



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ**

**КАТЕДРА “МАШИНОСТРОЕНЕ И
УРЕДОСТРОЕНЕ”**

маг. инж. Валери Йорданов Бакърджиев

**Изследване на инерционен трансформатор на
въртящ момент**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен
“ДОКТОР”

Научна област 5. Технически науки
Професионално направление 5.1 Машинно инженерство
Специалност “Машинознание и машинни елементи”

Научен ръководител:
доц. д-р инж. Димитър Гогов Петров

ПЛОВДИВ 2016



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ**

**КАТЕДРА “МАШИНОСТРОЕНЕ И
УРЕДОСТРОЕНЕ”**

маг. инж. Валери Йорданов Бакърджиев

**Изследване на инерционен трансформатор на
въртящ момент**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на образователна и научна степен
“ДОКТОР”

Научна област 5. Технически науки
Професионално направление 5.1 Машинно инженерство
Специалност “Машинознание и машинни елементи”

Научен ръководител:
доц. д-р инж. Димитър Гогов Петров

Рецензенти:
проф. д-р инж. Любомир Ванков Димитров
проф. д-р инж. Йордан Тодоров Максимов

ПЛОВДИВ 2016

Дисертационният труд съдържа 158 страници, от които 130 стр. основен текст, 5 стр. увод, 2 стр. означения, 4 стр. съдържание, 5 стр. литература, 4 стр. приложения. Основният текст е оформен в 5 глави и има 99 фигури и 14 таблици. Използваните литературни източници са 103, от които 45 на кирилица и 58 на латиница.

Дисертантът е разработил дисертационния труд като редовен докторант към катедра “Машиностроене и уредостроене“ на Технически университет – София, филиал Пловдив с помощта на докторантски проект към ТУ – София на тема “Изследване на инерционен трансформатор на въртящ момент“, договор № **142ПД0006-24.**

Дисертационният труд е обсъден на катедрен съвет на катедра “МУ“ на Технически университет – София, филиал Пловдив на 13.06.2016 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 28.10.2016 г. от 15.00 часа в зала 4425 на ТУ – София, филиал Пловдив на заседание на научното жури.

Материалите са на разположение на интересуващите се във факултетната канцелария на ФМУ.

Тираж 30 бр.

Отпечатан в Офис Глобал България ООД.

I. Обща характеристика на дисертационния труд

i. Актуалност на изследвания проблем

След анализиране на съществуващите конструкции на инерционни трансформатори на въртящ момент могат да се направят следните изводи:

- Направен е критичен анализ на съществуващите конструкции на инерционни трансформатори на въртящ момент, като са изтъкнати предимствата и недостатъците на всяка конструкция.
- Съществува необходимост от създаване на кратка методика за изчисление на основните конструктивни параметри на инерционния трансформатор на въртящ момент.
- Съществува необходимост от създаване на инерционен трансформатор с малък габарит и технологична конструкция с използването на стандартизирани еднопосочни съединители и повишаване на тяхната надеждност.
- С цел изследване на влиянието на различните конструктивни фактори върху движението на ИТВМ, възниква необходимостта от конструкция с възможност за промяна на масата на неуравновесените тежести, както и позицията на техния масов център.

ii. Цел и задачи на дисертационния труд

Във връзка с направените изводи от глава първа, може да се постави следната цел на настоящата работа:

Да се разработи алгоритъм за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.

Целта ще бъде постигната с решаването на следните основни задачи:

- Да се разработи софтуер за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ по разработения алгоритъм.
- Чрез компютърна симулация на движението на импулсния механизъм при стопов режим (при блокиран изходен вал) да се провери достоверността на алгоритъма за изчисление.

- Да се конструира и изгради експериментален стенд за изпитания на малогабаритни ИТВМ с цел експериментална проверка на предложения алгоритъм.
- Към експерименталния стенд да се проектира, да се монтира и състави софтуер за система за събиране на данни в реално време.
- Да се изработи прототип на ИТВМ с възможност за промяна на масата на неуравновесените тежести, както и позицията на техния масов център с използването на стандартизирани еднопосочни съединители.
- Да се изследва експериментално влиянието на конструктивните параметри m , h и p върху предавателните отношения и коефициента на полезно действие.

iii. Обект, предмет и място на изследване

Обектът на изследване в дисертационния труд е проектираният и изработен прототип на инерционен трансформатор на въртящ момент с импулсен механизъм на Левин и изпълнен по схемата с два еднопосочни съединителя.

Предмет на това изследване са:

- обратното кинематично предавателно отношение i_K
- моментносиловото предавателно отношение i_M
- коефициент на полезно действие η

Място на изследванията по дисертационния труд: лаборатория по „Машинни елементи“ 3117 към катедра МУ на ФМУ при ТУ София-филиал Пловдив, производствената база на фирма “Хлебмаш“ ООД, гр. Пазарджик.

iv. Методи на изследване

Методиката на изследванията в дисертационния труд включва:

- Механо-математично моделиране на кинематиката на ИТВМ.
- CAD/CAE симулационно моделиране на динамиката на инерционен трансформатор на въртящ момент при блокиран изходен вал.
- Експериментално изследване на влиянието на броя на звената с тежести върху работата на импулсния механизъм.

- Експериментално изследване на влиянието на масата на звената с тежести върху работата на импулсния механизъм.
- Експериментално изследване на влиянието на разстоянието h между масовия център S на сателитното зъбно колело и оста му B на въртене на звената с тежести върху работата на импулсния механизъм.

v. Научна новост на получените резултати

- Разработен е алгоритъм за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.
- В средата на AutoDesk Inventor е съставена методика за динамичната симулация на импулсен механизъм на Левин в „стопов режим“.
- Експериментално са изследвани зависимостите на изменение на обратното кинематично предавателно отношение, на моментносиловото предавателно отношение и на коефициента на полезно действие от изменението на съпротивителния момент, действащ върху изходния вал на ИТВМ.

vi. Практическа полезност и приложимост

- Съставен е софтуер в среда C# за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.
- Конструиран е и е изработен стенд за изпитване на механични предавки, който е оборудван със съвременна специализирана измервателна апаратура.
- Съставен е софтуер в средата на XSCADA за събиране на данни от експеримента и програма за управление на стенда.
- Конструиран е и е изработен прототип на ИТВМ с използването на стандартизирани ролково-фрикционни едноръчни съединители. Конструкцията на импулсния механизъм позволява промяна на масата на неуравновесените тежести, както и позицията на техния масов център.

vii. Реализация на резултатите

Разработената методика за проектиране на ИТВМ, стендовете за изпитване, както и основни резултати от дисертационния труд ще бъдат внедрени в учебния процес в бакалавърския и магистърския курс на специалностите „МУ“ и „Мехатроника“.

viii. Аprobация на резултатите

Основни части от дисертационния труд са представени в пет публикации, три от които в съавторство и две самостоятелни. Списък на публикациите е приложен в края на автореферата. Цялостно, дисертационната работа е докладвана пред катедрен съвет на катедра МУ при ТУ София, филиал Пловдив, състоял се на 13.06.2016г.

ix. Структура на дисертацията

Дисертационният труд се състои от увод, означения, пет глави, заключение (приноси) и е с обем от 158 страници съдържащи текст, 99 фигури, 14 таблици, списък със 103 цитирани литературни източници, от които 45 на кирилица и 58 на латиница.

Забележка!

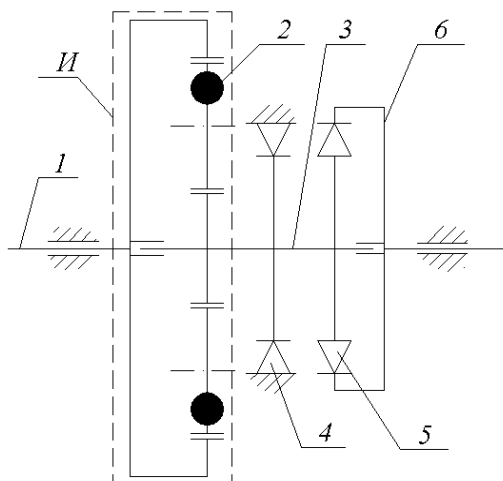
Номерата на отделните глави, фигури и формули съответстват на тези в дисертацията.

II. Основно съдържание на дисертационния труд

ГЛАВА ПЪРВА: ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР НА ИНЕРЦИОННИ ТРАНСФОРМАТОРИ НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ.

В първа глава на дисертацията бе направен критичен анализ на съществуващи конструкции на инерционни трансформатори на въртящ момент (ИТВМ). В анализа бе показано, че през годините работата по изследването на инерционни трансформатори на въртящ момент се явява актуална. Съществуват доста научни трудове, насочени към изследване на динамиката на ИТВМ, но липсват инженерно ориентирани методики за изчисление на основните конструктивни параметри. Работата бе насочена основно към подобряване на неговата надеждност чрез намаляване на динамичното натоварване в импулсния механизъм (ИМ) и еднопосочните съединители (ЕС).

На фиг. 1.1 е показана обобщената схема на ИТВМ, който се състои от импулсен механизъм, входящ маховик 1, междинен вал, наричан още реактор 3, два еднопосочни съединителя 4 и 5 и изходящ маховик 6. ИМ представлява механична система с две степени на свобода, която включва входния маховик 1, звена с неуравновесени товари, наричани звена с тежести 2 и реактор 3.



