



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА**

**Машинно – технологичен факултет**

---

инж. Стефан Илчев Тенев

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТАТИЧНАТА И ДИНАМИЧНАТА  
ХАРАКТЕРИСТИКА НА ЕЛАСТИЧНИ СЪДИНИТЕЛИ  
С НЕМЕТАЛНИ ЕЛАСТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен  
„ДОКТОР“  
по научна специалност 02.01.03 „Машинознание и машинни  
елементи“

Научен ръководител:  
доц. д-р инж. Христо Парашкевов Христов

Рецензенти:

1. ....
2. ....

Варна  
2016 г.

Дисертационният труд е обсъден на 30.03.2016 г. в катедра  
„Транспортна техника и технологии“ и насочен за защита.  
Докторантът работи в катедра „Техническа механика“

Автор: инж. Стефан Илчев Тенев

Заглавие: *Изследване на статичната и динамичната  
характеристика на еластични съединители с  
неметални еластични елементи*

**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА**  
**Машинно – технологичен факултет**

---

инж. Стефан Илчев Тенев

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТАТИЧНАТА И ДИНАМИЧНАТА  
ХАРАКТЕРИСТИКА НА ЕЛАСТИЧНИ СЪДИНИТЕЛИ  
С НЕМЕТАЛНИ ЕЛАСТИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен  
„ДОКТОР“

Варна  
2016 г.

Дисертационният труд съдържа 132 страници, включително 85 фигури и 23 таблици, оформени в 3 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 62 заглавия, от които 28 на кирилица и 34 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на .....г. от .....ч. в ..... на открито заседание на жури сформирано със заповед на Ректора №...../.....г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересуващите се във ФД „Докторанти“, стая 318 НУК.

## ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### Актуалност на темата на дисертацията

При изследване еластичният съединител се представя като еластична система с отчитане на усукващата коравината. В повечето случаи при съпътстващите теоретични изследвания не се отчита наличието на хистерезисни свойства на полимерните материали, довеждащи до демпфиране. Това се обяснява единствено със сложните физически процеси в полимерите на микро ниво, протичащи при натоварване. Голяма част от полимерните материали притежават свойства на еластични течности.

Използването на гумен еластичен елемент априори предопределя наличието на нелинейна зависимост между въртящия момент и ъгъла на относително завъртане между металните компоненти, съдържащи еластичния елемент. За някои видове механизми това е от съществено значение и се търси възможност за определяне на участъци с линеен характер на характеристиката. Това би позволило по-добра прогнозируемост на позиционирането на задвижвания вал.

Експериментални и теоретични данни сочат, че при средни по големина деформации на гумата (до 30 – 40 %), с достатъчна за практиката точност, връзката между напреженията и деформациите може да се приеме за линейна за еластични съединители с неметални еластични елементи. За целта е необходимо да се проведат експериментални изследвания, обработка на резултатите и анализ на характеристиките на съединителите, като се определят областите на линейна зависимост между натоварване и деформация на еластичните съединители.

При анализиране на определена конструкция и съставните и елементи е нужно по задълбочено познаване на разпределяне на напреженията и деформациите, температурното състояние, еластичните характеристики и коравината, получени в една еластична непрекъсната среда. В голямата си част тези решения представляват статически неопределими задачи, които трудно се решават с помощта на класическите методи на съпротивление на материалите и техническата термодинамика. Решаването става чрез използване на числени методи като метода на крайните елементи, метод на крайните разлики и др.

В голямата си част бързо навлизащите софтуерни системи в изчислителната и измервателна техника в машиностроенето като отделни модули за уточнени инженерни пресмятания на якост и коравина

използват програми разработени на базата на споменатите по-горе методи.

В настоящата дисертация са описани методи и техники за програмно изследване на характеристиката на еластични съединители с помощта на програмите *SolidWorks* и *NX 8.5: Siemens PLM Software*. Мощният модул *Simulation* има възможност за определяне на премествания, напрежения и деформации на изделия от високоеластични материали.

Създадени са програми в софтуерния продукт *LabView* на автоматизираната измервателна система *Data Acquisition (DAQ)*.

Реализираните блок – схеми в гореспоменатата графична среда управляват отчитането, синхронизацията, математическото пресмятане и графичното представяне на резултатите снети от съответните модули за изследване на напрегнатото състояние на еластичния елемент и ъгъла на завъртане на всеки натоварен еластичен съединител.

## Цели и задачи на дисертационния труд

*Целта на дисертационния труд е да разгледа комплекс от въпроси касаещи изследването на статичната и динамичната характеристика на еластични съединители с неметални еластични елементи и в следствие да остави отражение в областта на теоретичното, програмно и експериментално изследване на същите. А решаването на възложените задачи в дисертацията биха могли да дадат отговор на засегнатите въпроси.*

В дисертацията са поставени следните задачи:

1. Разработване на теоретични модели на напрегнатото състояние на съединители *СЕГЕ* и *СЕГМЕ* въз основа на нормалните и тангенциални напрежения, действащи върху работния им гумен елемент.

2. Изследване на еластични съединители *СЕГЕ* и *СЕГМЕ* и симулация на натоварването им чрез софтуерно настройване на основни параметри, характеризиращи свойствата на високоеластичните материали.

3. Изследване възможността за линеаризация на характеристиката на еластични съединители тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ*.

4. Експериментално изследване на статичната и динамичната характеристика на различни типоразмери еластични съединители и оценка влиянието на твърдостта на гумения елемент върху поведението им.

5. Създаване на автоматизирана система за измерване на въртящ момент и ъглово преместване на еластични съединители при реализиране на циклично натоварване.

6. Създаване на методика за автоматизирана обработка на данни при изпитване на еластични съединители, включваща снемане на експериментални стойности, синхронизация във времето, филтриране и графичното им изобразяване.

### **Обект и предмет на изследването**

За обект на експерименталното изследване са избрани еластични съединители с неметални еластични елементи тип *СЕГЕ*, *СЕГМЕ* и *СЕГКЕ*. Допълнителни експерименти са проведени с съединител тип *СЕГЕ* с твърдост на еластичния елемент в диапазона от  $65^{\circ}Sh$  до  $78^{\circ}Sh$ .

### **Методи на изследване**

Теоретично е изследвано деформираното състояние на съединител тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ*. Вероятно са изследвани съединителите тип *СЕГЕ* и *СЕГКЕ* по метода на крайните елементи. Експериментално са изследвани съединителите тип *СЕГЕ*, *СЕГМЕ* и *СЕГКЕ* и са снети статични и динамични характеристики с помощта на автоматизирана система, създадена на базата на елементи в програмна среда *LabVIEW*.

### **Място на изследване**

Теоретичните и експериментални изследвания необходими при разработването на дисертацията са проведени в лаборатория 602М към *ТУ-Варна*.

### **Практическа ценност на изследването**

Създадените теоретични модели на натоварване на еластичните съединители тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ* могат да послужат за прогнозиране поведението на еластичните елементи.

Проведеното програмно изследване на високоеластичните елементи дава възможност за оптимизация на геометрията на съединителя, търсене на модел с по – добро разпределение на напреженията, увеличаване работоспособността и повишаване експлоатационните показатели.

Снетите характеристики на еластичните съединители могат да бъдат дискретизирани с линейни участъци, което позволява по – добро придвижване позицията на задвижвания вал.

Създаденият блок за автоматизирано снемане на данни при изпитване на еластични съединители позволява изследването да се реализира в динамични условия на натоварване.

Създадената и експериментално проверена в програмна среда *LabVIEW* е схема за организация на измервателната апаратура, която може да се използва за изследователска и за учебна дейност по дисциплината „*Машинни елементи*“.

### **Апробация на изследването**

Основните положения и резултати от дисертационния труд са докладвани и публикувани на следните конференции:

1. Юбилеен конгрес с международно участие „50 ГОДИНИ ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА“, ISSN 978-954-20-0553-7 – 1 публикация.

2. XX Научно – Техническа Конференция с международно участие „ЕКО ВАРНА 2014“, ISBN 954-20-00030 – 1 публикация.

### **Публикации по дисертационния труд**

Написани са общо шест доклада, публикувани в два научни сборника от научно – технически конференции с международно участие и в три списания. Един доклад е самостоятелен, а останалите са в съавторство.

## **СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИЯТА**

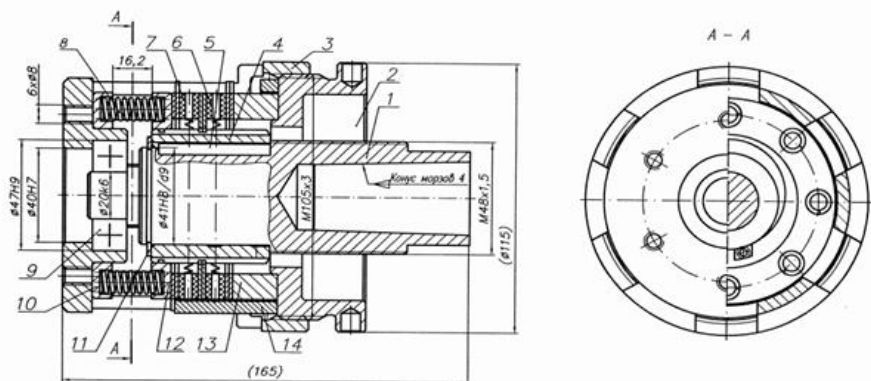
Дисертационния труд се състои от увод, три глави, списък на публикации и списък на използваната литература. Обемът е реализиран от 133 страници, а изложението е придружено с фигури и таблици.



# Глава 1. Анализ и проучване на досегашни научни изследвания в областта на статично и динамично натоварване на еластични съединители

## 1.1. Експериментално изследване на свързващи елементи с челно еластично зацепване за комбиниран механичен съединител

За целите на горепосоченото изследване е използван стенд със силово възбуждане. Снема се хистерезисната крива при установено усукващо трептене на системата, предизвикано от хармонично изменящ се въртящ момент с постоянна амплитуда.



Фиг. 1.1.1. Универсален модул за изпитване на свързващи елементи

Изследвани са два комплекта дискови свързващи елементи, вградени в универсален съединителен модул (фиг. 1.1.1).

Записаните резултатите от изследването съдържат масиви от информация за:

- натрупани дискрети  $\varphi_{1i}$  от ФРП1 (фотоелектричен растров преобразувател) в рамките на една стъпка на сканиране и дискрети  $\varphi_{2i}$ , зададена от ФРП2;
- моментна стойност  $x_i$  на показанията на преобразувателя за линейни премествания, свързани със спирачката, в края на всяка стъпка на сканиране;
- стойности на тока  $I$ , подаван на спирачката;
- фаза на натоварване на спирачката.

По данните от измерването са изчислени:

- разликата в ъглите на завъртане на задвижващия и задвижвания вал за всяка стъпка на сканиране

$$\Delta\varphi_i = \left( \frac{\varphi_{1i}}{u} - \varphi_{2i} \right) \frac{\pi}{2500}; \quad (1.1)$$

- текущите стойности на ъгъла на завъртане на задвижващия вал спрямо задвижвания (ъгъла на усукване)

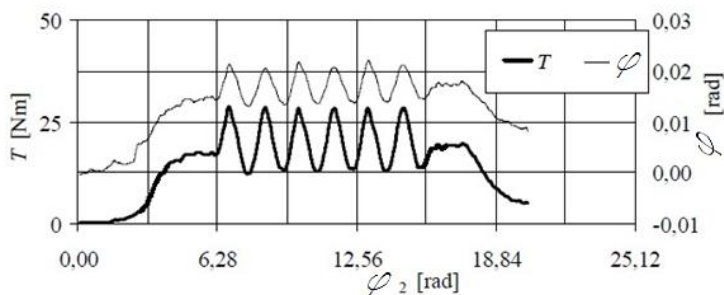
$$\varphi_i = \varphi_{i1} - \varphi_{i2} = \sum \Delta\varphi_i; \quad (1.2)$$

- текущите стойности на въртящия момент на вала на натоварващото устройство

$$T = Cx_i \quad (1.3)$$

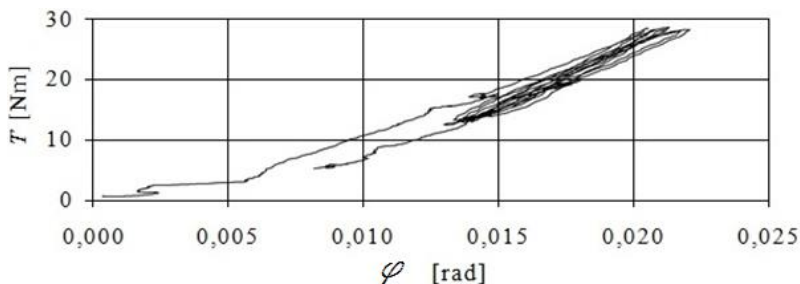
където  $C$  е коравината на измервателната пружина.

Диаграми на въртящия момент  $T = T(\varphi_2)$  и на ъгъла на усукване  $\varphi = \varphi(\varphi_2)$  са показани на *фиг. 1.1.2*.



