададените параметри на мотора, се натиска инструмента **Calculate** за извършване на необходимите изчисления на симулацията. Заедно с изчисленията едновременно върви и анимираното движение на механизма. След приключването на изчисленията, могат да визуализират резултатите с инструмента **Results and Plots**. След натискането на последния, в отворения негов **PropertyManager**, за визуализиране на реактивния момент от междинния вал се избира последователно **Forces**, **Reaction Moment**, компонента или модул на момента (в нашия случай това е **X Component**), наложена връзка или повърхност, върху която действа момента (при нас **GearMate2**), **Create a new plot**, и хоризонтална ос на графиката – време **Time**. След потвърждаване с **OK** се генерира графика като показаната на фиг.3.



**Фиг. 3** Изменение на реактивния момент от междинния вал във функция на времето.

### Проверка на резултатите

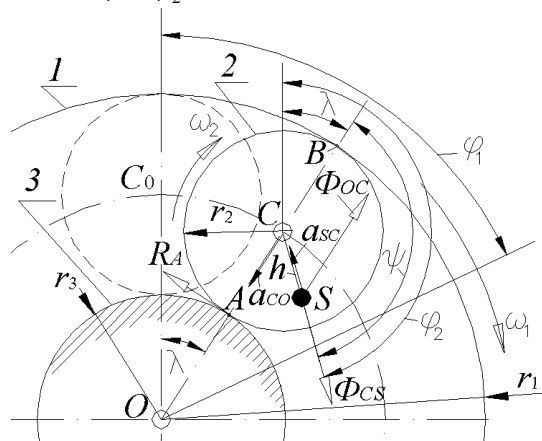
За да се потвърдят резултатите получени от симулацията се анализира кинетостатиката (динамичното равновесие) на един от сателитите 2 с ексцентрични маси в едно текущо състояние (фиг.4) и в установен режим, за да се определи стойността на реактивния момент, действащ откъм блокирания междинен вал 3. Нека началото на отчитане на движението да е когато

разглежданият сателит е заемал показаната с пунктир позиция с център на подвижната си ос в т.С<sub>0</sub> и с център на неуравновесените си маси (т.С) в най-горно положение. След завъртане на зъбния венец 1 на ъгъл φ<sub>1</sub>, сателитът се завърта на ъгъл φ<sub>2</sub>. В установен режим на работа, ъгловите ускорения на венца 1 и на сателитите 2 са равни на нула (ε<sub>1</sub>=0 и ε<sub>2</sub>=0), а ъгловите им скорости са постоянни (ω<sub>1</sub>=const и ω<sub>2</sub>=const). Затова липсват тангенциални ускорения, има само нормални. Ускорението на т.С ще е равно на векторната сума от двете нормални ускорения  $\vec{a}_{CO}^n$  и  $\vec{a}_{SC}^n$ :

$$\vec{a}_S = \vec{a}_{CO}^n + \vec{a}_{SC}^n$$

където  $\vec{a}_{CO}^n = (\omega_{CO})^2 \cdot (r_3 + r_2)$  и  $\vec{a}_{SC}^n = (\omega_2)^2 \cdot h$ .

Блокираният междинен вал 3 е неподвижен (ω<sub>3</sub>=0 и ε<sub>3</sub>=0). От фиг.4 се вижда, че ако означим с λ ъгъла на ъгъла на завъртане на ОС, то  $\psi = \varphi_2 - \lambda$ .



**Фиг. 4** Схема към кинетостатиката на сателит 2.

Съгласно принципа на кинетостатиката, при каквото и да е движение на материалния обект (тук - сателит 2), съвкупността от приложените активни сили, силите на връзките и инерционните сили образува уравновесена система от сили. За сателита 2 сили на връзките имаме в т.В и т.А (от силите на зацепването, като в т.В действа задвижващата сила) с техните радиална и тангенциална съставляващи, две съставляващи  $\vec{\Phi}_{OC}$  и  $\vec{\Phi}_{CS}$  на инерционната сила действаща в центъра на масите S, съответстващи на нормалните ускорения  $\vec{a}_{CO}^n$  и  $\vec{a}_{SC}^n$ , а силата на тежестта, както при симулацията, не я отчитаме. На фиг.5 са показани само силите имащи момент спрямо т.В, спрямо която се съставя уравнението на кинетостатиката:

$$\sum M_{iB} = \Phi_{OC} \cdot h \cdot \sin(\pi - \psi) + \Phi_{CS} \cdot r_2 \cdot \sin(\pi - \psi) - R_A \cdot 2 \cdot r_2 = 0$$