Фиг. 1.1 Обобщена схема на ИТВМ

Най-изучаваната схема днес е обобщената схема на фиг.1.1 с два еднопосочни съединителя и без използването на еластични елементи. Еластичният модел е схема, при която се използват еластични елементи, монтирани към ЕС. Въпреки това тя не се е наложила поради по-сложната динамика и свързаните с това теоретични и експериментални изследвания. Изследванията в тази дисертация са насочени към ИТВМ за предаване на ниски мощности, компактна конструкция, стандартни ролково-фрикционни еднопосочни съединители с цел повишаване на надеждността, лесната и евтина поддръжка.

1.4. Изводи:

След анализиране на съществуващите конструкции на инерционни трансформатори на въртящ момент могат да се направят следните изводи:

1. Направен е критичен анализ на съществуващите конструкции на инерционни трансформатори на въртящ момент, като са изтъкнати предимствата и недостатъците на всяка конструкция.

2. Съществува необходимост от създаване на кратка методика за изчисление на основните конструктивни параметри на инерционния трансформатор на въртящ момент.
3. Съществува необходимост от създаване на инерционен трансформатор с малък габарит и технологична конструкция с използването на стандартизирани еднопосочни съединители и повишаване на тяхната надеждност.
4. С цел изследване на влиянието на различните конструктивни фактори върху движението на ИТВМ, възниква необходимостта от конструкция с възможност за промяна на масата на неуравновесените тежести, както и позицията на техния масов център.

ГЛАВА ВТОРА: МЕХАНО-МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА ИНЕРЦИОНЕН ТРАНСФОРМАТОР НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ.

2.1. Избор на конструкция на ИТВМ.

В първа глава бе изяснено, че ИМ с предавателно число на импулсния механизъм $\psi' = \text{const}$ са за предпочитане пред такива с $\psi' \neq \text{const}$, с цел да се намали неравномерното движение на входния маховик и натоварването му. Най-перспективен се явява импулсният механизъм на Левин. При него липсват лагери и звената с тежести са фиксирани радиално и аксиално чрез опорни пръстени и това позволява висока надеждност на механизма и ниски натоварвания, позволява и широк избор на параметрите на механизма a , b и q . Реципрочната стойност на предавателното отношение варира в интервала от 0 до 1. Импулсният механизъм има компактни размери. Импулсният механизъм на Левин се среща най-често в конструкции на инерционни трансформатори на въртящ момент. В конструкцията бяха използвани ролково-фрикционни еднопосочни съединители, заради тяхната компактност и сравнително висока честота на работа и висок предаван въртящ момент. За облекчаване на съставянето на математическия модел тук се приема, че всички части на ИТВМ са абсолютно твърди и не се използват еластични елементи.

2.1.1 Принцип на работа на ИТВМ.

Изясняването на принципа на работа на ИТВМ става чрез фиг. 1.1. Пълният цикъл на работа на импулсния механизъм в съвкупност с движението на реакторния вал 3 се състои от четири такта:

I - ви такт – **Ускоряване на реактора.** От положение на спрял реактор 3 ускоряване на реактора до скоростта на въртене на изходния маховик 6. Този такт започва с действието на правия импулс, предизвикан от инерционните сили в ИМ. Този такт приключва, когато ъгловата скорост на реактора се изравни с ъгловата скорост на изходния маховик. В този момент се включва изходния еднотактен съединител 5.

II-ри такт – **Съвместно движение на реактора и изходния маховик.** При този такт ъгловата скорост на реактор 3 и изходния маховик 6 е вече изравнена. Изходният ЕС 5 е включен и въртящият момент, предизвикан от правия импулс, се предава на изходния маховик. Съвместното движение на реактора и изходния маховик продължава докато е налице действието на правия импулс и приключва при възникването на обратния импулс.

III-ти такт – **Забавяне на движението на реактора.** В такта на забавяне на въртенето на реактор 3, изходният ЕС 5 се е изключил, като корпусният ЕС 4 също е изключен. Реакторът започва да забавя своето движение под действието на обратния импулс. Този такт продължава докато ъгловата скорост на реактора достигне нула (с тенденция да смени посоката си) и се включи корпусния ЕС 4.

IV-ти такт – **Спрял реактор.** При този такт действието на обратния импулс чрез корпусния ЕС 4 се предава на корпуса на ИТВМ

Характерно за ИТВМ е наличието на три режима на работа:

Режим на динамичен съединител – характерно за този режим е, че ъгловата скорост на входа е равна на ъгловата скорост на изхода на ИТВМ. Предавката работи в този режим, когато няма или има нищожен съпротивителен момент на изходния вал.

Стопов режим на ИТВМ – характерно за този режим е, че се проявява, когато поради някаква причина изходният вал на ИТВМ е блокиран, а двигателят, който го задвижва, запазва своята ъглова скорост.

Режим на трансформация на въртящ момент – това е основният режим на работа на ИТВМ и се характеризира с промяна на предавателното отношение в зависимост от приложения на изхода му съпротивителен момент.

2.1.2. Математически модел на ИТВМ.

Движението на гореописания инерционен трансформатор на въртящ момент бе моделирано с математичен модел във вид на системи от обикновени диференциални уравнения.

Във всеки един от гореописаните четири такта на цикличното му движение ИТВМ представлява механична система с холономни стационарни връзки, поради което кинетичната енергия ще бъде еднородна квадратична функция на обобщените скорости. Изразът за кинетичната енергия на ИТВМ реализиран с импулсен механизъм на Левин е:

$$T = \frac{1}{2}(J_1\dot{\alpha}^2 + J_2\dot{\beta}^2 + nmv_s^2 + nJ_s\dot{\phi}^2) + \frac{1}{2}J_3\dot{\gamma}^2 \quad (2.8)$$

Където $J_s = J_B - mh^2$ е масовият инерционен момент на звеното с ексцентрични тежести спрямо масовия му център S, J_1 , J_2 и J_3 са масовите инерционни моменти на входния маховик, реактора и изходния маховик. Броят на звената с тежести е означен с n , а масата на звеното с тежести с m . Кинетичната енергия представлява квадратична функция на обобщените скорости $\dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\gamma}$.

За всеки един отделен такт (участък) се съставя система от диференциални уравнения, описваща движението на инерционния трансформатор. За целта бяха приложени диференциални уравнения на Лагранж от втори род (T е изразът на пълната кинетична енергия на инерционния трансформатор на въртящ момент, q_s е s-тата обобщена координата, а Q_s е s-тата обобщена сила):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s \quad (s = 1, 2, \dots, n) \quad (2.16)$$

Тук за обобщени координати се използват α, β, γ – това са съответно ъглите на завъртане на входния вал с маховик, на реактора и на изходния вал с маховик.

Системата от диференциални уравнения описващи движението на инерционния трансформатор на въртящ момент (тук той е механична система с три степени на свобода по обобщените координати α, β и γ) през първия такт е:

$$\begin{cases} A_1\ddot{\alpha} + A_2\ddot{\beta} + A_4(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6\dot{\beta}^2 = M_d; \\ A_2\ddot{\alpha} + A_3\ddot{\beta} + A_5(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6\dot{\alpha}^2 = 0; \\ J_3\ddot{\gamma} = -M_c \end{cases} \quad (2.18)$$

където A_4, A_5, A_6 са функции на обобщените координати α и β .

През втория такт инерционният трансформатор на въртящ момент като механична система има две степени на свобода (по обобщените координати α и β) по време на този такт. При записа на уравнението на Лагранж се получава система от две диференциални уравнения за обобщените координати α и β :

$$\begin{cases} A_1\ddot{\alpha} + A_2\ddot{\beta} + A_4(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 + A_6\dot{\beta}^2 = M_d; \\ A_2\ddot{\alpha} + (A_3 + J_3)\ddot{\beta} + A_5(\dot{\alpha} - \dot{\beta})^2 - A_6\dot{\beta}^2 = -M_c; \end{cases} \quad (2.22)$$

През такта на забавяне на движението на реактора изходният еднопосочен съединител е изключен (освободен). Реакторът и изходният маховик се движат независимо един от друг, както при първия такт. Действащите върху трите независимо движещи се елемента поотделно обобщени сили също не се изменят. Следователно диференциалните уравнения за движението на елементите на ИТВМ през този такт (участък) са същите както в (2.18), променят се само началните условия.

През такта на спрял реактор, корпусният еднопосочен съединител се включва и реакторът стои неподвижен. Изходният еднопосочен съединител не е включен, а входният и изходният маховик се движат независимо един от друг. През този такт (участък) скоростта на реактора е равна на нула $\dot{\beta} = 0$.

Инерционният трансформатор на въртящ момент има две степени на свобода през този такт. При записа на уравнението на Лагранж се получава система от две диференциални уравнения с обобщени координати α и γ :

$$\begin{cases} A_1\ddot{\alpha} + A_4\dot{\alpha}^2 = M_d; \\ J_3\ddot{\gamma} = -M_c \end{cases} \quad (2.25)$$

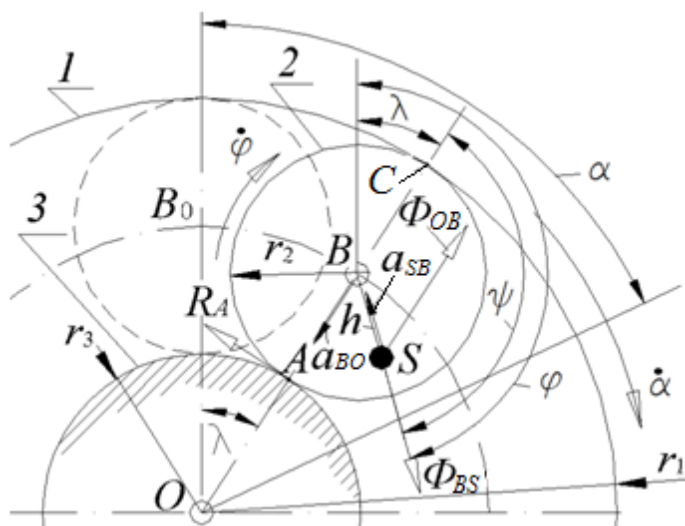
2.1.3. Алгоритъм за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.