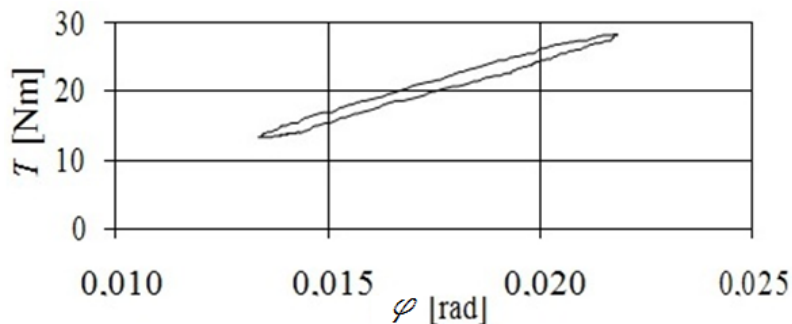
*Фиг. 1.1.2. Характер на зависимостите  $T = T(\varphi_2)$  и  $\varphi = \varphi(\varphi_2)$*

На *фиг. 1.1.3* е представена една от експериментално получените диаграми на натоварване и разтоварване на двата комплекта свързващи елементи с челни еластични зъби.



*Фиг. 1.1.3. Изгладена характеристика на изследвания съединител*

От тази диаграма е изолиран хистерезисния участък, показан на *фиг. 1.1.4*.



Фиг. 1.1.4. Изолирана хистерезисна крива

## 1.2. Моделиране и изследване на радиални еластично – фрикционни свързващи елементи за механичен съединител

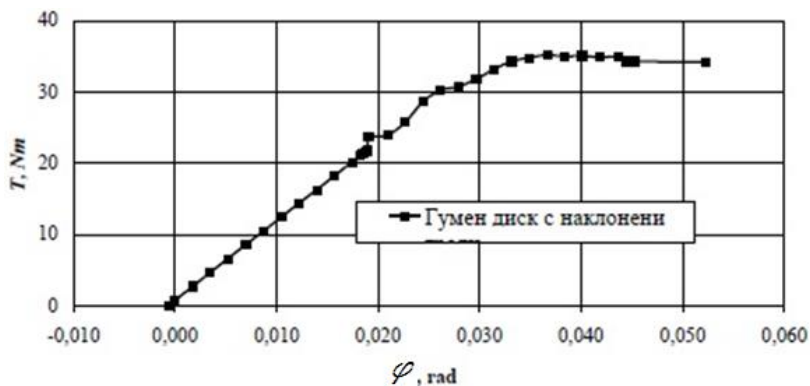
В изследвания съединител радиалните еластични свързващи елементи представляват комплекти от пръстени с твърди и еластични контактни повърхнини.

Изследването на комплекта свързващи елементи се извършва при следните общи допускания:

- натоварването е статично;
- материалът на всички съставни части е линейно еластичен;
- коефициентът на триене  $\mu$  при покой и плъзгане има една и съща постоянна големина;
- в контактните повърхнини са възможни зони на приплъзване и отлепване;
- дисипацията на енергията не се отчита.

Задачата е решена за комплект от свързващи елементи с цилиндрични свързващи повърхнини, съдържащ гумен фрикционен пръстен с радиално разположени наклонени призматични елементи и метален втулка.

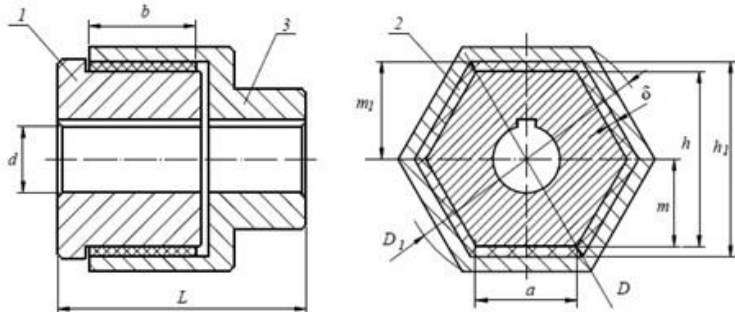
Получената статична характеристика на гумения елемент *фиг. 1.2.1* има ясно изразен линейен участък до  $T = 21.8 \text{ Nm}$ , постигнат при ъгъл на завъртане  $\varphi = 0,01899 \text{ rad}$  ( $1,088^\circ$ ).



Фиг. 1.2.1. Статична характеристика на гумения пръстен

### 1.3. Еластични съединители със шестоъгълен профил

Разгледан е еластични съединители с гумен елемент и шестоъгълен профил (фиг. 1.3.1).



Фиг. 1.3.1. Конструктивни размери на еластичен съединител с гумен елемент и шестоъгълен профил

Максималното напрежение, получаващо се в гумената втулка се определя, както следва:

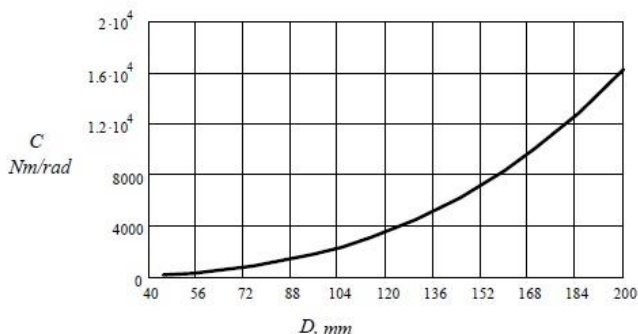
$$\sigma_{max} = \frac{8.T}{D^2.b} \leq [\sigma_{cm}]. \quad (1.4)$$

Приемаме, че при статичното натоварване (след релаксацията) е в сила закона на Хук. За преместването на т. А (деформацията на гумата) по направление на напрежението се получава:

$$\Delta\delta = \frac{\sigma_{max} \cdot \delta}{E} = \frac{8.T \cdot \delta}{D^2.b.E} \quad (1.5)$$

където  $E = 6,1 \text{ MPa}$  е модул на линейна деформация на гумата.

На базата на изведените зависимости, чрез съставена програма на *MathCAD* са обработени данните за зависимостта между коравината  $C$  и диаметра  $D$  (фиг. 1.3.2).



Фиг. 1.3.2. Статична коравина на гама от съединители

#### 1.4. Изводи

1. Предвид теорията на еластичността за еластични материали могат да се изведат модели на натоварване на съответните съединители заложили за изследване в дисертацията. Действащите, върху работните (гумени) елементи, напрежения определят търсенето на адекватен математичен модел на деформация в зависимост от нормалните, тангенциалните и еквивалентните напрежения.

2. От факта, че гумата е високоеластичен материал, се поражда необходимост да се провери дали е възможно да се анализира характеристиката на натоварване на същия с програмния продукт *SolidWorks*, чрез модел на пресмятане *Mooney – Rivlin*.

3. Сложното напрегнато състояние на гумено – кордия елемент на съединител *CEГКЕ* определя необходимостта от задълбочено, както експериментално, така и програмно изследване с помощта на софтуерен продукт за симулация *NX 8.5* на фирмата *Siemens PLM Software*.

4. От разгледаните научни изследвания следва, че е възможна линеаризация на определена област от характеристиката на еластичните съединители. Но от изложеното до сега и проведените допълнителни проучвания по проблема се изясни нуждата от експериментални изследвания на други типове еластични съединители. Редицата експерименти сочат, че до определени нива на натоварване и с определена точност отклоненията от линейност биха могли да бъдат пренебрегнати.

5. Друг фактор влияещ върху поведението на еластичните елементи на съединителите е твърдостта на гумения елемент. Необходимо е извършването на множество експерименти даващи по – ясна картина на влиянието на твърдостта върху експлоатационните им характеристики.

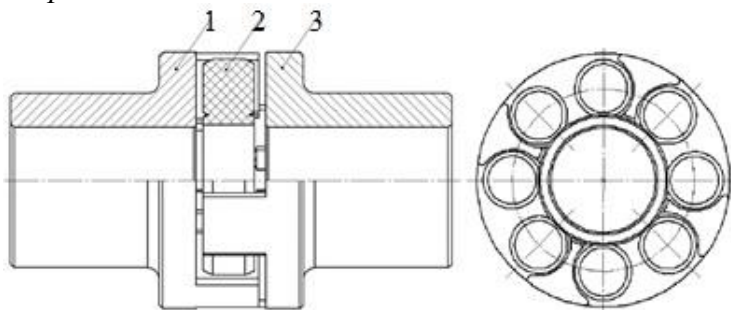
## Глава 2. Теоретично изследване на характеристиките на еластични съединители

В настоящата глава са изведени математически модели на натоварване на експериментално изследваните в дисертацията еластични съединители тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ*.

С помощта на специализиран софтуер са изследвани характеристиките на същите, като е обърнато внимание на типоразмери съединители от тип *СЕГЕ*.

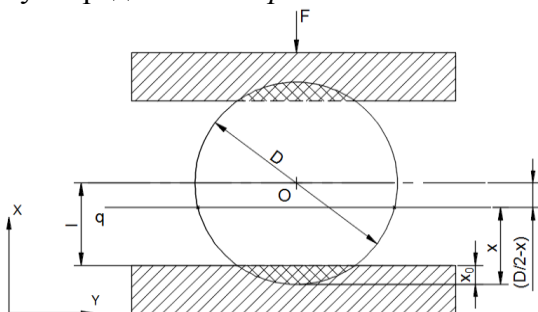
### 2.1. Теоретичен модел и аналитично пресмятане на натоварване на гумен елемент на съединител *СЕГЕ*

Еластичният съединител с неметален еластичен елемент тип *СЕГЕ* е показан на *фиг. 2.1.1*.



*Фиг. 2.1.1. Общ вид на еластичен съединител тип СЕГЕ*

Разгледан е теоретичен модел на натоварване на цилиндричен гумен елемент с две успоредни плочи *фиг. 2.1.2*.



*Фиг. 2.1.2. Схема на натоварване на цилиндричен гумен елемент*

На *фиг. 2.1.2* са показани основните параметри необходими за пресмятане на теоретичния модел на съединител *СЕГЕ*.

Те са както следва:

- $D$  – диаметър на цилиндричния гумен елемент;

- $F$  – сила на натоварване;
- $q$  – права пресичаща гумения елемент на отстояние  $x$  за текущо пресмятано сечение;
- $l$  – дължина на гумения елемент в направление ос  $X$ ;
- $x$  – отстояние на разглежданото сечение от основата на цилиндъра;
- $x_0$  – височина на отсечения сегмент от цилиндричната част;
- $b$  – дължина на цилиндъра (не е показана).

Главните натискови напрежения във всяко сечение успоредно на плочата се определят с:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{2b\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - x\right)^2}} = \frac{F}{2b\sqrt{Dx - x^2}} \quad (2.1)$$

където  $A$  е площта на разглежданото сечение, а  $x$  се изменя от  $x_0 \leq x \leq \frac{D}{2}$ .  $x_0$  се определя по конструктивни съображения.

При този вариант на натоварване се допуска, че напрегнатото състояние е хомогенно. Относителната деформация  $\varepsilon$  по ос  $X$  е една и съща и е равна на средната си стойност по дължината  $l$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta x}{x} \quad (2.2)$$

където  $\Delta l$  е деформацията по ос  $X$ , а  $l = \frac{D}{2} - x_0$ .

Поставената задача разглежда статичното натоварване на гумения елемент. Това от своя страна позволява приемането на закона на Хук  $\sigma = E\varepsilon$  при постоянен модул на еластичност на гумата  $E$ . От така направеното разсъждение, се записва уравнението за относителна безкрайно малка деформация  $\varepsilon$  във вида:

$$\varepsilon = \frac{d(\Delta x)}{dx} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{2bE\sqrt{Dx - x^2}} \quad (2.3)$$

където  $d(\Delta x) = \frac{Fdx}{2bE\sqrt{Dx - x^2}}$ .

За изчисляване на деформацията  $\Delta l$  на половината гумен елемент се пресмята следния определен интеграл:

$$\Delta l = \int_{x_0}^{\frac{D}{2}} d(\Delta x) = \int_{x_0}^{\frac{D}{2}} \frac{Fdx}{2bE\sqrt{Dx - x^2}} = \frac{F}{2bE} \int_{x_0}^{\frac{D}{2}} \frac{dx}{\sqrt{Dx - x^2}}. \quad (2.4)$$

При следваща математическа обработка на (2.4) се пресмята определеният интеграл  $I$ :

$$I = \int_{x_0}^{\frac{D}{2}} \frac{dx}{\sqrt{Dx - x^2}} \quad (2.5)$$

Решава се (2.5) чрез полагане:

$$x = D \sin^2 t$$

$$dx = 2D \sin t \cos t dt$$

при  $x = x_0$ ,  $t = \arcsin \sqrt{\frac{x_0}{D}}$ ;

$$x = \frac{D}{2}, t = \arcsin \sqrt{\frac{1}{2}} = \frac{\pi}{4}.$$

От тук:

$$I = \int_{x_0}^{\frac{D}{2}} \frac{dx}{\sqrt{Dx - x^2}} = 2t \Big|_{\arcsin \sqrt{\frac{x_0}{D}}}^{\pi/4} = \frac{\pi}{2} - 2 \arcsin \sqrt{\frac{x_0}{D}} \quad (2.6)$$

След гореописаните пресмятания деформацията  $\Delta l$  придобива вида:

$$\Delta l = \frac{Fl}{2bE}. \quad (2.7)$$

Чрез уравнение (2.7) се определя деформацията на половината елемент от изследвания еластомер.

Относно представения теоретичен модел е извършен сравнителен анализ със експериментални данни от деформацията на еластичен съединител *CEGE* с номинален въртящ момент  $T_{nom} = 200 Nm$ .

В приложение 1 е представена посоката на натоварване на гумените цилиндри и изнесено сечение на разложените сили по координатна система  $X, Y$ .

Върху гумения цилиндричен елемент действа периферна сила  $F_t$  от приложенияя въртящ момент върху съединителя. Векторът на същата е с ъгъл на атака  $16.77^\circ$  спрямо оста  $X$  (приложение 1). За удовлетворяване на математическия модел по – горе, силата е разложена в координатната система  $X, Y$ . Където  $F_x$  е с направление нормално на гумения елемент в точката на допиране, а  $F_y$  – по направление на оста  $Y$ .