Откъдето за тангенциалната  $R_A$  съставляваща на силата на реакцията в т.А се получава:

$$R_A = \frac{m \cdot h}{2 \cdot r_2} \cdot \left( (r_3 + r_2) \cdot (\omega_{OC})^2 + r_2 \cdot (\omega_2)^2 \right) \sin \psi$$

Големината на тази сила се изменя по синусодален закон с изменението на ъгъла  $\psi$ , като максималната стойност е:

$$R_{A \max} = \frac{m \cdot h}{2 \cdot r_2} \cdot \left( (r_3 + r_2) \cdot (\omega_{OC})^2 + r_2 \cdot (\omega_2)^2 \right)$$

Реактивният момент, предизвикан от инерционните сили на всички  $n$  на брой сателити 2 с ексцентрична маса, действащ откъм неподвижния междинен вал ще има максимална (амплитудна) стойност  $M_{R \max} = R_{A \max} \cdot r_3 \cdot n$ :

$$M_{R \max} = \frac{m \cdot h \cdot r_3 \cdot n}{2 \cdot r_2} \cdot \left( (r_3 + r_2) \cdot (\omega_{OC})^2 + r_2 \cdot (\omega_2)^2 \right)$$

Като се вземе предвид, че  $v_B = 2 \cdot r_2 \cdot \omega_2 = r_1 \cdot \omega_1$  и  $v_C = r_2 \cdot \omega_2 = (r_3 + r_2) \cdot \omega_{OC}$  ъгловите скорости  $\omega_2$  и  $\omega_{OC}$  могат да се изразят чрез входната ъглова скорост  $\omega_1$ :

$$\omega_2 = \frac{r_1}{2 \cdot r_2} \cdot \omega_1 \text{ и } \omega_{OC} = \frac{r_2}{(r_3 + r_2)} \cdot \omega_2 = \frac{r_1}{2 \cdot (r_3 + r_2)} \cdot \omega_1$$

Тогава за амплитудната стойност на реактивния момент  $M_{R \max}$  като функция на входната ъглова скорост се получава:

$$M_{R \max} = \frac{m \cdot h \cdot r_3 \cdot n}{8} \cdot \left( \frac{2 \cdot r_2 + r_3}{r_2 + r_3} \right) \cdot \left( \frac{r_1 \cdot \omega_1}{r_2} \right)^2$$

Като се заместят стойностите на параметрите от горната формула със стойностите на същите параметри на 3-D модела на предавката както следва:  $m = 0,081864 \text{ kg}$ ,  $h = 0,003615 \text{ m}$ ,  $n = 3$ ,  $r_1 = 0,054 \text{ m}$ ,  $r_2 = 0,0135 \text{ m}$ ,  $r_3 = 0,027 \text{ m}$  и като се изменя честотата на въртене

на входния вал се потвърждава верността на резултатите получени от 3-D симулацията – виж таблица 1.

Таблица 1

$n_1$ [об/мин]	50	100	150	200	250
$M_{R \max}$ [N.mm], симулация	1,75	7,00	15,69	27,87	43,15
$M_{R \max}$ [N.mm], аналитично	1,75	7,01	15,77	28,04	43,81

## Изводи

Изложеното по-горе показва, че за нуждите на инженерната практика, както и за изследователски нужди, може успешно да се прилага компютърна симулация на движението и на сравнително сложни механични системи с променлива структура, каквито са инерционните трансформатори на въртящ момент. За пълна симулация на работата на такива предавки в режим на трансформация на момента е необходимо да се реши въпроса за симулиране работата на еднопосочния съединител. Винаги трябва да се търсят начини получените резултати от симулацията да се потвърдят и чрез други средства – изчисление и експеримент.

## ЛИТЕРАТУРА

Алюков С.В. Перспективные направления создания инерционных бесступенчатых передач повышенной надежности. Материалы VII Международной научно-практической конференции «Ключевые проблемы современной науки», 17 – 25 апреля, 2012, София, «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2012. Том 31, С. 71 – 75.

Леонов А.И. Инерционные автоматические трансформаторы вращающего момента. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.

Lester W. T., Infinitely Variable Transmission Utilizing Oscillating Torque, <http://ebookbrowse.com/infinitely-variable-transmission-utilizing-oscillating-torque-doc-d420263879>

## CAD-SIMULATION MODELING OF INERTIA TRANSFORMER OF TORQUE UNDER BLOCKED OUTPUT SHAFT

Dimitar Petrov, Valeri Bakardjiev

### Resume

*In the introduction is given a summary scheme, the principle of operation of mechanical inertial transformers of torque as well as their advantages, disadvantages and potential directions for development and research. The build of three-dimensional model of inertial transformer of torque using CAD-software is briefly described. A brief overview of the methodology of the simulation of the movement of the gear under blocked output shaft and its results are given. The simulation results are compared with the analytically obtained results. Some conclusions are also given.*