На база извършено литературно проучване бе съставена последователността на предварителните конструктивни изчисления при следните входни параметри: r_1 , ω_1 и M_C (виж фиг. 2.5), където:

r_1 - радиус на зъбния венец на импулсния механизъм (габарито-определящ размер на предавката), m

ω_1 - номинална ъглова скорост на задвижващия електрически двигател, rad/s

M_C - максимален въртящ момент на изходният маховик, Nm



Фиг. 2.5 Схема към кинестатиката на звено с тежести

Първо се избира коефициента на цикличност q на импулсния механизъм или се изчислява по формула 2.26. Препоръчителните стойности за епицикличните импулсни механизми (каквото е импулсният механизъм на Левин) са между 1 и 1,5.

$$q_{\text{изч.}} = r_1 \cdot \frac{(r_1 + 2 \cdot r_2)}{2 \cdot r_2 \cdot (r_1 + r_2)} \quad (2.26)$$

След това се изчислява приблизителния радиус на сателитните зъбни колела:

$$r_2 = \frac{r_1}{1 + q + \sqrt[3]{1 + q^2}} \quad (2.27)$$

На следваща стъпка се изчислява радиуса на централното зъбно колело:

$$r_3 = r_1 - 2 \cdot r_2 \quad (2.28)$$

Разстоянието между оста на сателита и центъра на централното зъбно колело е:

$$e = OB = r_3 + r_2 \quad (2.29)$$

Препоръчителната стойност на разстоянието между масовия център S на сателитното зъбно колело и оста му B на въртене трябва да бъде:

$$h = BS = 0,1.e \quad (2.30)$$

По-нататък се изчисляват коефициентите a и b на импулсния механизъм. Те свързват линейната скорост на оста на сателитните зъбни колела с ъгловата скорост на зъбния венец 1 и на централното зъбно колело 3 посредством формулата:

$$v_c = e.\dot{\lambda} = a.\dot{\alpha} + b.\dot{\gamma} = a.\omega_1 + b.\omega_3 \quad (2.31)$$

За инерционен трансформатор на въртящ момент по схемата на Левин тези коефициенти се изчисляват както следва:

$$a = r_2 + \frac{r_3}{2} \quad (2.32)$$

$$b = \frac{r_3}{2} \quad (2.33)$$

На база на условието „за съседство“ на сателитните зъбни колела следва да бъде изпълнено неравенството:

$$n \leq n_{\max} = \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{r_2}{e}\right)} \quad (2.34)$$

Масата на всеки сателит се изчислява въз основа на условието за преодоляване на максималния съпротивителен момент на изхода:

$$m = \left[\frac{\pi \cdot M_c}{n.e.h.q.(\omega_1)^2 \cdot \left[1 - \frac{b}{e} \cdot \left(\frac{b}{e} - q \right) \right]} \right] \quad (2.35)$$

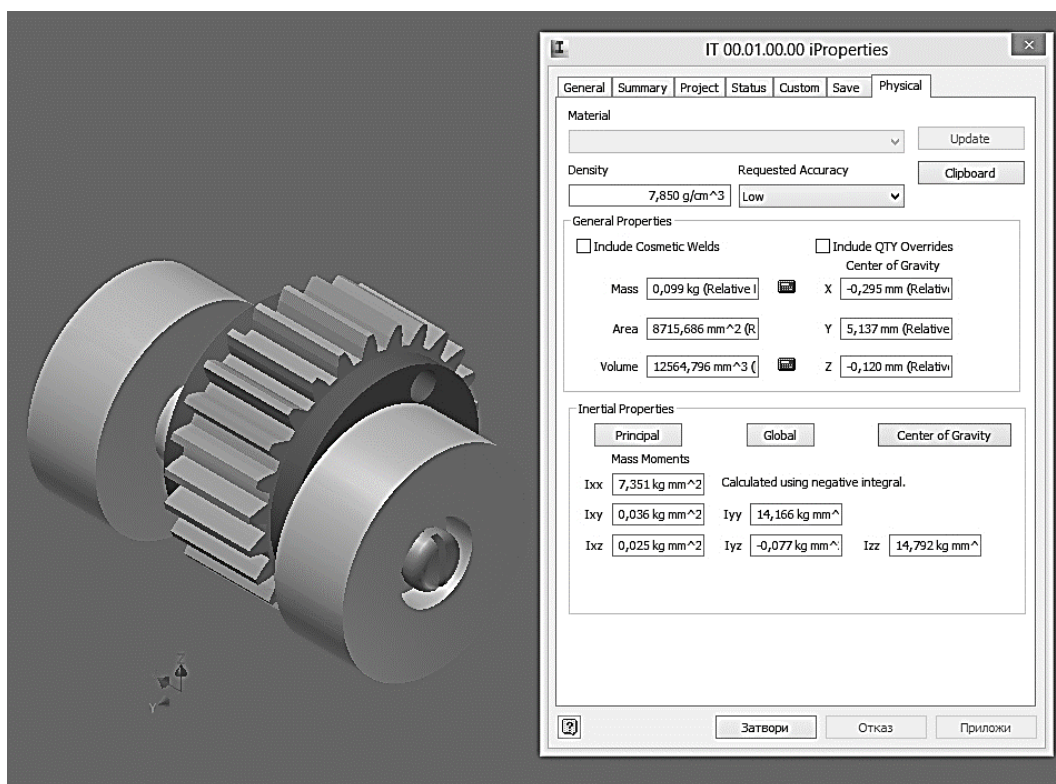
Въз основа на приблизителните изчисления или на 3D модела на сателитното зъбно колело е възможно да се определи масата и масовия инерционния момент J_B спрямо оста на въртене на сателитното колело (фиг. 2.6). Ако не се разполага с 3D модел, то масовият инерционен момент J_B спрямо оста на въртене на сателитното

колело може да се изчисли като се използва втората теорема на Хюйгенс-Щайнер за определяне на масов инерционен момент на тяло спрямо ос не минаваща през масовия му център:

$$J_B = J_S + mh^2 \quad (2.36)$$

Където J_S е масовият инерционен момент на звеното с тежести спрямо ос, минаваща през масовия му център S и успоредна на оста му на въртене. За избраната тук конструкция (фиг. 2.6) една приблизителна оценка на J_S може да се даде със следната формула:

$$J_S = m \cdot \frac{(0,8 \cdot r_2)^2}{2} \quad (2.37)$$



Фиг. 2.6 Масови свойства на 3D-модел на небалансирано сателитно зъбно колело

Чрез следващия израз се изчислява масовият инерционен момент на междинния вал (позиция 3 от фигура 1.1), необходим за излизане в т.нар. режим на „динамичен съединител“:

$$J_2 = 4 \cdot n \cdot m \cdot e \cdot h - n \cdot m \cdot b^2 - n \cdot J_B \cdot \left(\frac{b}{e} - q \right)^2 - 2 \cdot n \cdot m \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{b}{e} - q \right), \text{ kg.m}^2 \quad (2.38)$$

За да се изчисли стойността на максималното предавателно отношение на конкретния ИТВМ се използва следната формула:

$$u_{max} = 1 - \left| \sqrt{\frac{J_{2p} - J_2}{Z}} \right| \quad (2.39)$$

Където J_{2p} е действителната (реализираната) стойност на масовия инерционен момент на междинния вал (реактора). Препоръчителната стойност (с цел постигане на режим близък до този на т.нар. „динамичен съединител”) на масовия инерционен момент на междинния вал може да се даде в приблизителните граници:

$$J_{2p} = (0.95 \div 1.05) \cdot J_2, \text{ kg.m}^2 \quad (2.40)$$

А знаменателят на дробта под радикала се намира по формулата:

$$Z = J_2 + n.m.b^2 + \left(\frac{b}{e} - q \right)^2 \cdot nJ_B - 2.n.m.b.h.\left(\frac{b}{e} - q \right), \text{ kg.m}^2 \quad (2.41)$$