$F'_x$ ,  $F'_y$  и  $F'_t$  са съответно сили противодействащи на натоварването на съответния цилиндричен елемент.

Силата  $F_y$  не участва в пресмятането на теоретичния модел, тъй като не оказва съществено влияние върху напрегнатото състояние на гумения елемент. Основно, същата участва при запълването на профила на палеца с материал (гума) от натоварения цилиндър и при

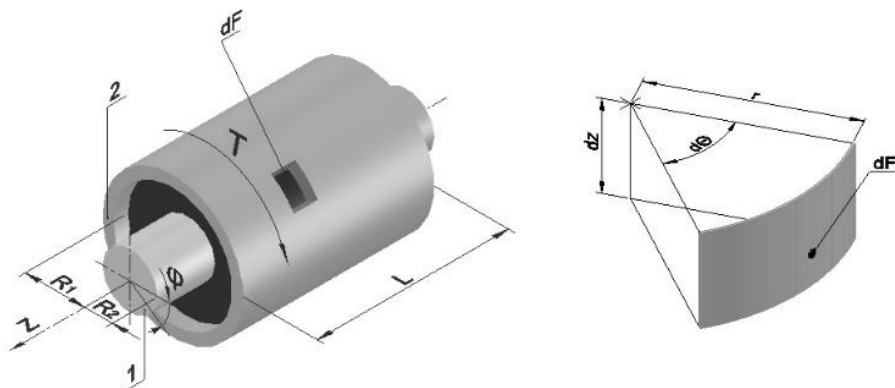


изтичането на същия под действието на големи циклични или ударни натоварвания.

## 2.2. Теоретичен модел и аналитично пресмятане на натоварването на гумено – метален елемент на съединител тип *CEГME*

Еластичният съединител *CEГME* е стандартизиран по за номинален въртящ момент  $25 Nm$ , показан на приложение 2.

Разгледан е теоретичен модел на разглеждания съединител, показан на фиг. 2.2.1. Той представлява ососиметричен вулканизиран гумен елемент между метален цилиндър (вал) с външен диаметър  $R_1$  и метален пръстен 2 с вътрешен радиус  $R_2$  и дължина на вулканизация –  $L$ . Моделът е разположен в цилиндрична координатна система, като оста  $z$  съвпада с оста на симетрия на елемента. Гумено – металният еластичен елемент е натоварен с усукващ момент  $T$ , чийто вектор съвпада с оста на ротация  $z$ . Преместването от натоварването в най – общ вид се изразява в относителното завъртване на вала и главината и е отбелязано с  $\varphi$ . Елементарната площ  $dF$  се определя чрез израза  $dF = rd\theta dz$ , като елементарна дължина  $dz$  се изменя в граници  $0 \div L$ , а ъгъла  $d\theta$  от  $0 \div 2\pi$ .



Фиг. 2.2.1. Теоретичен модел на съединител тип *CEГME*

Въвеждат се преместванията  $u$ ,  $v$ ,  $w$  при следните условия:

- $u$  – преместване на точки радиално на окръжностите съответстващи на текущите радиуси  $r$ ;
- $v$  – преместване на точки в направление по допирателните към окръжностите съответстващи на текущите радиуси  $r$ ;
- $w$  – преместване на точки от изследваната конструкция в направление успоредно на оста  $z$ .

Допуска се, че върху валът 1 е приложен въртящ момент, а пръстена 2 е запънат. Това позволява да се запише за възприетия модел преместванията:  $u = 0$ ;  $w = 0$ ;  $s = 0$ ;  $v = v(r)$ . Преместванията в резултат на натоварването се описват с уравнението:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) - \frac{v}{r^2} = 0, \quad (2.8)$$

чието решение е от вида

$$v = C_1 r + C_2 r^{-1}. \quad (2.9)$$

Заместват се граничните условия  $v(R_1) = 0$  и  $v(R_2) = R_2 \varphi$ , при което уравнение (2.9) придобива вида:

$$\begin{aligned} C_1 R_2 + C_2 R_2^{-1} &= R_2 \varphi, \\ C_1 R_1 + C_2 R_1^{-1} &= 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Оттук се полага  $\alpha = \frac{R_2}{R_1}$  и за константите се получава:

$$\begin{aligned} C_1 &= -\frac{\varphi \alpha^2}{1 - \alpha^2} \\ C_2 &= \frac{\varphi R_2^2}{1 - \alpha^2}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Преместването  $v$  придобива вида:

$$v = \frac{\varphi r}{1 - \alpha^2} \left( \frac{R_2^2}{r^2} - \alpha \right) \quad (2.12)$$

Деформацията  $\gamma$  като функция на текущия радиус  $r$  и ъгъла  $\theta$  се изразява чрез:

$$\gamma_{r\theta} = r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \right) = \frac{2C_2}{r^2} = \frac{2\varphi R_2^2}{(\alpha^2 - 1)r^2} \quad (2.13)$$

и съответно – напрежението

$$\tau_{r\theta} = G\gamma_{r\theta} = \frac{2\varphi GR_2^2}{(\alpha^2 - 1)r^2}. \quad (2.14)$$

Зависимостта между момента  $T$  и ъгловата деформация  $\varphi$  се получава от сумирането на моментите на всички елементарни сили в една от цилиндрични повърхности. Пресмятането се извършва за повърхност по текущ радиус  $r = R_2$ :

$$T = \int R_2 \tau_{r\theta}(R_2) dF = \frac{2R_2^2 \varphi G}{(\alpha^2 - 1)r^2} \int_0^L \int_0^{2\pi} d\theta dz = \frac{4\pi^2 R_2^2 L G}{(\alpha^2 - 1)r^2} \varphi. \quad (2.15)$$

От тук следва зависимостта между момента и напрежението:

$$\tau_{r\theta} = \frac{T}{2\pi L R_2^2}. \quad (2.16)$$

За съединители, стандартизирани с размери посочени на приложение 2, се прави проверка на тангенциалните напрежения в местата на вулканизирани на гумения елемент към металния пръстен и главината по зависимостите:

- за напреженията в главината

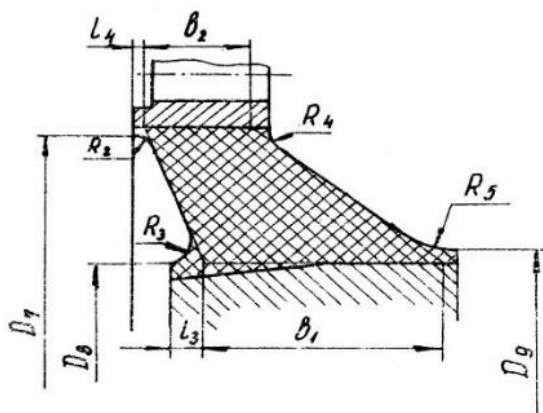
$$\tau = \frac{2T}{\pi D_5^2 b_1} \leq [\tau], \quad (2.17)$$

където:  $[\tau]$  е допустимо напрежение на усукване на гумата при кратковременни претоварвания;

$d_6$  – диаметър на пръстена, по който е вулканизиран гумения еластичен елемент;

$D_5$  – диаметър на главината, по който е вулканизиран гумения еластичен елемент;

$b_1$  и  $b_2$  - осова дължина на вулканизация в съответното място, показани на фиг. 2.2.2.



Фиг. 2.2.2. Геометрични параметри в мястото на вулканизация на еластичен съединител тип *СЕГМЕ*

## 2.3. Изследване на еластичен съединител тип *СЕГЕ* и *СЕГКЕ* със съвременни методи за изследване

### 2.3.1. Сравнителен анализ на характеристиката на натоварване на съединител *СЕГЕ* по модел на пресмятане *Mooney – Rivlin* за високоеластични материали

Извършени са експериментални изследвания на натоварване и разтоварване съединител *СЕГЕ*. На табл. 2.1 са представени данните от изпитването.

Ъглово преместване, grad	$T_{ном} = 80 Nm$											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$\varphi_{нат} 65^\circ Sh$	0,000	0,026	0,049	0,061	0,075	0,087	0,098	0,105	0,117	0,124	0,131	0,143
$\varphi_{раз} 65^\circ Sh$	0,021	0,056	0,08	0,096	0,103	0,115	0,124	0,129	0,131	0,133	0,138	0,143

Табл. 2.1. Ъглово преместване (в радиани) на полусъединител *СЕГЕ* за твърдост на гумения елемент 65 единици по Шор

За изследване на съединител *СЕГЕ* в програмна среда *SolidWorks* са зададени следните опции и параметри характеризиращи високоеластичния материал (гума):

- модел на материал – *Hyperelastic Mooney Rivlin*. Моделът се конкретизира с пет константи на уравнението на *Mooney Rivlin*, автоматично пресметнати от програмно зададени експериментални криви на напрежения – деформации ( $\sigma$ ,  $\epsilon$ ). Данните са съобразени със специфичното натоварване на работните елементи на съединителя:

- 1) напрежения – деформации при опън (*ASTM Methods*);
- 2) напрежения – деформации при срязване (*ASTM Methods*);

- коефициент на Поансон, характеризиращ отношението на напречната спрямо надлъжната деформация на елемента. За гумата като материал  $\mu = 0,4995$ ;

- плътност на гумата  $\rho = 1080 kg/m^3$  – за най – често използвания тип синтетична гума *EPDM*;

- якост на опън  $\sigma_B = 16,2 MPa$ .

Необходимо е въвеждане на параметри определящи начина за пресмятане на *3D* модела:

- начало и край на времето за натоварване на работните елементи:
  - 1) *start time* - 0 seconds;
  - 2) *end time* - 120 seconds;
- стъпки на пресмятане – автоматично задаване;
- геометрични опции при нелинеен характер на материала – използване на опция за големи премествания на материала;
- програмен калкулатор – *Direct Sparse*;
- контактни опции – прецизно решаване (*More accurate*);
- допълнителни опции:
  - 1) контрол върху метода на решаване – контрол на силата на натоварване (*Force control*);
  - 2) метод на итерации при изчисляване на стъпките в т. 2 – *Newton – Raphson* метод;
  - 3) метод на обединяване – *Newmark*;

4) допуски в стъпките на пресмятане:

- а) осъществяване на итерация на всяка – една стъпка (1 *step*);
- б) макс. брой итерации за всяка стъпка на пресмятане – 30;
- в) относителен допуск на деформации при приблизително пресмятане – 0.1;
- г) допуск на деформационни интервали – 0.1;
- д) диапазон на елиминиращ фактор (0-1, при  $<1$  програмата променя диапазона на параметрите характеризиращи приблизителното пресмятане) – 0.

Важно за програмния продукт *SolidWorks* е задаването на точните гранични условия на натоварването на съединителя:

- контакт между натоварващите (стоманени палци) и натоварваните (гумени цилиндри) елементи:

- 1) контакт без взаимно проникване на всички не контактуващи повърхнини - *No Penetration*:

- а) коефициент на триене при движение (стомана – гума) – програмно зададено;

- б) вид на контакт необходим за *MKE* – повърхнина към повърхнина (*Surface to surface*);

- 2) контакт без свободно пространство на всички контактуващи повърхнини – *Bonded*;

- 3) общ контакт (*Global Contact*) – без свободно пространство (*Bonded*);

- фиксиране на елементите:

- 1) фиксиране на единия полусъединител;

- 2) включване на опция „Шарнир“ на повърхнината по която ще се зададе натоварващия въртящ момент;

- въвеждане на диапазон на натоварване на еластичен съединител *CEGE*:

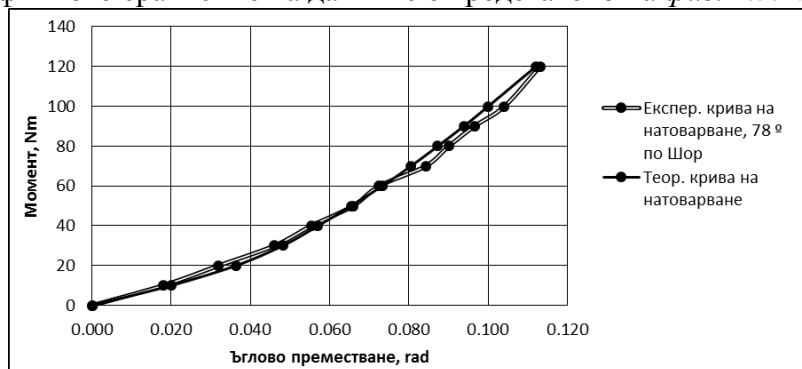
- 1) максимален въртящ момент  $T_{max} = 120 Nm$  приложен по вътрешната повърхнина на главината на полусъединителя;

- 2) графично въвеждане на въртящия момент във функция от времето.

На последно място е задължително да се конфигурира мрежата от крайни елементи за осъществяване симулацията на натоварване на съединител *CEGE*.

Постигната е сходимост на кривите на натоварване. Заедно с това е установена под 5 процента грешка от теоретичните и експериментални стойности на кривите на натоварване.

Графичното сравнение на данните е представено на *фиг. 2.3.1*.



*Фиг. 2.3.1. Експериментална и теоретична крива на натоварване след корекция на параметри на високоеластичния материал*

### 2.3.2. Изследване на напрегнатото състояние на еластичен съединител тип *СЕГКЕ*

Обекта на изследване е съединител тип *СЕГКЕ – T200* с междинна гумено кордна шайба.

Спецификата на съединителя определя сравнително сложно натоварване на елементите му като цяло. Това прави програмното изследване трудно осъществимо без ясна картина на работния процес на същият.