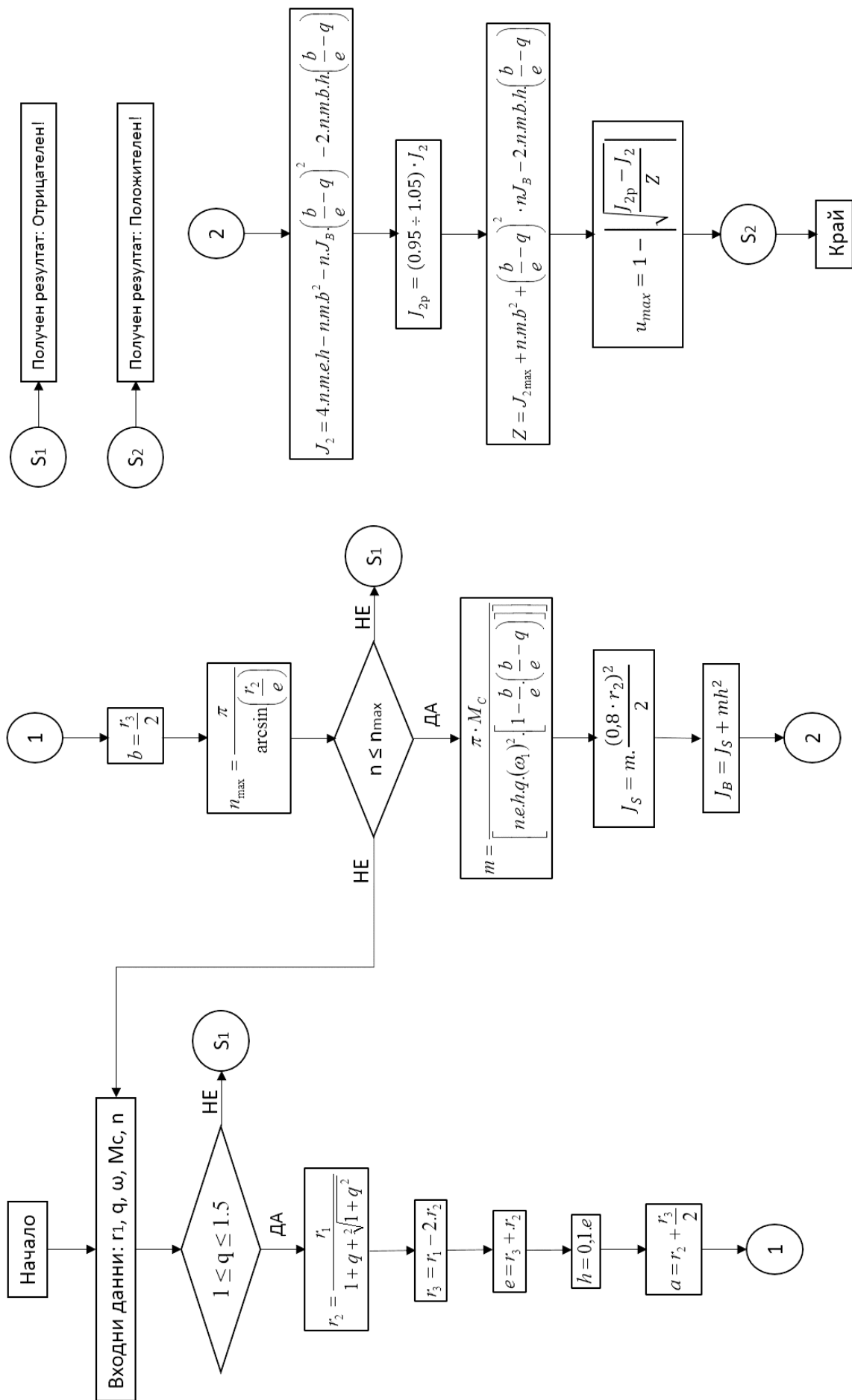
Блокова схема на алгоритъма е показана на фигура 2.8 и е разработена програма за облекчено пресмятане на основните конструктивни параметри на ИТВМ в програмна среда на C# (C Sharp).

2.1.4. Проверка на предварителните изчисления на ИТВМ чрез съставяне на математически модел.

Чрез програма за изчисление в средата Mathcad числено бяха решени системите от диференциалните уравнения и бяха получени съответстващите стойности на въртящия момент на електродвигателя $M_d=0,85\text{Nm}$ и максималният съпротивителен момент $M_C=17,9\text{Nm}$.

2.3. Изводи

1. Разработен е алгоритъм за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.
2. Разработен е софтуер в средата C# за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.
3. Чрез софтуерни инструменти е построена работната характеристика на ИТВМ и е потвърден алгоритъма за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.



Фиг. 2.8 Алгоритъм за изчисление на основните параметри на ИТВМ.

ГЛАВА ТРЕТА: CAD/CAE СИМУЛАЦИОННО МОДЕЛИРАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА ИНЕРЦИОНЕН ТРАНСФОРМАТОР НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ ПРИ БЛОКИРАН ИЗХОДЕН ВАЛ

3.1. Динамична симулация на 3D модел на ИТВМ.

Направени бяха моделиране и динамични симулации на изследвания избран импулсен механизъм по схемата на Левин в средата на софтуерните продукти SolidWorks и Autodesk Inventor. В дисертацията бяха представени методологията, последователността на работа, резултатите и верификацията на симулационните изследвания в средата на продукта Autodesk Inventor.

3.2. Проверка на получените от моделните изследвания.

За да се потвърдят резултатите, получени от симулацията, се анализира кинетостатиката (динамичното равновесие) на един от сателитите с неуравновесени товари 2 в едно текущо състояние (фиг. 2.5) в установен режим, за да се определи стойността на реактивния момент, действащ върху блокирания междинен вал 3.

За сателит 2 (виж фиг. 2.5) сили на връзките им в точка С и точка А (от силите на зацепването, като в точка С действа задвижващата сила) с техните радиална и тангенциална съставляващи, две съставляващи $\vec{\Phi}_{OB}$ и $\vec{\Phi}_{BS}$ на инерционната сила, действаща в центъра на масите S, съответстващи на нормалните ускорения $\vec{a}_{BO}^n$ и $\vec{a}_{SB}^n$, а силата на тежестта, както при симулацията, не я отчитаме. На фиг. 2.5 са показани само силите, имащи момент спрямо точка С, спрямо която се съставя уравнението на кинетостатиката:

$$\sum M_{iC} = \Phi_{BO} \cdot h \cdot \sin \psi + \Phi_{SB} \cdot r_2 \cdot \sin(\pi - \psi) - R_A \cdot 2 \cdot r_2 = 0 \quad (3.1)$$

Откъдето за тангенциалната R_A , съставляваща на силата на реакцията на точка А се получава:

$$R_A = \frac{m \cdot h}{2 \cdot r_2} \cdot \left((r_3 + r_2) (\omega_{BO})^2 + r_2 \cdot (\omega_2)^2 \right) \cdot \sin \psi \quad (3.2)$$

Големината на тази сила се изменя по синусоидален закон с изменението на ъгъла ψ , като максималната стойност е:

$$R_{Amax} = \frac{m \cdot h}{2 \cdot r_2} \cdot ((r_3 + r_2) \cdot (\omega_{BO})^2 + r_2 \cdot (\omega_2)^2) \quad (3.3)$$

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 $M_{Rmax} = R_{Amax} \cdot r_3 \cdot n$:

$$M_{Rmax} = \frac{m \cdot h \cdot r_3 \cdot n}{2 \cdot r_2} \cdot ((r_3 + r_2) \cdot (\omega_{BO})^2 + r_2 \cdot (\omega_2)^2) \quad (3.4)$$

Като се вземе предвид, че $v_B = 2 \cdot r_2 \cdot \omega_2 = r_1 \cdot \omega_1$ и $v_C = r_2 \cdot \omega_2 = (r_3 + r_2) \cdot \omega_{BO}$ ъгловите скорости ω_2 и ω_{BO} могат да се изразят чрез входната ъглова скорост ω_1 :

$$\omega_2 = \dot{\varphi} = \frac{r_1}{2 \cdot r_2} \cdot \omega_1 \quad \text{и} \quad \omega_{OC} = \dot{\lambda} = \frac{r_2}{(r_3 + r_2)} \cdot \omega_2 = \frac{r_1}{2 \cdot (r_3 + r_2)} \cdot \omega_1 \quad (3.5)$$

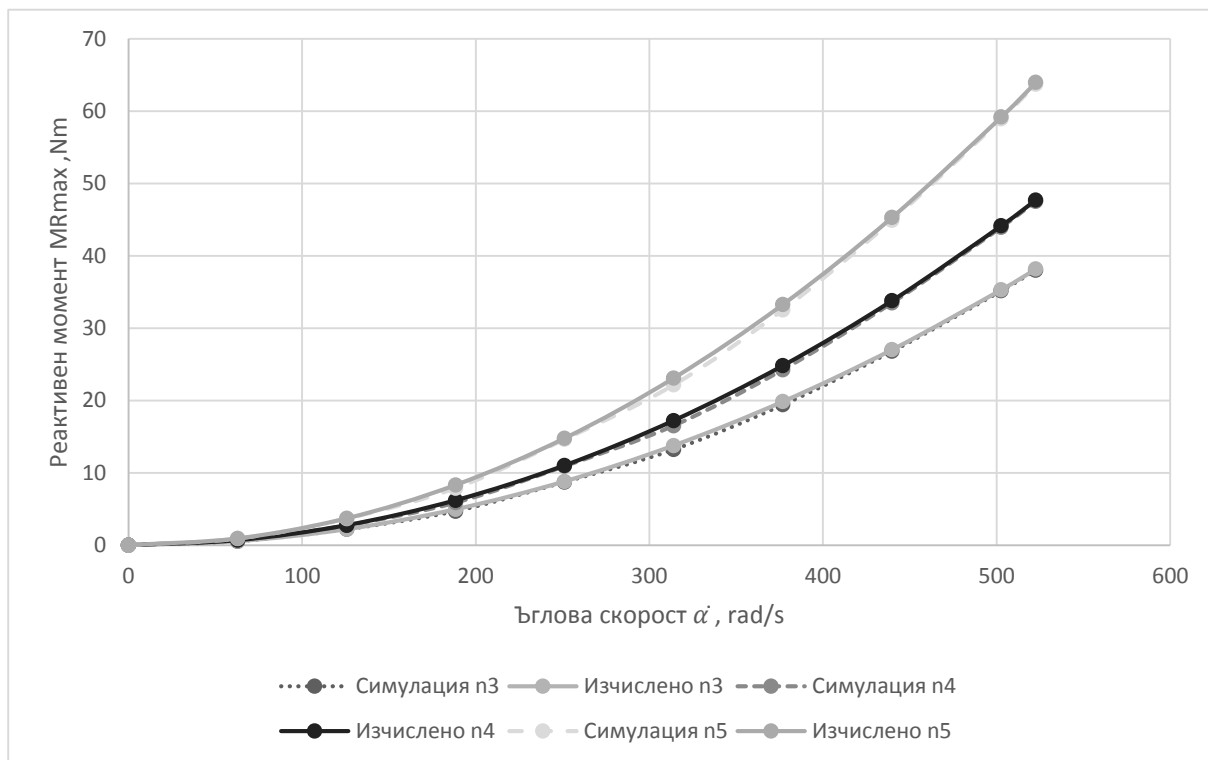
Тогава за амплитудната стойност на реактивния момент M_{Rmax} като функция на входната ъглова скорост се получава:

$$M_{Rmax} = \frac{m \cdot h \cdot r_3 \cdot n}{8} \cdot \left(\frac{2 \cdot r_2 + r_3}{r_2 + r_3} \right) \cdot \left(\frac{r_1 \cdot \omega_1}{r_2} \right)^2 = \frac{m \cdot h \cdot r_3 \cdot n}{8} \cdot \left(\frac{2 \cdot r_2 + r_3}{r_2 + r_3} \right) \cdot \left(\frac{r_1 \cdot \dot{\alpha}}{r_2} \right)^2 \quad (3.6)$$

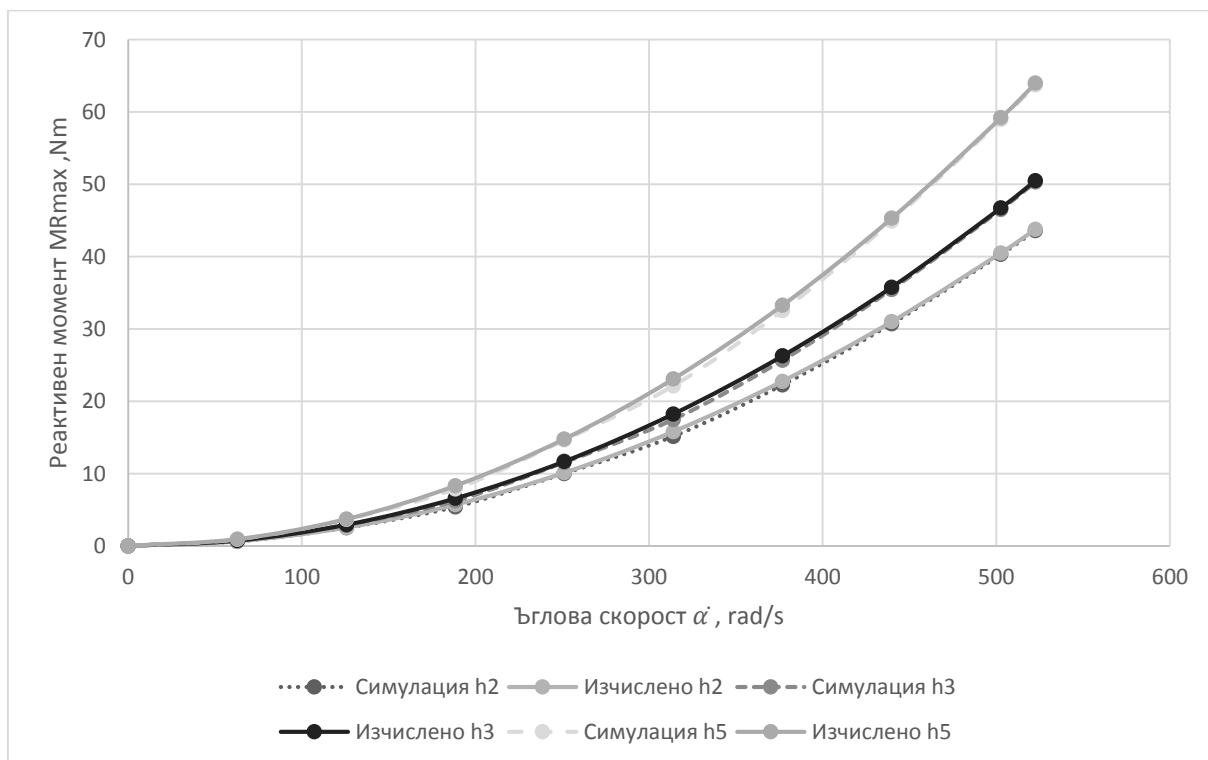
Параметрите на 3D модела при всички динамични симулации бяха следните: $r_1 = 0,05$ m, $r_2 = 0,0125$ m, $r_3 = 0,025$ m. Направена бе динамична симулация:

- при различен брой n на звената с тежести $n_3=4$ бр., $n_4=5$ бр., $n_5=6$ бр. (виж фиг. 3.3).
- при различни стойности на разстоянието h между масовия център S на сателитното зъбно колело и оста му B на въртене: $h_2=0,004007$ m, $h_3=0,004624$ m, $h_5=0,005857$ m (виж фиг. 3.9).

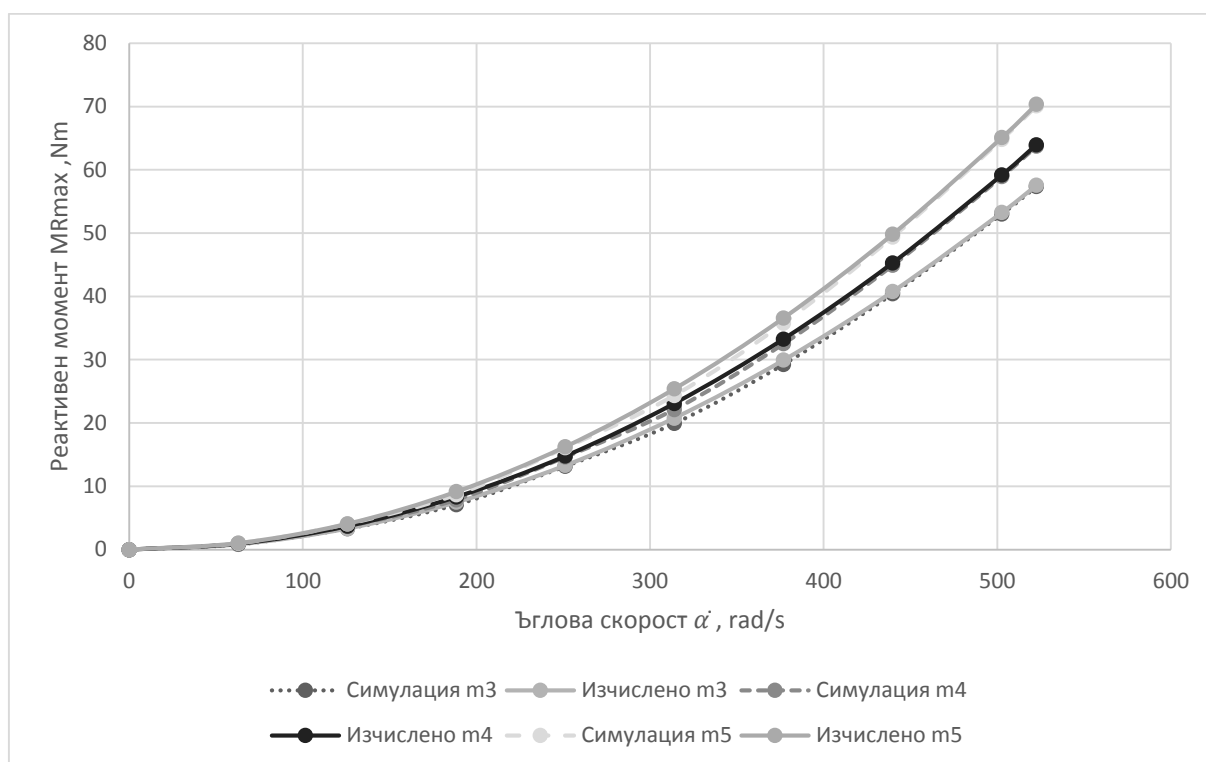
- при различни стойности на масата m на звеното с тежести $m_3=0,09$ кг; $m_4=0,1$ кг; $m_5=0,11$ кг (виж фиг. 3.5).