На *фиг. 2.3.2* е изобразено изместването на центъра на отвора т. *B* под действие на приложената от болта сила  $F_t$  в отвора на втулката, при което еластичния елемент *AB* е натоварен на опън.

А т. *B* се премества в положение *C* по окръжността с радиус *R*, на която се намират болтовете, свързващи еластичния елемент с палците на фланца на полусъединителя. Това означава, че натоварваният полусъединител се е завъртял спрямо неподвижния на ъгъл  $\varphi$ . Удължаването на елемента *AB* означаваме като *CD* и го определяме като:  $CD = AC - AD = AC - AB$ , тъй като  $AD = AB = R$  по построение. От равнобедрения триъгълник *AOC* с ъгъл при върха  $(60^\circ + \varphi)$  определяме удължения елемент *AC* по зависимостта:

$$AC = 2R \sin\left(\frac{60^\circ + \varphi}{2}\right), \quad (2.18)$$

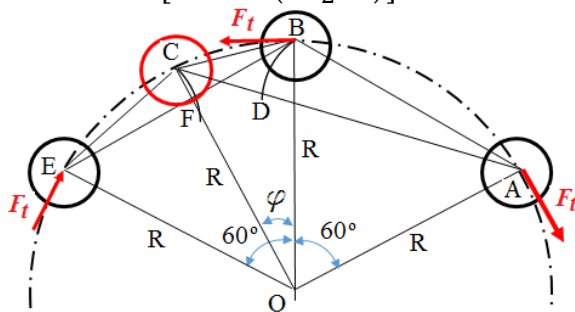
откъдето за удължението *CD* получаваме

$$CD = R \left[ 2 \sin\left(\frac{60^\circ + \varphi}{2}\right) - 1 \right]. \quad (2.19)$$

Скъсяването *BF* на подложения на натиск елемент *BE* определяме като  $BF = BE - EF = BE - CE$ , тъй като  $EF = CE$  по построение.

От равнобедрения триъгълник  $EOC$  с ъгъл при върха ( $60^\circ - \varphi$ ) определяме дължината  $EC$  на натиснатия елемент  $BE$  по зависимостта  $EC = 2R \sin\left(\frac{60^\circ - \varphi}{2}\right)$ . Тогава скъсяването на натиснатата част на еластичния елемент ще бъде:

$$BF = R \left[ 1 - 2 \sin\left(\frac{60^\circ - \varphi}{2}\right) \right]. \quad (2.20)$$



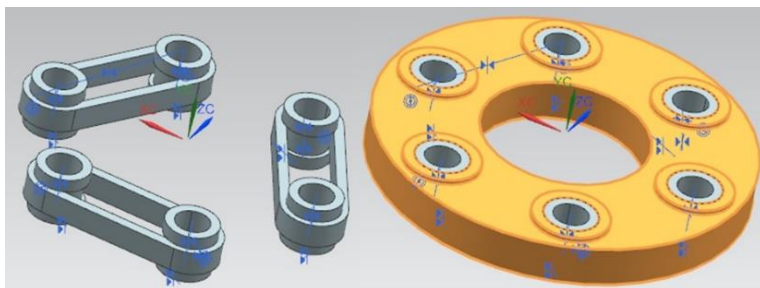
Фиг. 2.3.2. Изместване положението на водещите спрямо водимите палци на съединител СЕГКЕ

Натоварващата сила се определя по формулата  $F_t = T/(R \cdot z)$ , където  $T$  – въртящия момент, а  $z$  – брой на болтовете, свързващи палците на фланеца на полусъединителя с еластичния елемент.

За целта на гореспоменатото изследване се използва компютърна програма *NX 8.5* на компанията *Siemens PLM Software*.

Изчислено е сечението на кордния елемент състоящ се от  $i = 24$  броя кордни нишки. Известен е диаметърът на една кордна нишка  $\varnothing 0,7 \text{ mm}$  от изработени еластични елементи. Снопът от кордни нишки е моделиран като цяло тяло (корден елемент), чиято дебелина запазва необходимото сумарно напречно сечение.

След моделирането на отделните компоненти на съединителя и еластичния елемент, в нова среда *Assembly* на софтуера *NX 8.5* е сглобен еластичния елемент.



Фиг. 2.3.3. Модел на еластичен съединител СЕГКЕ

Извършено е изследване на еластичен елемент със стандартните размери, с гумен еластичен елемент без кордни нишки между втулките. Това изследване е необходимо, за да се изясни поведението на гумения еластичен елемент в натисковата зона, тъй като в нея кордните нишки не влияят върху товароносимостта на съединителя.

Идеализираният модел показан на *фиг. 2.3.3* включва три елемента, за разлика от реалния съединител, моделирани като обемни тела заместващи кордните нишки.

За да се осъществи симулацията на еластичния съединител с гумено – кордни нишки са въведени следните параметри:

- за гумен елемент омрежен с 3D мрежа тип *CTETRA* с размер на крайния елемент  $5\text{ mm}$ , са приети следните характеристики на гумата:

- 1) плътност –  $\rho = 1080\text{ kg/m}^3$ ;
- 2) модул на еластичност –  $E = 3\text{ MPa}$ ;
- 3) коефициент на Поасон –  $\mu = 0,4995$ ;
- 4) якост на опън –  $\sigma_B = 16,2\text{ MPa}$ ;
- 5) физични свойства – *PSOLID*.

- за втулки омрежени със горепосочената 3D мрежа с размер на крайния елемент  $5,14\text{ mm}$ , е въведен материал – стомана с плътност  $\rho = 7820\text{ kg/m}^3$ ;

- за кордни нишки:

- 1) материал полиамид с размер на *KE*  $4,81\text{ mm}$ ;
- 2) като допълнителни характеристики на кордата са приети модул на еластичност  $E = 35\text{ MPa}$  и коефициент на Поасон  $\mu = 0,17$ .

Действащата по болтовата линия периферна сила, разпределена между водещите втулки от еластичния елемент  $F_t$  е разпределена равномерно по нормала към радиуса до центъра на втулките.

Резултатите, които се получиха при симулацията на този модел на съединител за номинален момент  $200\text{ Nm}$  са показани на приложение 3 и 4.

На приложение 3 е посочено преместването на подвижните втулки, а на приложение 4 – напрежението, възникнало при натоварване със сила, съответстваща на въртящия момент.



## 2.4. Изводи

1. Резултатите от математическия анализ на еластичните съединители тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ* могат да послужат за прогнозиране поведението на еластичните елементи и по-правилен подбор на измерителни устройства и системи в процеса на експериментални изследвания.

2. Извършеното изследване на конкретните еластични съединители с приложение на различни видове специализиран софтуер позволява да се провери достоверността на заложените хипотези.

3. Програмното изследване на елементите на еластичните съединители дава възможност за оптимизация на геометрията на съединителя за намаляване деформацията на работния елемент, търсене на модел с по – добро разпределение на напреженията, увеличаване работоспособността и повишаване експлоатационните показатели.

4. Извършването на математическите операции в среда от *MathCAD* и *MatLab* е предпоставка за по-голяма точност на резултатите и коректност на изводите.

5. Наличието на сравнително добра корелация между резултатите от теоретичното и експерименталното изследване на еластичните съединители е показател за достоверност на изследванията.

6. В някои интервали на натоварване се забелязват по – големи отклонения и за различните съединители се счита, че те се дължат както следва:

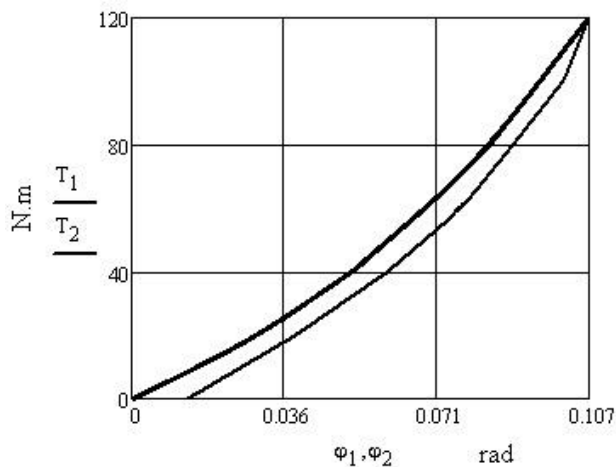
- за съединител *СЕГЕ* – въведените механични характеристики на високоеластичния материал да отговарят на гумен елемент с различен процентен състав на съставлящите я компоненти или с променен процес на вулканизация.

- за съединител *СЕГКЕ* – стойността на конструкцията е чувствителна към големите натоварвания.

## Глава 3. Експериментални изследвания на някои видове еластични съединители

### 3.1. Изследване възможността за линеаризация на характеристиката на еластичен съединител тип *СЕГЕ*

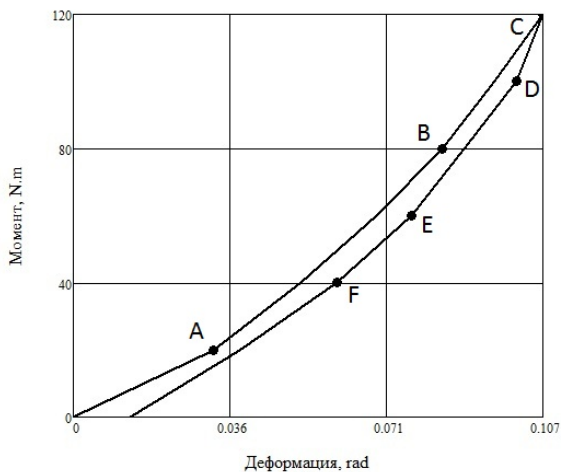
Извършени са експерименти при натоварване на еластичният съединител с максимален въртящ момент 120 Nm и съответно разтоварване фиг. 3.1.1.



Фиг. 3.1.1. Характеристика на съединител с гумен елемент при натоварване с максимален въртящ момент 120 Nm

Картината на представените по-горе графично експериментални резултати подсказва, че има възможност за търсене на линеен характер на характеристиките в определени диапазони.

На фиг. 3.1.2 е представен линеаризиран вид на характеристиките.



Фиг. 3.1.2. Линеаризирана характеристика на натоварване и разтоварване на съединител с гумен елемент

Един от важните параметри на еластичния съединител, даващи възможност за оценка на неговия ресурс да понася натоварване е енергоемкостта  $A_{en}$ , която се определя по зависимостта:

$$A_{en} = \int_0^{\varphi^{max}} T_L(\varphi) d\varphi, \quad (3.1)$$

където  $T_L(\varphi)$  е момент на натоварване, а  $\varphi_{max}$  – максимален ъгъл на завъртане на двата полусъединителя.

Реализацията на компенсиращите качества на съединителя и способността да поема удари и вибрации се предопределя от количеството енергия, консумирано за деформация на еластичния елемент  $A_d$ .

Демпфираната енергия превърната необратимо в топлина от еластичния съединител при статично натоварване се определя по зависимостта:

$$A_d = A_{en} - \int_0^{\varphi_{max}} T_U(\varphi) d\varphi, \quad (3.2)$$

където  $T_U(\varphi)$  е въртящ момент при разтоварване. В този случай това са зависимостите  $T_1 = f(\varphi_1)$  и  $T_2 = f(\varphi_2)$ .

След числено интегриране на базата на проведените експерименти и след условното разделяне на характеристиката на еластичния съединител тип *СЕГЕ* на зони с възможна линейност, са получени резултати за енергоемкостта и демпфиращата му способност, показани в *табл. 3.1*.

По експериментални резултати	Линеаризирана характеристика	Грешка
$A_{en} = 5,063 \text{ J}$ $A_d = 0,733 \text{ J}$	$A_{en} = 5,22 \text{ J}$ $A_d = 0,85 \text{ J}$	$\Delta A_{en} = 3 \%$ $\Delta A_d = 13,75 \%$

*Табл. 3.1. Данни за енергоемкост  $A_{en}$  и работа за демпфиране  $A_d$  за съединител СЕГЕ*

Усукващата коравина е определена по зависимост съответстваща с изискванията на

$$C_\varphi = \frac{\Delta T(\varphi)}{\Delta \varphi} = \frac{T_2(\varphi) - T_1(\varphi)}{\varphi_2 - \varphi_1}, \quad (3.3)$$

където  $T_1(\varphi) = 0,75T_{ном}$  и  $T_2(\varphi) = 1,25T_{ном}$ , а  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – деформации при съответните моменти.

Резултатите за получените усукващи коравини са посочени в *табл. 3.2*. При определянето на усукващата коравина след графична линеаризация на характеристиката, диапазона на изменение на ъгъла  $\varphi$  е разделен на три части, отговарящи на относително линейна зависимост от натоварващия въртящ момент, а именно:

- $\varphi = 0 \div 0,037 \text{ rad}$ ;
- $\varphi = 0,037 \div 0,084 \text{ rad}$ ;
- $\varphi = 0,084 \div 0,107 \text{ rad}$ .

Усукваща коравина	Експериментални резултати	Линеаризирани характеристики		
		Участък 1 $\varphi = 0 \div 0,037 \text{ rad}$	Участък 2 $\varphi = 0,037 \div 0,084 \text{ rad}$	Участък 3 $\varphi = 0,084 \div 0,107 \text{ rad}$
$C_{\varphi}, Nm/rad$	1481	625	1154	1739

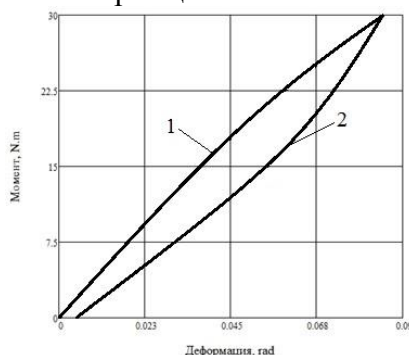
Табл. 3.2. Данни за усукваща коравина  $C_{\varphi}$  за съединител *СЕГЕ*

От гореописаното изследване може да се каже, че:

- извършената линеаризация на кривата на натоварване от статичната характеристика на еластичен съединител тип *СЕГЕ* определя участък с постоянна усукваща коравина;
- праволинейният участък е в областта около номиналния въртящ момент и това позволява категорично приложение на изискванията на стандарта за определяне на средната усукваща коравина;
- малките грешки (под 3% при определяне енергоемкостта) показват висока адекватност на приетия модел за линеаризация;
- по – големите грешки при определяне на работата за демпфиране налага допълнителни изследвания, които да подобрят качеството на възприетия модел.