Фиг. 3.3 Диаграма на получените резултати от симулацията на MR_{max} при p



Фиг. 3.9 Диаграма на получените резултати от симулацията на MR_{max} при h



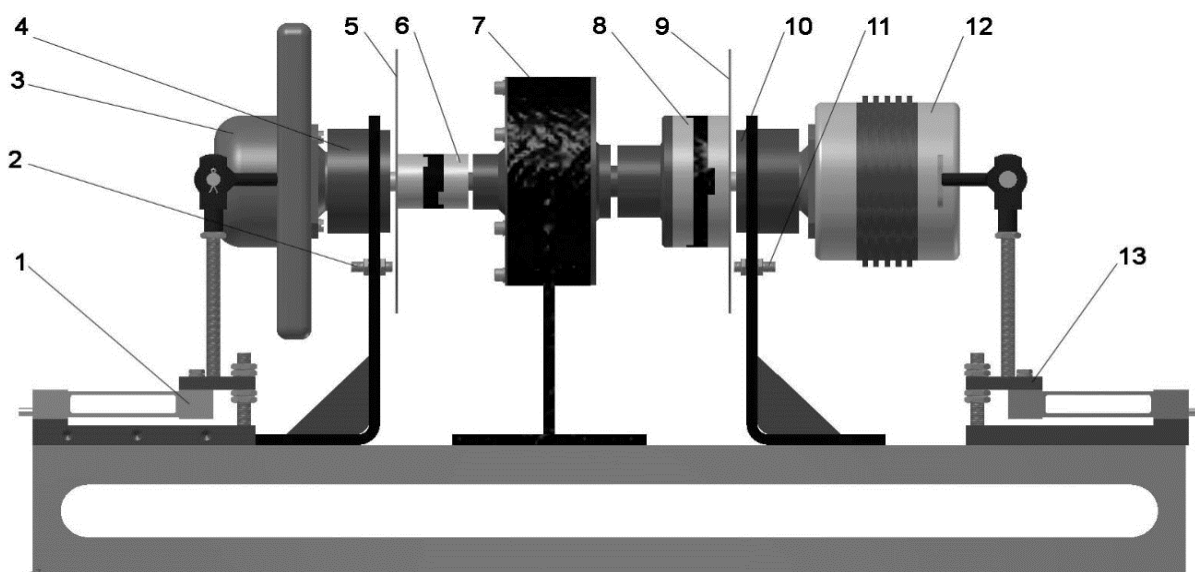
Фиг. 3.13 Диаграма на получените резултати от симулацията на MR_{max} при t

3.4. Изводи.

1. В средата на Autodesk Inventor е съставена методика за динамичната симулация на импулсен механизъм на Левин в „стопов режим“.
2. Извършена е динамична симулация при различни стойности на конструктивните параметри m , h и p и е установено тяхното влияние върху стойността на реактивния момент.
3. Получените резултати показват съвпадение на графиките от стимулационното и математическото изследване на импулсен механизъм на Левин, конструиран по алгоритъм за изчисление на основните конструктивни параметри.

ГЛАВА ЧЕТВЪРТА: ИЗРАБОТВАНЕ НА СТЕНД И ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН МОДЕЛ НА ИНЕРЦИОНЕН ТРАНСФОРМАТОР НА ВЪРТЯЩ МОМЕНТ.

4.1. Стенд за изпитване на ИТВМ.



Фиг. 4.2 Лабораторен стенд - принципна схема

Разработен бе изцяло нов стенд за изпитване на механични предавки състоящ се от задвижващ модул, натоварващ модул и система за събиране на данни в реално време.

Стендът се състои от:

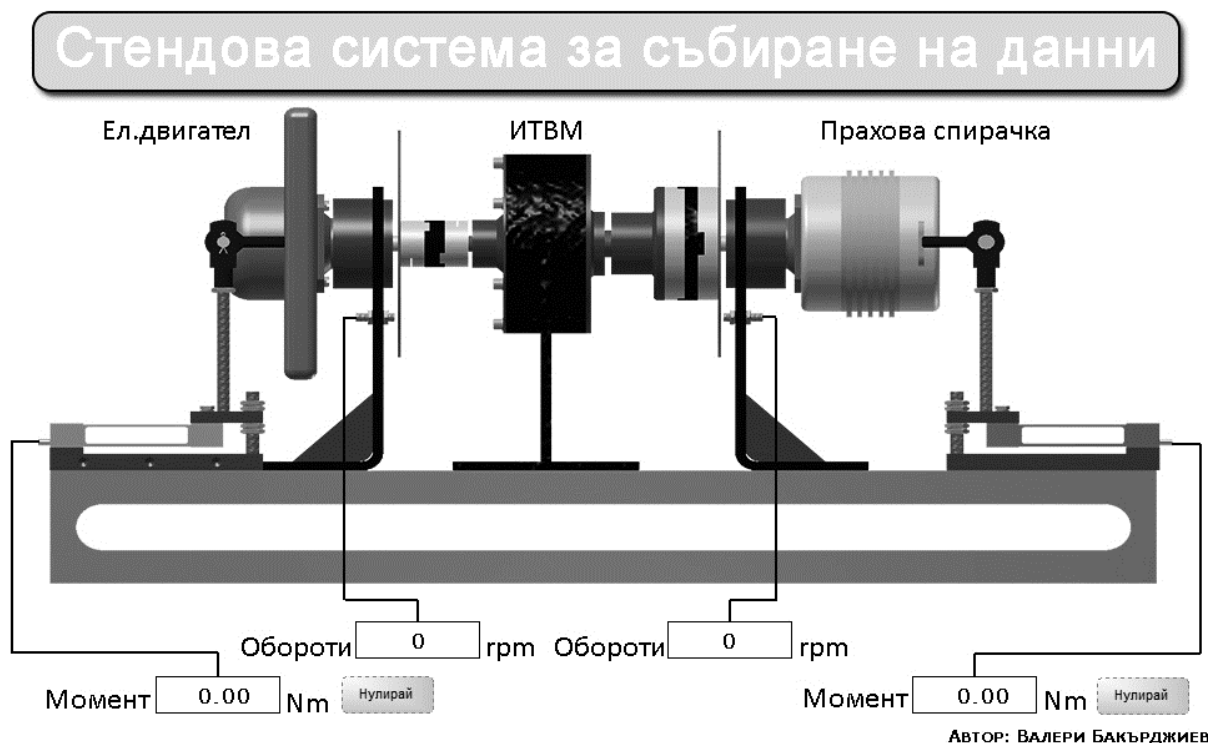
1. Тензометричен сензор PC22, който отчита възникналата сила, породена от реактивния въртящ момент на електродвигателя.
2. Индуктивен датчик, който отчита импулсите, получени вследствие на въртенето на оста на електродвигателя чрез метален диск с прорези от позиция 5.
3. Електродвигател тип BM 1060CE с висока честота на въртене.
4. Стойка за електродвигателя, реализирана по схемата на двигателен балансен моментоизмервател за измерване на въртящия момент на електродвигателя.
5. Метален диск.
6. Олдхамов съединител.
7. ИТВМ, изработен с импулсен механизъм по схемата на Левин, с 6 сателита за предаването на номинален момент от 18Nm.
8. Олдхамов съединител.
9. Метален диск.
10. Стойка за реализиране на спирачен балансен моментоизмервател на натоварващото устройство.

11. Индуктивен датчик, който отчита импулсите, получени вследствие на въртенето на оста на електромагнитната спирачка чрез метален диск позиция 9.
12. Натоварващо устройство, реализирано чрез прахов съединител тип TJ-POC50 за създаване на натоварване на изследвания ИТВМ.
13. Тензометричен сензор PC42, който отчита опорната реакция, породена от спирания момент на електромагнитната спирачка 12.

4.1.1. Система за събиране на данни.

След предварително извършено пазарно проучване в периода от 01.04.2014г. до 30.09.2014г. бяха закупени промишлен контролер PLC DVP-SV28T11T на фирма DeltaGroup, два теглоизмервателя DVP-LC1-SL, два тензометрични сензора PC22 и PC42, два индуктивни датчика E2B-S08KS02-WPB1 2M OMS и захранване за системата тип DR45.

Разработена бе scada система за управление на стенда и събиране на данни в реално време. За целта бе използвана софтуерна среда за програмиране Xscada, работен екран за отчитане на данни е показан на фиг. 4.8. Системата показва 4 измервани величини, два момента и две ъглови скорости. Има 2 бутона, чрез които се нулират показанията на моментите. Системата записва данните от проведените експерименти, които могат да бъдат обработени на по-късен етап.



Фиг. 4.8 Работен екран на Xscada

4.1.2. Задвижващ постоянен ток електродвигател.

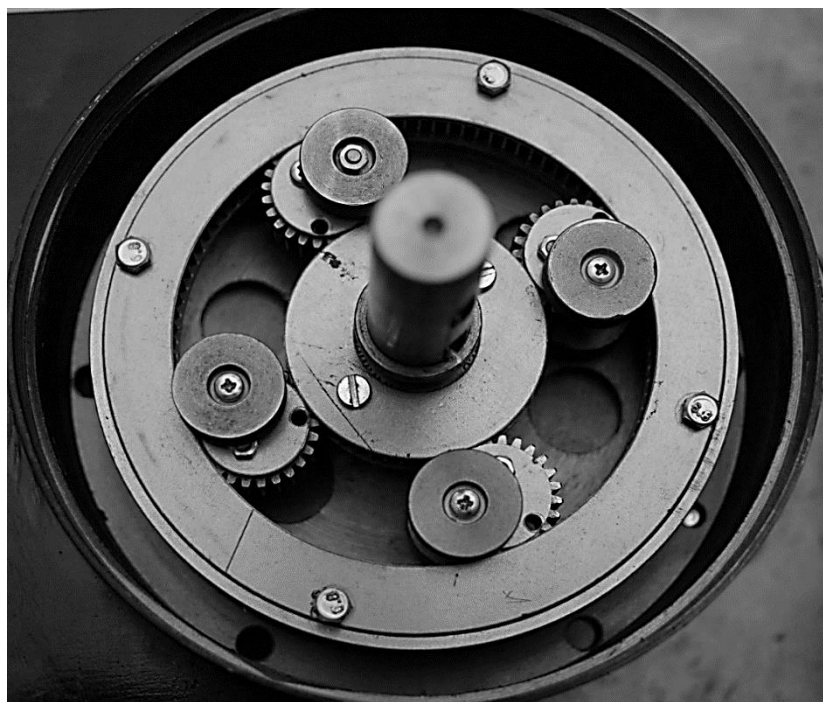
Задвижването на стенда се осъществява от електродвигател тип ВМ 1060СЕ] (максимални обороти на празен ход: 530min^{-1} , максимален въртящ момент: 50 Nm, консумирана мощност: 1050 W). За да се използва високата честота на въртене, от котвата на електродвигателя бе премахната вградената скоростна кутия – редуктор на миксера.

4.1.3. Натоварващо устройство.

Направени бяха проучвания по отношение на възможностите за използване на различни принципи за осъществяване на спирачен натоварващ момент. Установи се, че най-подходящи за влагането в стендове за изпитване на механични предавки са електромагнитните прахови съединители. Електромагнитните прахови съединители могат да се използват в стендове от 10 до 500Nm, имат сравнително ниска цена и за управлението им може да се използва обикновен токов регулатор ТЕС.

4.1.4. Конструкция на ИТВМ.

На базата на предварителните изчисления от втора глава бе конструиран и изработен инерционен трансформатор на въртящ момент. На фиг. 4.14 е показана снимка на импулсния механизъм на инерционния трансформатор на въртящ момент.



Фиг. 4.14 Импулсен механизъм на ИТВМ

4.3. Изводи

1. Разработена е и е тествана програма Scada за снемане на данни в реално време чрез протокол Modbus ASCII/RTU.
2. Разработена е и е тествана програма за управление на промишлен контролер за PLC DVP-SV28T11T.
3. Проектиран е и е изработен функционален стенд за тестване на механични предавки.
4. Проектиран е и е изработен ИТВМ със използването на стандартизирани еднопосочни съединители. Съществува възможност за промяна на масата на неуравновесените тежести, както и позицията на техния масов център и броя на звената с тежести.
5. Изработена е експериментална установка за експериментално определяне на масовите инерционни моменти.

ГЛАВА ПЕТА: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗЛЕДВАНИЯ – МЕТОДИКА, ПРОГРАМА, ОСОБЕНОСТИ, РЕЗУЛТАТИ.

5.1. Тариране на измервателната апаратура.

За да се установи зависимостта между натоварването на тензометричните сензори и показанията на теглоизмервателния модул DVP-LC1-SL за отчитане на измерваните величини, е необходимо преди започване на експериментите да се извърши тяхното тариране. За тази цел върху тях се прилага натиск посредством еталонни тежести с маса 0,5, 1 и 1,5 кг.

5.2. Предпоставки на експерименталните изследвания.

Основните характеристики на механичните предавки, които са обект на експериментални изследвания тук са:

- кинематичното предавателно отношение i

$$i = \omega_{ВХ} / \omega_{ИЗХ} = \dot{\alpha} / \dot{\gamma} ; \quad (5.1)$$

- обратното кинематично предавателно отношение i_K

$$i_K = \frac{1}{i} = \frac{\omega_{ИЗХ}}{\omega_{ВХ}} = \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\alpha}} \quad (5.2)$$

- моментносиловото предавателно отношение i_M

$$i_M = M_{ИЗХ} / M_{ВХ} = M_C / M_D, \quad (5.3)$$

- коэффициент на полезно действие η

$$\eta = efficiency = P_{ИЗХ} / P_{ВХ} = M_{ИЗХ} \cdot \omega_{ИЗХ} / M_{ВХ} \cdot \omega_{ВХ} = i_M / i. \quad (5.4)$$

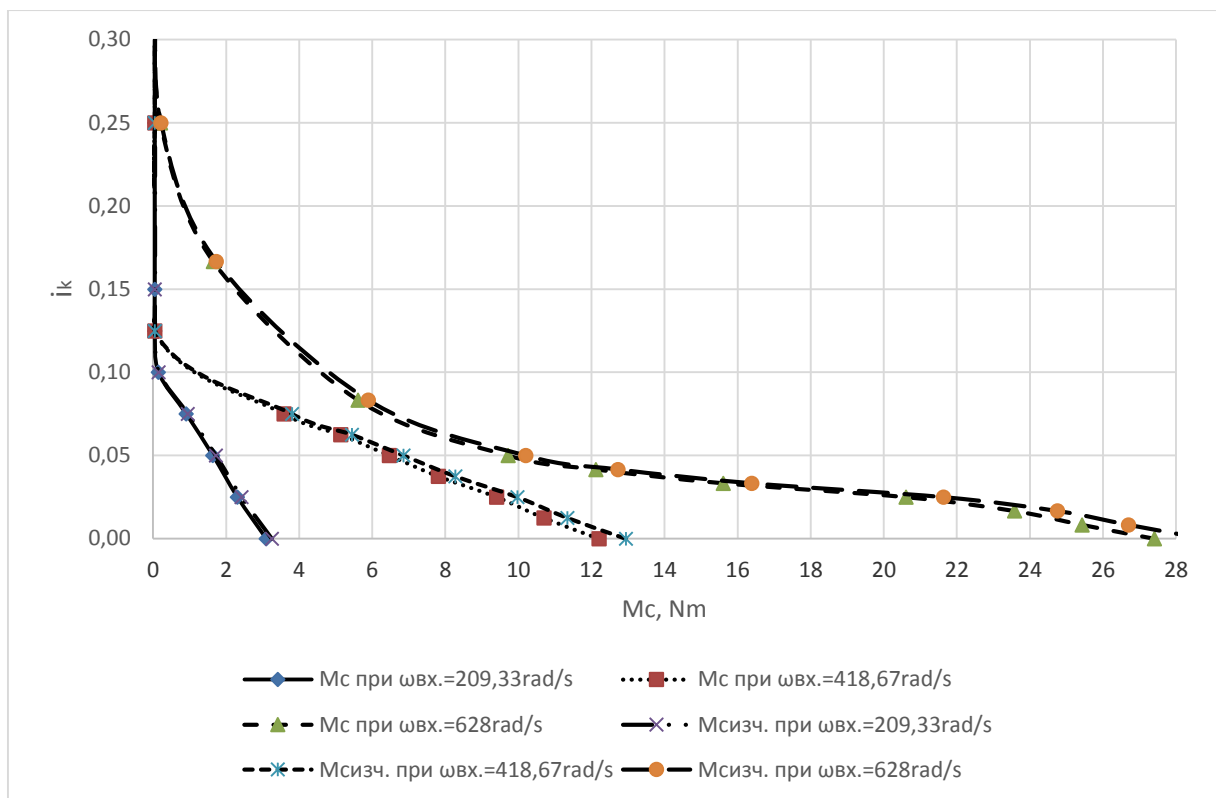
5.3. Методика на експерименталните изследвания.

За нуждите на експерименталните изследвания бе използван стенда, разгледан в четвърта глава. Изследваният обект е проектираният и изработен прототип на ИТВМ с импулсен механизъм на Левин и изпълнен по схемата с два еднопосочни съединителя. Конструкцията на импулсния механизъм позволява бързо и лесно да се променят броя на звената с тежести n , отстояние h на масовия им център от оста на въртене и масата на звената с тежести m .

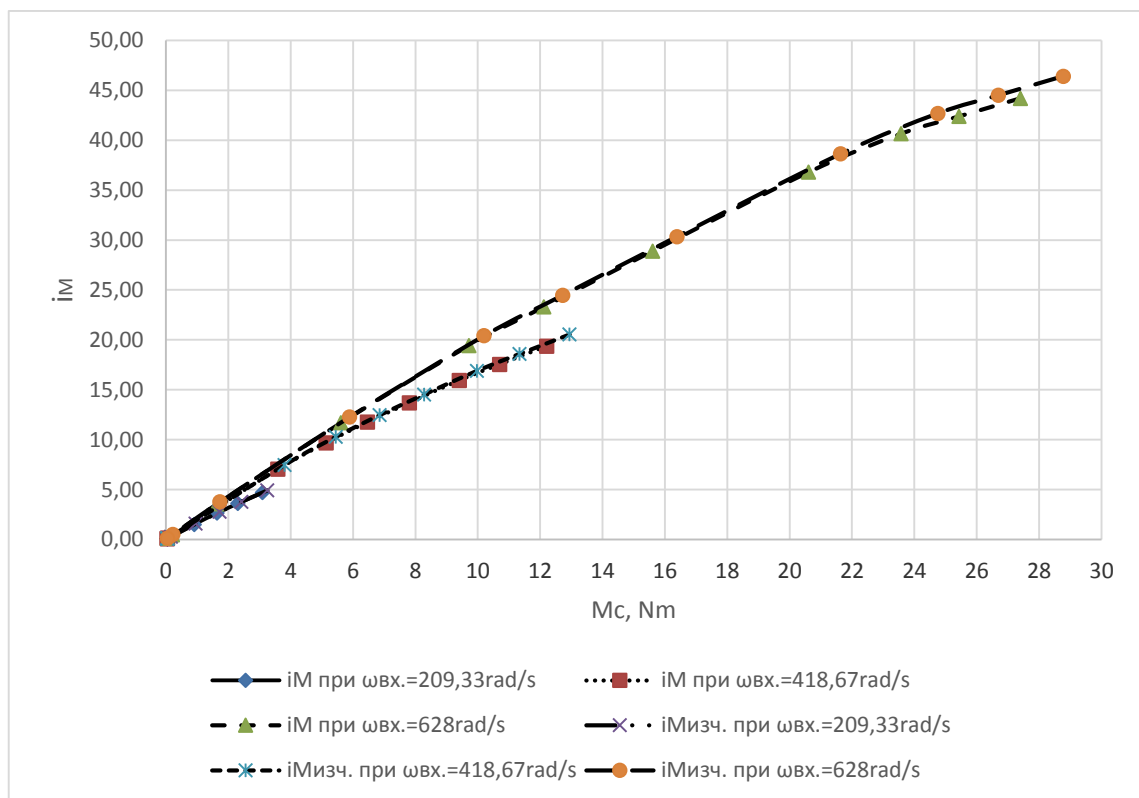
Чрез серия от експерименти бе проверено влиянието на механичните характеристики върху работата на ИТВМ за всеки един параметър:

- влиянието на броя на звената n с тежести върху работата на импулсния механизъм;
- влиянието на масата на звената m с тежести върху работата на импулсния механизъм;
- влиянието на разстоянието h между масовия център S на сателитното зъбно колело и оста му B на въртене на звената с тежести върху работата на импулсния механизъм.