### 3.2. Изследване възможността за линеаризация на характеристиката на еластичен съединител тип *СЕГМЕ*

Проведени са измервания и опитно е определена статичната характеристика  $T = T(\varphi)$  на еластичен съединител тип *СЕГМЕ* показан на приложение 2 с номинален въртящ момент от 30 Nm (фиг. 3.2.1).



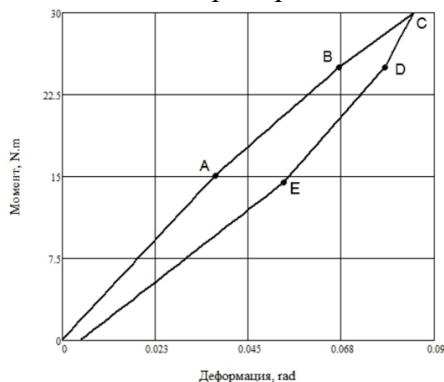
Фиг. 3.2.1. Характеристики на съединител *СЕГМЕ* при натоварване през присъединителната главина

Въведените означения на споменатата фигура са както следва:

- Позиция 1 –  $T_{21} = f(\varphi_{21})$  са характеристика на натоварване;
- Позиция 2 –  $T_{22} = f(\varphi_{22})$  - характеристика на разтоварване.

Самият характер на графично представените експериментални резултати подсказва, че има възможност за търсене на линеен характер на характеристиката в определени диапазони.

На фиг. 3.2.2 е представен линеаризиран вид на характеристиката.



Фиг. 3.2.2. Линеаризирана характеристика при натоварване през главината на съединител с гумено – метален елемент

Налице са линейни участъци в характеристиката на съединителя. Основен интерес предизвиква линията на натоварване, защото тя определя нивото на енергоемкост и по-специално участъка  $AB$ , който се намира в област близо до номиналния въртящ момент, за който е предназначен съединителя.

Данните сочат, че с достатъчна норма на отклонение може да се приеме, че характеристиките се описват коректно чрез полиноми от 3-та степен, посочени по-долу.

$$T_L = -798,38\varphi^3 - 942,43\varphi^2 + 439,34\varphi - 0,035 \quad (3.4)$$

$$T_L = -42039\varphi^3 - 3608,8\varphi^2 + 372\varphi - 1,5734 \quad (3.5)$$

Резултатите за енергоемкостта и демпфиращата способност на еластичния съединител са показани съпоставено в табл. 3.3.

По експериментална характеристика	По линеаризирана характеристика	Грешка
$A_{en} = 1,381 J$ $A_d = 0,358 J$	$A_{en} = 1,378 J$ $A_d = 0,341 J$	$\Delta A_{en} = 0,22 \%$ $\Delta A_d = 4,75 \%$

Табл. 3.3. Данни за енергоемкост  $A_{en}$  и работа за демпфиране  $A_d$  за съединител СЕГМЕ

Изследвана е средната коравина на съединителя, предназначен за номинален въртящ момент  $T_{\text{ном}}$  по неговата експериментална и линеаризирана характеристика.

Резултатите за получената усукваща коравина са посочени в табл. 3.4.

По експериментална характеристика	По линеаризирана характеристика	Грешка
$C_{\varphi} = 333,3 \text{ Nm/rad}$	$C_{\varphi} = 329,5 \text{ Nm/rad}$	$\Delta C_{\varphi} = 1,1 \%$

Табл. 3.4. Усукваща коравина на изследвания съединител

Като заключение може да се каже, че:

- извършената линеаризация на кривата на натоварване от статичната характеристика на еластичен съединител тип *СЕГМЕ* определя участък с постоянна усукваща коравина;
- праволинейният участък е в областта около номиналния въртящ момент и това позволява категорично приложение на изискванията на стандарта за определяне на средната усукваща коравина;
- малките грешки (под 0,62% при определяне енергоемкостта и под 4,2% при определяне на средната усукваща коравина на съединителя) показват висока адекватност на приетия модел за линеаризация;
- по – големите грешки при определяне на работата за демпфиране налага допълнителни изследвания, които да подобрят качеството на възприетия модел.

### 3.3. Влияние на твърдостта на еластичния елемент върху демпфиращата способност на съединител *СЕГЕ*

Изследвани са еластични съединители от тип *СЕГЕ* със съответно номинален въртящ момент 16, 80 и 200 Nm.

Изработени са гумени елементи с различна твърдост по Шор в диапазона от 65 °Sh до 78 °Sh за различни представители на горепосочения съединител, показан на фиг. 2.1.1.

Снетите характеристики са обработени посредством регресивен анализ с програмния продукт *Microsoft Office* и с достатъчна норма на отклонение (под 1%) е прието, че характеристиките на натоварване и разтоварване могат да се опишат коректно чрез полиноми от 3-та, 4-та, 5-та и 6-та степен, конкретно за различните съединители и различните по твърдост еластични елементи.

Експерименталните резултати и тези от регресивния анализ са посочени, както следва:

- за еластичен съединител тип *СЕГЕ* с  $T_{nom} = 200 Nm$  – на приложение 5;
- за еластичен съединител тип *СЕГЕ* с  $T_{nom} = 80 Nm$  – на приложение 6;
- за еластичен съединител тип *СЕГЕ* с  $T_{nom} = 16 Nm$  – на приложение 7.

	$T_{nom}, Nm$					
	200		80		16	
Твърдост, ° Sh	74	70	78	65	76	70
$A_{ен}, J$	16,38	17,81	5,24	5,49	0,86	0,74
$A_d, J$	4,39	4,98	1,61	1,08	0,27	0,23

Табл. 3.5. Данни за енергоемкост  $A_{ен}$  и работа за демпфиране  $A_d$

От проведеното изследване при статично натоварване на еластичния съединител с неметален еластичен елемент *СЕГЕ* и след проведената обработка на данните за енергоемкостта и демпфиращата способност представени на табл. 3.5 се констатира, че:

- при еластичните съединители с номинален въртящ момент  $T_{nom} = 200 Nm$  и  $T_{nom} = 80 Nm$  се наблюдава по – голямо абсорбиране на енергия при по – малка твърдост на гумения елемент;
- при еластичните съединители с номинален въртящ момент с  $T_{nom} = 16 Nm$ , работата за демпфиране е по – малка с оглед по – малката твърдост на еластичния елемент, тази разлика се дефинира на базата на моментно отклонение от времето за засичане на стойностите за конкретните параметри или на грешки съпътствани от близкия по – големина характер на същите;
- за по – точно определяне влиянието на твърдостта на върху характеристиката на еластичния съединител тип *СЕГЕ* се налага разширяване на обхвата на изследваните типоразмери, както по отношение на големината на номиналния момент на натоварване, така и по отношение разглежданата твърдост.

### 3.4. Определяне на демпфиращите възможности на еластичен съединител с гумен елемент тип *СЕГЕ*

За определяне на демпфиращите свойства на съединител тип *СЕГЕ* с  $T_{nom} = 80 Nm$  са проведени статични изпитвания по определена програма, съобразени с методиката описана в нормативните документи.

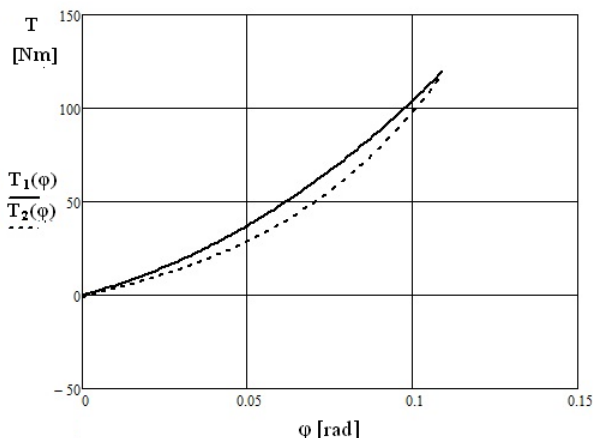
Максималното натоварване на съединителя е с момент

$T = 120 \text{ Nm}$ , приблизително равен на  $1,5T_{\text{ном}}$ .

Използвайки метода на най – малките квадрати в среда от *MATLAB* е извършена интерполация на характеристиките при натоварване и разтоварване.

Характеристиките при натоварване и при разтоварване се описват с полиноми от 3-та степен.

Графичната интерпретация на характеристиките е показана на *фиг. 3.4.1.*



*Фиг. 3.4.1. Вид на характеристиката на еластичен съединител тип СЕГЕ след интерполация*

Интерес представлява площта намираща се между характеристиките на натоварване и разтоварване, показваща действието на силите на вътрешно триене (демпираща работа). Поставя се за цел да се намери аналитично нейната големината. Записва се:

$$A_d = \int_0^{0,109} T_1 d(\varphi) - \int_0^{0,109} T_2 d(\varphi) = 0,761 \text{ J}. \quad (3.6)$$

За определяне на демпиращите свойства на съединителя в целия диапазон на натоварване се снемат статичните характеристики при натоварване и разтоварване с моменти по – малки от максималния ( $T = 120 \text{ Nm}$ ), респективно -  $T = 100, 80, 60, 40$  и  $20 \text{ Nm}$ .

На приложение 8 са показани фамилията от статични характеристики, обхващащи целия диапазон на работа на съединителя. Така се получават 5 части от цялата работна област на съединителя, разпределени според деформациите  $\varphi$ , чиито стойности са зададени в *табл. 3.б.*

част	1	2	3	4	5
$\varphi$ (rad)	$0 \div 0.098$	$0 \div 0.084$	$0 \div 0.07$	$0 \div 0.053$	$0 \div 0.03$

*Табл. 3.б. Разпределение на работната област на деформациите на съединител СЕГЕ на части*



За изследването на всяка част се използва същия подход – екстраполация по метода на най – малките квадрати.

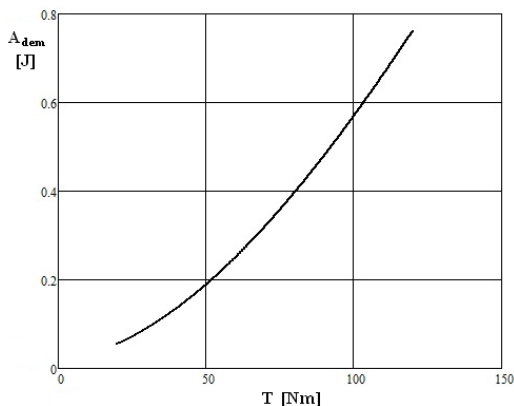
Интерес за изследване представляват площите между линиите на натоварване и разтоварване от характеристиките в разглежданите части, илюстриращи работата за демпфиране на съединителя в съответния режим на натоварване. Отчитайки стойностите на коефициентите на полиномите описващи кривите на разтоварване, за демпфиращата работа  $A_d$  се получават стойности посочени в *табл. 3.7*.

Част	1	2	3	4	5
$A_{dem}, J$	0.576	0.387	0.259	0.133	0.056

*Табл. 3.7. Стойности на работата за демпфиране в отделните части от работната зона*

На базата на експерименталните данни е определена работата за демпфиране при натоварване с момент  $T_{max} = 120 Nm - A_d = 0,761 J$ . При това положение, чрез резултатите от *табл. 3.7*, като се има предвид, че енергоемкостта на изследвания типоразмер на съединител *СЕГЕ – 80* е  $A_d = 5,221 J$ , може да се изведе по познатия път на аналитичната зависимост (3.7) и да се построи нейната графична илюстрация на *фиг. 3.4.2*:

$$A_d = aT^3 + bT^2 + cT + d \quad (3.7)$$



*Фиг. 3.4.2. Зависимост на работата за демпфиране от натоварването*

### **3.5. Относно динамичната характеристика на еластичен съединител *СЕГЕ* при променливо амплитудно натоварване**

При очакван динамичен характер на натоварването с циклична промяна, различните фирми производители дават съответни препоръки за

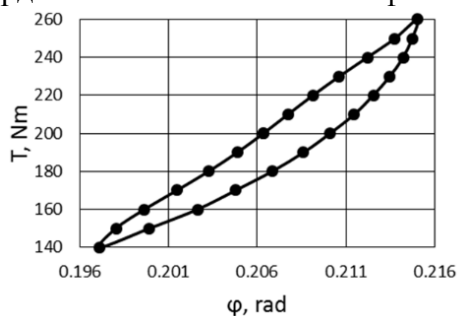
големината на номиналния въртящ момент и на амплитудната му съставляваща, съобразени с конструктивните особености, вида на напрегнатото състояние и качествата на използвана гума.

Изследвани са гумени еластични елементи на съединител *CEGE* – *T200* с твърдост по *Шор А* и амплитуда на изменение на натоварващи момент, които са посочени в табл. 3.8.