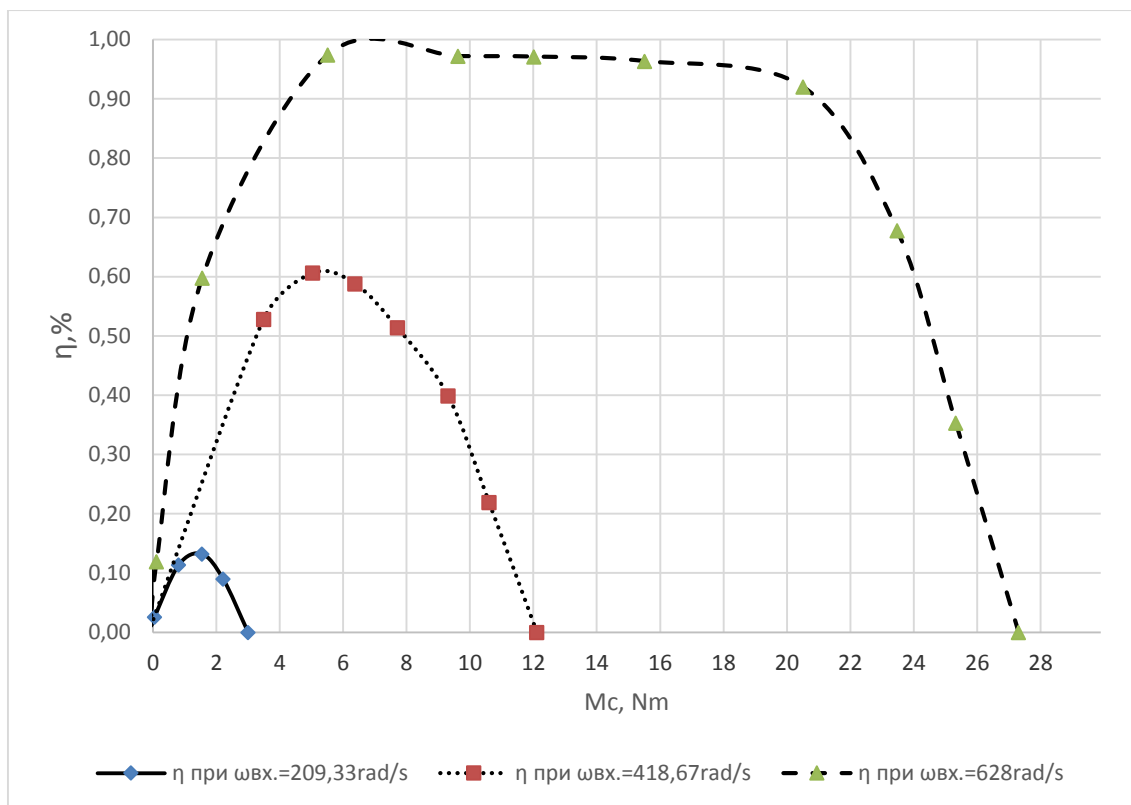
5.4. Резултати от експерименталните изследвания.



Фиг. 5.20 Диаграма на получените резултати от симулацията на i_K при h_3



Фиг. 5.21 Диаграма на получените резултати от симулацията на i_M при h_3



Фиг. 5.22 Диаграма на получените резултати от симулацията на η при h_3

На фиг. 5.20, фиг. 5.21 и фиг. 5.22 са представени резултатите от експеримента при следните параметри на ИТВМ: $m = 0,0821$ кг; $r_1 = 0,05$ m; $r_2 = 0,0125$ m; $r_3 = 0,025$ m; $n = 6$ и $h_3 = 0,008$ m. При различни стойности на честотата на въртене на входния вал се получават резултатите от експеримента.

5.5. Изводи.

1. Експериментално е установено, че с увеличаването на допустимите за конкретната конструкция стойности на входната ъглова скорост $\dot{\alpha}$, на масата на звената с тежести m и на разстоянието h се повишава интервала на изменение на кинематичното предавателно отношение i_K на ИТВМ.
2. Експериментално е установено, че с увеличаването на допустимите за конкретната конструкция стойности на входната ъглова скорост $\dot{\alpha}$, на масата на звената с тежести m и на разстоянието h се повишава интервала на изменение на предавания от ИТВМ съпротивителен момент M_c .

3. Експериментално е установено, че с увеличаването на допустимите за конкретната конструкция стойности на входната ъглова скорост $\dot{\alpha}$, на масата на звената с тежести m и на разстоянието h се повишава КПД на ИТВМ.
4. Експериментално е потвърдена достоверността на получените резултати от механо-математическото числено моделиране.

III. ОБЩИ ИЗВОДИ

IV. Приноси в дисертационния труд

Научно-приложни приноси:

1. Разработен е алгоритъм за изчисляване на основните конструктивни параметри на ИТВМ.
2. В средата на AutoDesk Inventor е съставена методика за динамичната симулация на импулсен механизъм на Левин в „стопов режим“.
3. Експериментално са изследвани зависимостите на изменение на обратното кинематично предавателно отношение, на моментносиловото предавателно отношение и на коефициента на полезно действие от изменението на съпротивителния момент, действащ върху изходния вал на ИТВМ.

Приложни приноси

1. Съставен е софтуер в среда C# за изчисление на основните конструктивни параметри на ИТВМ.
2. Конструирани и е изработен стенд за изпитване на механични предавки, който е оборудван със съвременна специализирана измервателна апаратура.
3. Съставен е софтуер в средата на XSCADA за събиране на данни от експеримента и програма за управление на стенда.
4. Конструирани и е изработен прототип на ИТВМ с използването на стандартизирани ролково-фрикционни еднопосочни съединители. Конструкцията

на импулсния механизъм позволява промяна на масата на неуравновесените тежести, както и позицията на техния масов център.

V. Публикации по дисертацията:

1. Петров Д., **Бакърджиев В.**, CAD-симулационно моделиране на динамиката на инерционен трансформатор на въртящ момент при блокиран изходен вал, Механика на машините №104, Издателство на ТУ-Варна, 2013, с.47-50, ISSN 0861-9727.
2. Petrov D., **Bakardzhiev V.**, Inertial converters of torque and preliminary calculations of their basic parameters, IIZS 2014, Zrenjanin, Serbia, 2014, pp. 213-217, ISBN 978-86-7672-234-1.
3. **Бакърджиев В.**, Петров Д., Лабораторен стенд за изпитване на предавки с плавно изменение на предавателното отношение, Научни трудове на СУБ Пловдив Серия В. Техника и технологии т. XII, СУБ Пловдив, 2014, с. 67-70, ISSN 1311-9419.
4. **Бакърджиев В.**, Класификация на инерционни трансформатори на въртящ момент, Списание Фундаментални науки и приложения, том 21, книга 2, Технически Университет - София Филиал Пловдив, 2015, с. 109-114, ISSN 1310-8271
5. **Бакърджиев В.**, Изследване на електромагнитен прахов съединител, Механика на машините №113, Издателство на ТУ-Варна, 2015, с. 25-28 ISSN 0861-9727

Research of inertial converters of torque

eng. Valeri Y. Bakardzhiev

Abstract

The inertial converters of torque are automated mechanical variable-speed transmissions with the following advantages: compact design, high efficiency, a wide range of transforming the torque, etc. They can switch from the so-called dynamic clutch mode at low value of the section modulus when transforming the torque to the so-called stopped working mode (the engine is driven even if the output shaft is blocked).

In chapter one, it has been made a literature review of existing constructions of CVTs. The aim is to reflect their advantages and disadvantages.

In chapter two, it has been developed a dynamic model of the function of the CVT by means of Lagrange's equations of the second kind. Based on the literature review it has been made a methodology for preliminary calculations of CVT.

In chapter three, the function of the CVT has been dynamically simulated in AutoDesk Inventor when the middle shaft is blocked.

In chapter four, it has been designed and constructed a stand to test mechanical gears. Also, it has been designed and constructed a prototype of a CVT with Levin's impulse mechanism and a scheme with two one-way bearings.

The results of the experimental research of the prototype have been shown in chapter five.