Дата на производство на гумения елемент	Твърдост по Шор А, ° Sh	Амплитуден момент $T_a$ , Nm
2013 г.	53	60
2013 г.	57	20, 30..60
2013 г.	71	20, 30..60
1980 г.	70	60
1980 г.	74	60

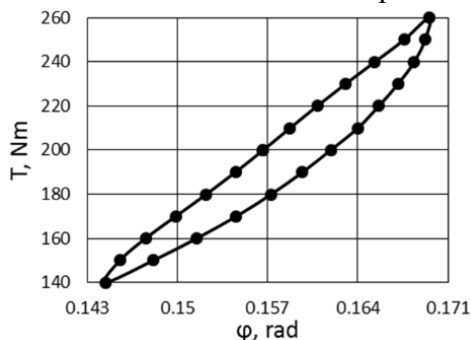
Табл. 3.8. Данни за еластичните елементи за съединител *CEGE*

Снетата характеристика на натоварване и разтоварване на еластичните елементи с твърдост  $53^\circ Sh$  е посочена на фиг. 3.5.1.



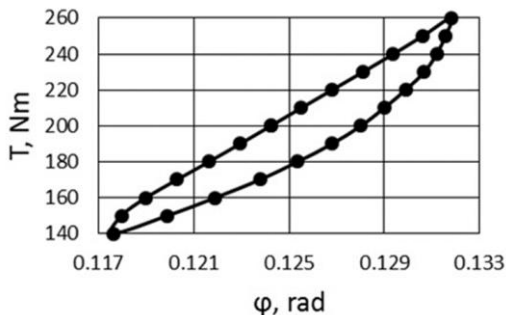
Фиг. 3.5.1. Характеристика на еластичен елемент с твърдост  $53^\circ Sh$

На фиг. 3.5.2 дава представа за характера на амплитудното натоварване и разтоварване за еластичен елемент с твърдост  $57^\circ Sh$ .



Фиг. 3.5.2. Характеристика на еластичен елемент с твърдост  $57^\circ Sh$

Построена е характеристика на натоварване и разтоварване за работен елемент с твърдост  $71^{\circ}Sh$  (фиг. 3.5.3).



Фиг. 3.5.3. Характеристика на еластичен елемент с твърдост  $71^{\circ}Sh$

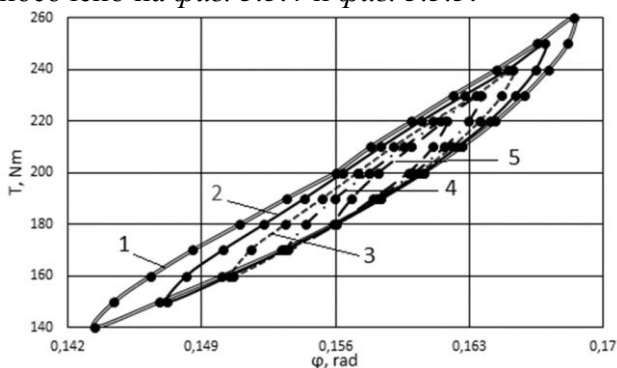
След пресмятане в програмна среда *MSOffice*, таблично е представена енергията за демпфиране  $A_d$  за еластомери с твърдост 53, 57 и  $71^{\circ}$  по Шор (табл. 3.9).

Твърдост по Шор, $^{\circ}Sh$	$T_a$ , Nm	$\varphi$ , rad	$A_d$ , J
71	60	0,124	0,341351
57	60	0,156	0,487363
53	60	0,206	0,371489

Табл. 3.9. Демпфирана енергия от еластомери с твърдост 53, 57 и  $71^{\circ}Sh$

Върху еластични елементи с твърдост 57 и  $71^{\circ}Sh$  са приложени и други амплитудни натоварвания ( $T_a = 20, 30, 40$  и  $50 Nm$ ).

Графичното налагане на съответните хистерезисни петлици една върху друга е посочено на фиг. 3.5.4 и фиг. 3.5.5.



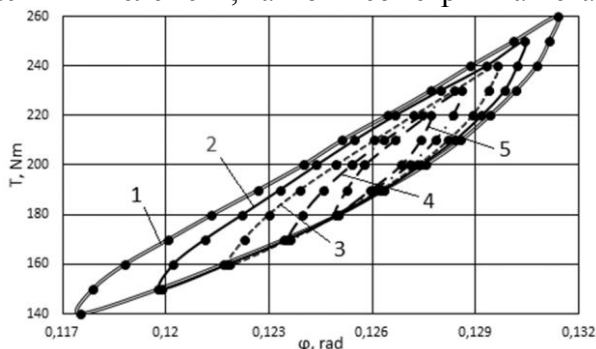
Фиг. 3.5.4. Хистерезисна петлица на еластичен елемент  $57^{\circ}Sh$ : 1 -  $T_a = 60 Nm$ ; 2 -  $T_a = 50 Nm$ ; 3 -  $T_a = 40 Nm$ ; 4 -  $T_a = 30 Nm$ ; 5 -  $T_a = 20 Nm$

В процеса на изследване на характеристиката на еластичния съединител се търси математичен модел, който да описва адекватно деформацията на еластичния елемент и хистерезисната петлица, илюстрираща демпфиращата способност.

Разглежда се възможността, енергията за демпфиране да се изрази чрез показателна функция на амплитудното изменение на въртящия момент (3.8).

$$A_D = k(T_a)^x \quad (3.8)$$

където  $k$ ,  $x$  са комплексни коефициенти, характеризиращи форма и свойства на еластичния елемент, както и геометрия на металните части.



Фиг. 3.5.5. Хистерезисна петлица на еластичен елемент  $71^\circ Sh$ : 1 -  $T_a = 60 \text{ Nm}$ ; 2 -  $T_a = 50 \text{ Nm}$ ; 3 -  $T_a = 40 \text{ Nm}$ ; 4 -  $T_a = 30 \text{ Nm}$ ; 5 -  $T_a = 20 \text{ Nm}$

За еластомерите с твърдост  $57^\circ Sh$  и  $71^\circ Sh$ , на базата на експерименталните резултати за демпфираната енергия  $A_{DE}$  са определени комплексните коефициенти  $k$  и  $x$ , изчислени са стойностите на демпфираната енергия  $A_{DC}$  съгласно приетия математически модел, определена е грешката за адекватност на модела  $\Delta A_D$ , определена е динамичната коравина  $C_d$ , като горепосочените данни са отразени в табл. 3.10.

$^\circ Sh$	$T_a, \text{Nm}$	$k \cdot 10^4$	$x$	$A_{DE}, J$	$A_{DC}, J$	$\Delta A_D, \%$	$C_d, \text{Nm}/\text{rad}$
57	60	1,427	1,987	0,48736	0,48709	0,06	4780
	50			0,33924	0,33906	0,05	5050
	40			0,20958	0,21763	-3,8	5630
	30			0,12009	0,12288	-2,3	6120
	20			0,0507	0,05491	-8,3	7020
71	60	0,476	2,173	0,34135	0,34796	-1,9	8630
	50			0,23414	0,23414	0	9350
	40			0,14416	0,14417	0	10390
	30			0,075	0,07716	-2,9	12240
	20			0,03037	0,03197	-5,3	17390

Табл. 3.10. Обобщени резултати от изследването

На базата на получените резултати могат да бъдат направени следните изводи:

- снети са динамичните характеристики на съединител тип *CEGE-200* с еластични елементи с твърдост по Шор  $53^{\circ}Sh$ ,  $57^{\circ}Sh$  и  $71^{\circ}Sh$  при амплитуден момент съответно 10, 15, 20, 25 и 30% спрямо номиналния;
- определени са стойностите на демпфираната енергия при съответните режими на натоварване чрез оценка на хистерезисните петлици от графичното им изображение;
- определени са параметрите на адекватен математичен модел за описване демпфираната енергия в зависимост от амплитудното натоварване, като грешката е под 4% за всички нива на амплитудния момент с изключение на най-малките (20 Nm);
- грешките  $\Delta A_D$  при амплитуден момент 20 Nm (- 5,3% за еластомер с твърдост  $57^{\circ}Sh$  и - 8,3% за еластомер с твърдост  $71^{\circ}Sh$ ) се дължат на това, че отклонението в натоварването е съизмеримо с евентуални малки монтажни компенсации;
- определената динамичната коравина на съединителя намалява с увеличаване на амплитудния момент за разлика от статичната характеристика при съответния максимален момент.

### 3.6. Изследване на еластичен съединител *CEGE* в цикличен режим на натоварване

Изследван е еластичен съединител с гумен елемент тип *CEGE* с номинален въртящ момент  $T = 200 Nm$ .

За снемането на данни от променливото натоварване на гореспоменатия съединител е използвана автоматизирана измервателна система *Data Acquisition (DAQ)*.

Хардуерното оборудване използвано в настоящото изследване е:

- *cDAQ-9174* – 4 слотово *CompactDAQ USB Chassis* за свързване на измервателни модули;
- *NI 9237* – 4 канален модул  $\pm 25 mV/V$  *Bridge Analog Input 50 kS/s/ch* за измерване на деформации;
- *NI 9401* – 8 канален модул *5 V/TTL Bidirectional Digital I/O* за обработка на високоскоростен входно – изходен цифров сигнал.

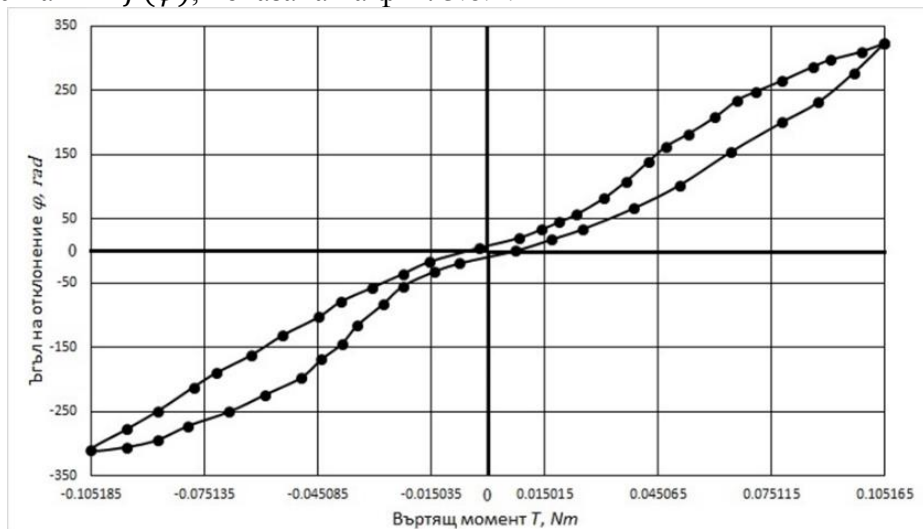
Със съпротивление  $R = 200 \Omega$ , коефициент на тензочувствителност  $K = 2$  и захранващо напрежение  $U = 2.5 V$  тензопреобразователите снемат данни за относителната деформация  $\varepsilon$ . На приложение 9 е

показана блок схема на създадената програма, в софтуерната среда *LabView*, управляваща:

- аналоговия сигнала от модул *NI 9237* за измерената деформация;
- цифровия сигнала от модул *NI 9401* за ъгъла на завъртане на вала на електродвигателя;
- софтуерното нулиране на напрежението в полумостта на Уитс-тън;
- синхронизацията на двата сигнала;
- математическото пресмятане на въртящия момент  $T$  и ъгъла на отклонение на кулиския механизъм  $\varphi$ ;
- граничните условия (засичане на  $T = 0 \text{ Nm}$  и  $\varphi = 0 \text{ rad}$ );
- графичното представяне на характеристиката на съединител *CEGE* в цикличен режим на натоварване  $T = f(\varphi)$  в реално време;
- запис на данните от измерването в *Binary (TDMS)* файл.

За построяването на характеристиката на съединител *CEGE* са изолирани данни за въртящия момент и отклонението на кулиския механизъм за 10 пълни оборота, осъществени след установен режим на работа на системата електродвигател, кулисен механизъм и съединител. Изменението на ъгъла  $\varphi$  във времето съответства на честотата на отчитане (*Rate – 25000 samples per seconds*) на измервателния модул.

След усредняване на стойностите на действащия въртящ момент за всеки един ъгъл на деформация на съединителя е построена зависимостта  $T = f(\varphi)$ , показана на фиг. 3.6.1.



Фиг. 3.6.1. Динамична характеристика на съединител *CEGE*

Динамичната коравина на съединителя, получена по експериментален път е:

$$C_{dyn} = 3011,58 \text{ Nm/rad.}$$

Енергоемкостта, определена на базата на снетата характеристика е:

$$A_{ен} = \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} T(\varphi) d\varphi = 18,439 \text{ J.}$$

Работата за демпфиране на еластичния елемент е:

$$A_D = 4.7325 \text{ J,}$$

а коефициента на демпфиране  $\psi = 0,26$ .

Като обзор на направените по – горе експериментални изследвания може да се напише, че:

- наличието на зони близки до линейна зависимост на  $T = f(\varphi)$  изисква допълнително провеждане на експерименти при различни амплитудни натоварвания и съпътстващо заключение на факта линейност на характеристиката на еластичен съединител *CEГE*;

- причината за разликата в графичното изражение на характеристиката в зоните характеризиращи съответната посока на натоварване на цилиндрите на еластичния елемент се дължи на съвкупността от минимални хлабини в системата електродвигател, кулиса и еластичен съединител;

- създадена е блок – схема в софтуерния продукт *LabView* за отчитане, синхронизация, управление, математическо пресмятане и графично представяне на резултатите снети от модулите за изследване на напрегнатото състояние на еластичния елемент и ъгловото отклонение на кулисния механизъм.

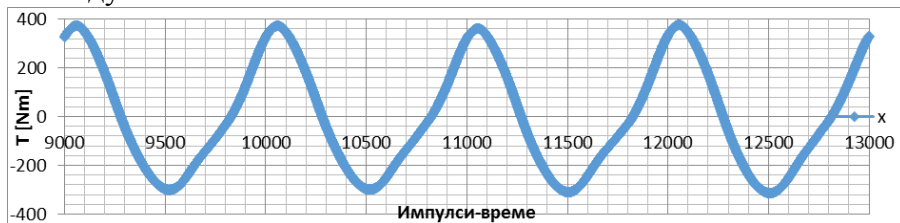
### **3.7. Изследване параметрите на еластичен съединител тип *CEГKE* в условията на циклично натоварване**

Еластичният съединител *CEГKE-T200* е изследван експериментално на стенд за динамични изпитвания.

Експериментът е проведен при скорост на въртене на вала на двигателя с честота  $10 \text{ Hz}$ . За снемане и обработка на данните от измервателните модули, посочени в предходната тема на изследване, е използвана система за събиране на данни *CompactDAQ*.

Обработването на експериментални данни се извършва в графична среда за разработване на приложения за тестване, измерване и контрол на процеси, визуализираща се с програма *LabVIEW*.

На *фиг. 3.7.1* е показана графиката на изменението на въртящия момент във времето, съответстващо на честотата на отчитане на измервателния модул.

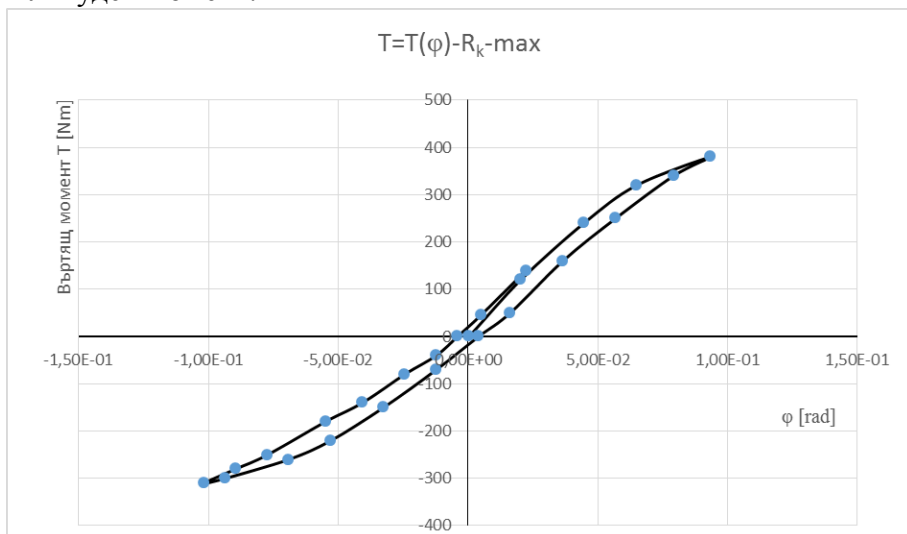


*Фиг. 3.7.1. Изменение на въртящия момент във времето*

На *фиг. 3.7.2* е показана снетата характеристика на еластичния съединител *СЕГКЕ-T200* при симетричен цикъл на натоварване с въртящ момент:

$$T = T_m \pm T_a, \quad (3.9)$$

където  $T_m = 30 \text{ Nm}$  – среден момент на натоварване,  $T_a = 350 \text{ Nm}$  – амплитуден момент.



*Фиг. 3.7.2. Динамичната характеристика на еластичния съединител SEGKE-T200*

Динамичната коравина  $C_{dyn}$  на съединителя, получена по експериментален път е:

$$C_{dyn} = 3500 \text{ Nm/rad.}$$

Енергоемкостта, определена на базата на снетата характеристика е:

$$A_{en} = \int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} T(\varphi) d\varphi = 39,96 \text{ J.}$$

Работата за демпфиране на еластичния елемент е:



$$A_d = 14,38 J,$$

а коефициента на демпфиране  $\psi = 0,36$ .

От направените измервания и следващ анализ на данните е допустимо да се каже, че:

- наличието на зона, натоварена на опън при всяка посока на синусоидалното натоварване, формира участъци близки до линейна зависимост между натоварване и деформация, което се дължи на по-голямата коравина на кордните нишки;
- една от причините за разликата в графичното изражение на характеристиката в опъновата и натисковата зона може да бъде нееднаквост в образуването на снопа от кордни нишки, в резултат на което се получава неравномерно опъване на нишките;
- заради по – голямата коравина на кордните нишки, опъновата зона на еластичния елемент релаксира по-бързо спрямо натисковата.

### 3.8. Изводи

1. От направените експериментални изследвания на съединителите тип *СЕГЕ*, *СЕГМЕ* и *СЕГКЕ* се наблюдава възможност за линейност на характеристиките им при ниски амплитудни натоварване.

2. Снетите характеристики на еластичните съединители могат да бъдат дискретизирани с линейни участъци, което позволява по - добро предвиждане на поведението на еластичните съединители.

3. Похватите използвани в изследването на съединителите позволяват да се изведе по – обективно картината на деформационното и напрегнато състояние на еластичния елемент.

4. Създадена и експериментално проверена в програмна среда *LabVIEW* е схема за организация на измервателната апаратура, която може да се използва за изследователска и за учебна дейност по дисциплината „*Машинни елементи*“.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използвани са техники и настройки на софтуерни продукти за симулация на сложните напрегнати състояния на изследваните еластични елементи на съединители тип *СЕГЕ*, *СЕГМЕ* и *СЕГКЕ*.

С помощта на програмното изследване на еластичните съединители в дисертацията се доказва, че с използването на част от капацитета на съвременни технологии за проектиране и симулиране на поведението на еластичните елементи, могат да се решават разнородни задачи,

вариращи от оптимизация на съществуващи конструкции, до създаването на нови такива с прогнозируемо поведение при различни нива и режими на натоварване.

Дисертационният труд показва, че е налична зона с линейна зависимост на характеристиката на еластичните съединители *СЕГЕ*, *СЕГКЕ* и *СЕГМЕ* до определен въртящ момент на натоварване, което позволява по – точно прогнозиране на позиционирането на задвижваните валове.

## НАУЧНО – ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Създадени са теоретични модели на натоварване на еластичните съединители тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ*.

2. Изведена е зависимост за определяне на работата за вътрешното и външно триене на съединители тип *СЕГЕ* и *СЕГМЕ*, разсеяна в процеса на натоварване и разтоварване на еластичния елемент.

3. Създаден е блок за автоматизирано снемане на данни при изпитване на еластични съединители в динамични условия.

4. Създадена е методика за автоматизирана обработка на експериментални данни от изпитване на еластични съединители чрез регистрация, синхронизация във времето, филтриране, математическо пресмятане и графичното им изобразяване.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Искам да изкажа своята искрена признателност на доц. д-р инж. Ангел Балтаджиев и на доц. д-р инж. Цветко Атанасов за предоставената ми основа в сферата на направление „Машинни елементи“, както и на техните доказани постижения в областта на еластичните съединители.

Благодаря на научния си ръководител доц. д-р инж. Христо Христов за неговите ценни съвети, професионална компетентност и съдействие при провеждане на настоящите изследвания и при подготовката на дисертационния труд. Огромно БЛАГОДАРЯ за неговата подкрепа и проявено търпение.

Изключително благодаря на „отбора“ на направление „Машинни елементи“ гл. ас. инж. Светлозар Стоянов, ас. инж. Найден Спасов и инж. Елисавета Иванова за оказаното съдействие при анализа и обработката на математическите модели, както и при подготовката на някои софтуерни и експериментални изследвания.

Благодаря на колегите *гл. ас. д-р инж. Диян Димитров* – катедра Техническа механика, *ас. д-р инж. Радостин Димитров* и *ас. инж. Веселин Михайлов* - катедра Транспортна техника и технологии за полезните дискусии, предложения и идеи при проведените експерименти в лабораториите на Технически университет Варна. Благодаря на *механик Стефан Желев* към катедра Индустриален дизайн за оказаната помощ при оптимизацията на стенда за изследване на еластични съединители.

Благодаря на колегите от фирма “*Микро-Макс*” ООД за извършената работа при изработването на гумените и металните елементи на изследваните съединители в дисертацията.

Специално благодаря на съпругата ми *инж. Милена Тенева* докторант към катедра Компютърни системи и технологии за нейната подкрепата и насърчаване през годините ми на обучение като докторант. Благодаря за съдействието й оказано при програмирането на алгоритмите в софтуерната среда *LabVIEW*.

Благодаря за финансовата подкрепа по проекти: Научноизследователски проект в помощ на докторанти – 2012 г. № ПД 12/2012г. на тема „Изработване и изследване неметални еластични елементи за съединители “ и проект BG051PO001—3.3.06.05 „Развитие потенциала на докторанти, постдокторанти, млади учени и специализанти от инженерните науки в ТУ Варна и техния принос за развитие на икономика, базирана на знанието“.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Христов, Хр., Св. Стоянов, Ст. Тенев, Н. Спасов. Изследване възможността за линеаризация на характеристиката на еластичен съединител тип СЕГМЕ. сп. *Машиностроителна техника и технологии* бр.1, 2011, с. 26-28, ISSN 1312-0859.

2. Христов, Хр., С. Тенев, Св. Стоянов, Н. Спасов. Изследване възможността за линеаризация на характеристиката на еластичен съединител тип СЕГЕ. Юбилеен конгрес с международно участие „50 ГОДИНИ ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА“, Сборник доклади том. IV, 2012, с. 74-77, ISSN 978-954-20-0553-7.

3. Стоянов, Св., Хр. Христов, Ст. Тенев, Н. Спасов. Определяне на демпфиращите възможности на еластичен съединител с гумен елемент тип СЕГЕ. сп. *Машиностроителна техника и технологии* бр. 1, НТС – Варна, 2012, с. 61-66, ISSN 1312-0859.

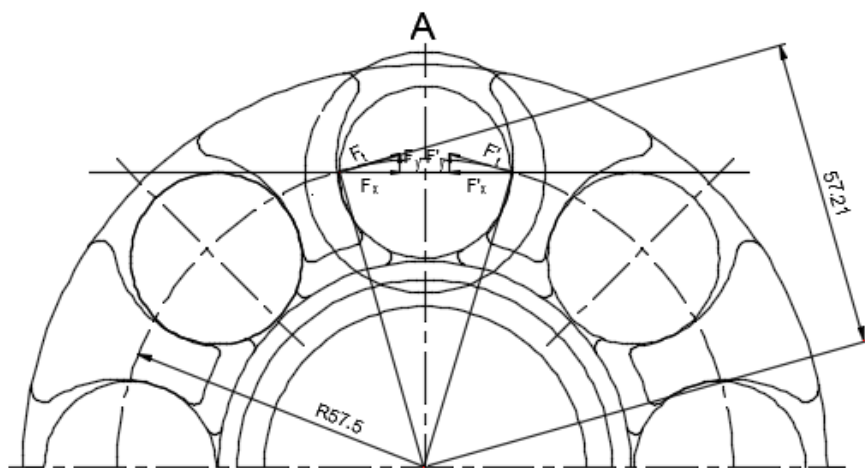
4. Иванова, Е., С. Тенев, Х. Христов. Някои особености при моделиране на еластичен съединител тип СЕГЕ. сп. Машиностроене и Машинознание бр. 24, книга 2, Варна, Технически университет Варна, 2015, с. 87-90, ISSN 1312-8612.

5. Тенев, С., Сравнителен анализ на характеристиката на натоварване на съединител СЕГЕ по модел на пресмятане Mooney-Rivlin за високоеластични материали. Транспорт, екология - устойчиво развитие, Сборник доклади Еко Варна 2014, том 21, Варна, Технически университет Варна, 2014, с. 0437-0445, ISSN 2367-6299.

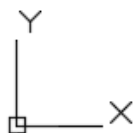
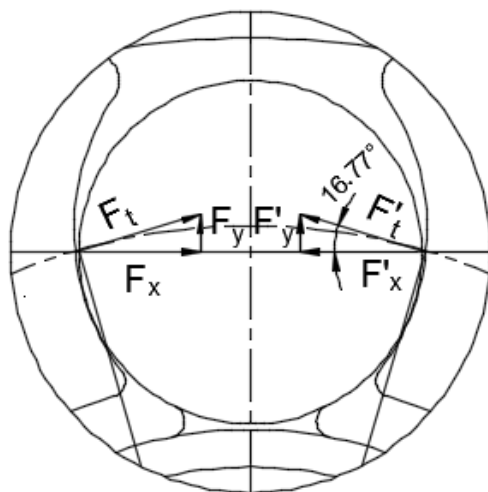
6. Тенев, С., Х. Христов, Е. Иванова. Относно динамичните характеристики на еластичен съединител СЕГЕ при променливо амплитудно натоварване. сп. Машиностроителна техника и технологии. кн. 2, 2014, с 75-78, ISSN: 1312-0859.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

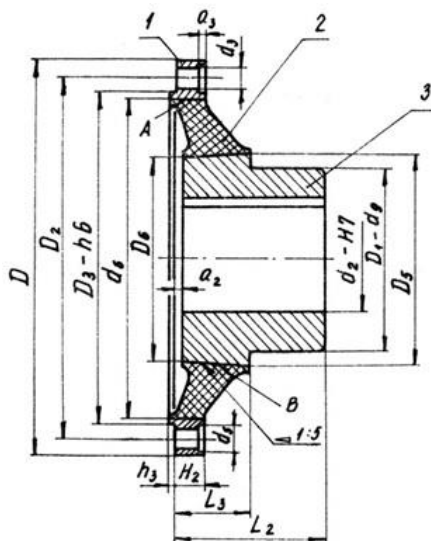


A (2:1)



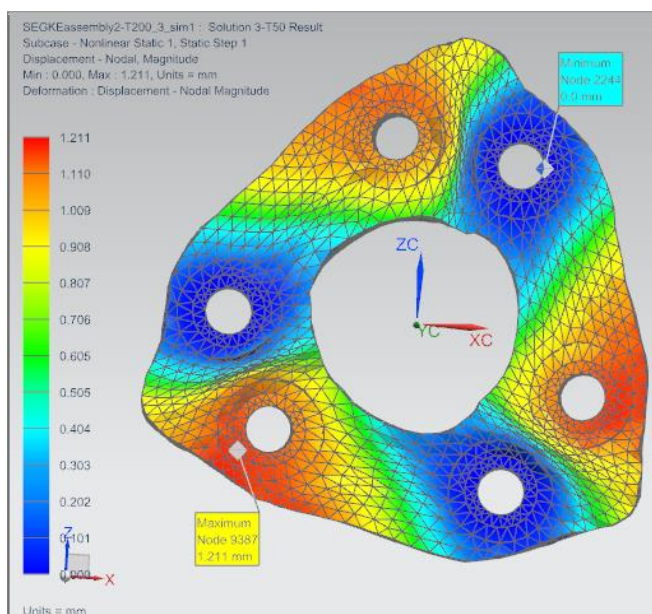
*Характер на натоварване на еластичен елемент на съединител тип СЕГЕ*

## Приложение 2



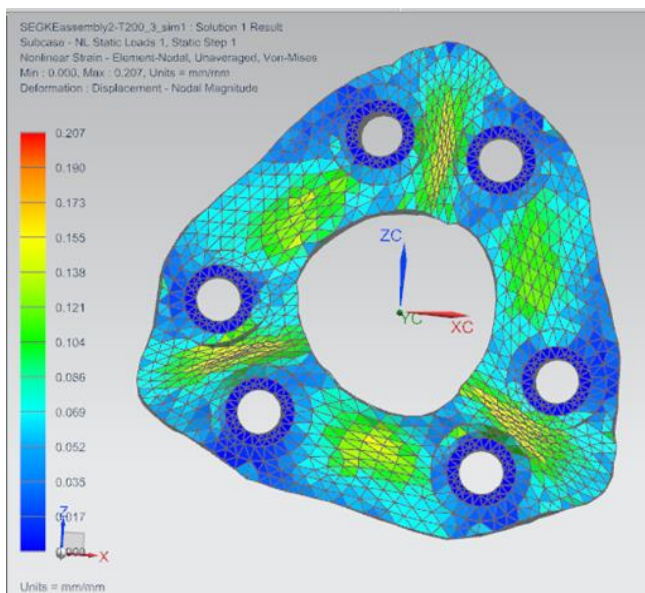
Профилен разрез на полусъединител СЕГМЕ с гумено-метален елемент

## Приложение 3



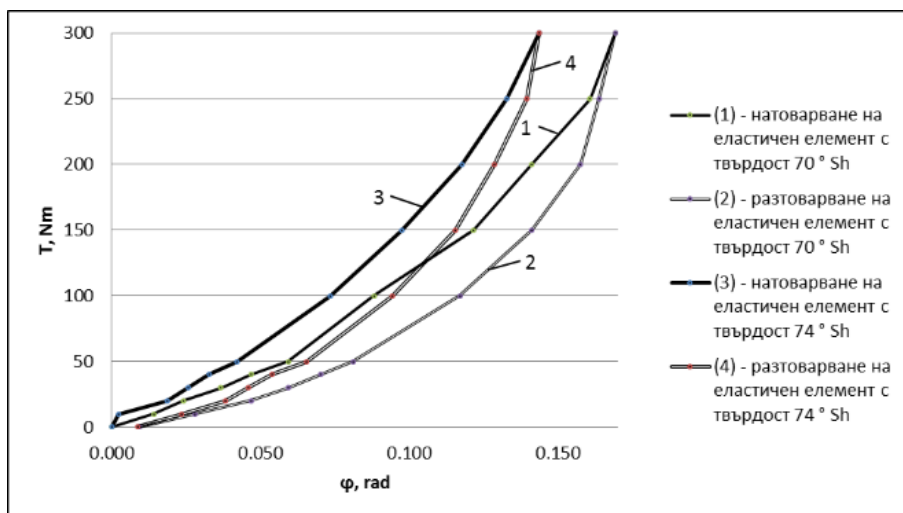
Преместване на водещата спрямо водимата втулка на съединител СЕГМЕ

## Приложение 4



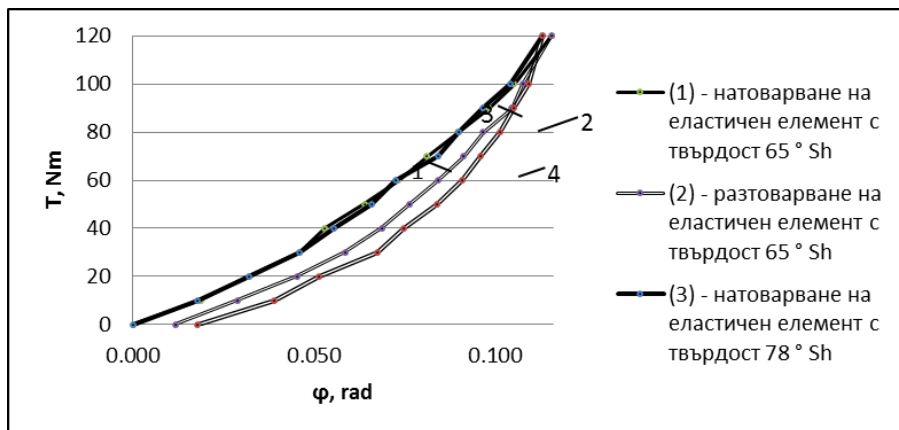
Разпределение на напрежението в еластичния елемент при  $T = 200 \text{ Nm}$

## Приложение 5



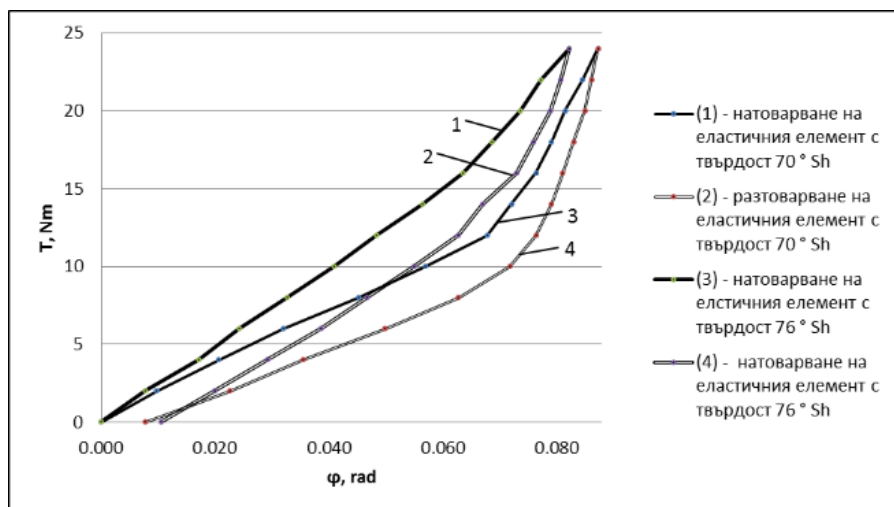
Характеристики на съединител СЕГЕ – 200 при твърдост на еластичния елемент  $74$  и  $70^\circ \text{ Sh}$

## Приложение 6



Характеристики на съединител CEGE – 80 при твърдост на еластичния елемент 78 и 65° Sh

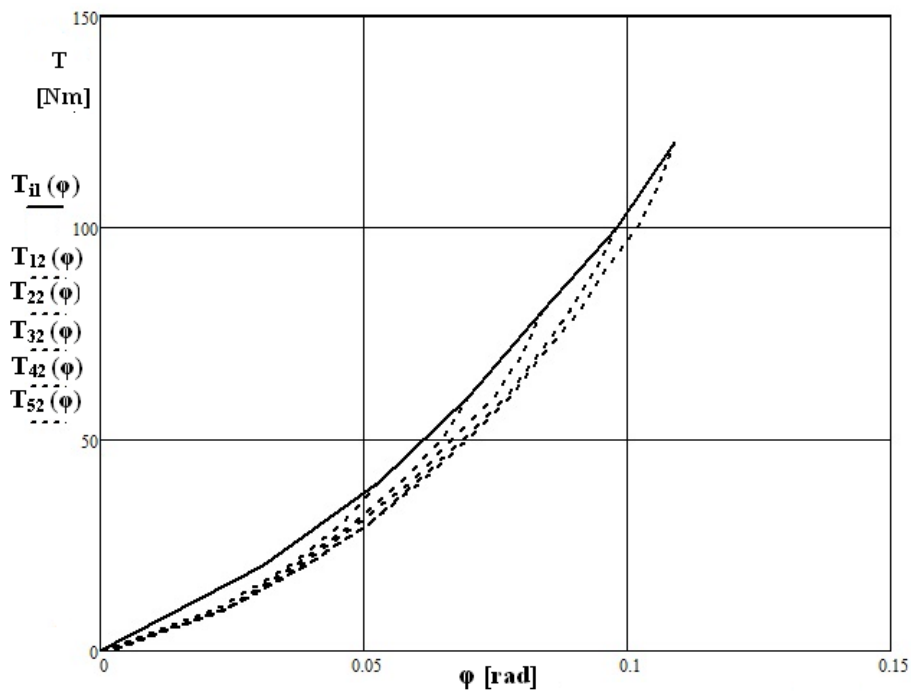
## Приложение 7



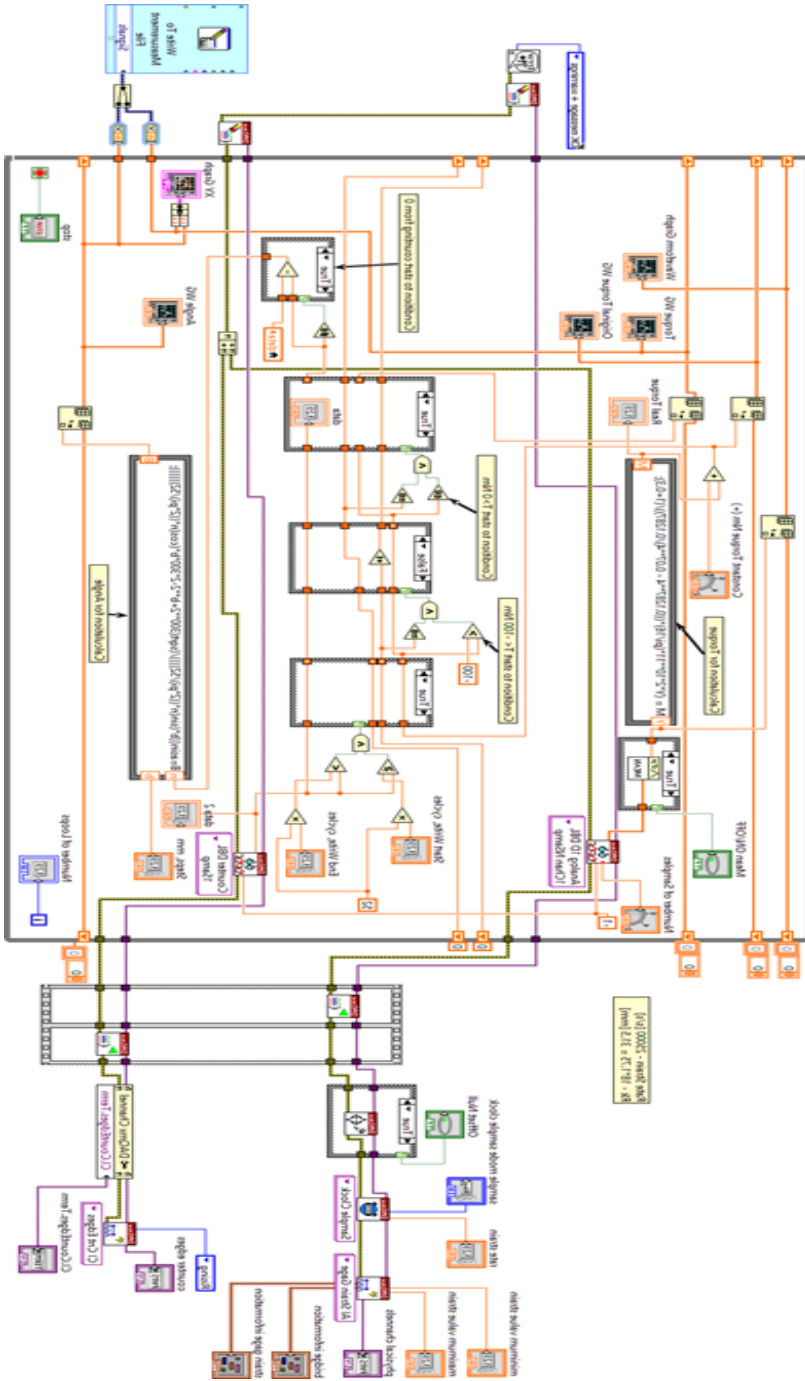
Характеристики на съединител CEGE – 16 при твърдост на еластичния елемент 76 и 70° Sh



## Приложение 8



*Характеристика на съединител SEGE и включените в работната зона части*



Блок схема на програмата за снемане на характеристиката на съединител SEGE