

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Pavao Šibalić

Zagreb, 2009.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Mirko Husnjak

Pavao Šibalić

Zagreb, 2009.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Pavao Šibalić**

Mat. br.: 35991143

Naslov: **ANALIZA MEHANIZMA STAPNOG KOMPRESORA**

Opis zadatka:

Za mehanizam stapnog kompresora za plin Dresser-Rand potrebno je obaviti detaljnu strukturnu, kinematičku i dinamičku analizu. Posvetiti posebnu pozornost na opterećenja za vrijeme rada mehanizma te analizirati statičko i dinamičko opterećenje svih članova mehanizma uključujući radne sile i sile trenja u kinematičkim parovima. Također je potrebno provesti analizu nestacionarnog gibanja mehanizma kod uključenja i isključenja opterećenja. Također je potrebno provjeriti osnovne elemente mehanizma kod opterećenja dinamičkim silama.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:
16. travnja 2009.

Rok predaje rada:
18. lipnja 2009.

Predviđeni datum obrane:
01. – 03. srpnja 2009.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mirko Husnjak

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
SAŽETAK	2
Popis slika	3
Popis tablica	5
Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina	6
Izjava	7
1. UVOD	8
1.1. O mehanizmima	8
1.1.1. Struktura i klasifikacija mehanizama	8
1.1.2. Kinematika mehanizama	9
1.1.3. Dinamika mehanizama	10
2. OPĆENITO O STAPNIM KOMPRESORIMA	11
2.1. Kinematika stapnog mehanizma	13
3. ANALIZA MEHANIZMA ODABRANOG STAPNOG KOMPRESORA	18
3.1. Karakteristike kompresora	18
3.2. Dinamički model i definiranje kinematičkih veza	20
3.2.1. Modeliranje komponenata kompresora	20
3.2.2. Definiranje kinematičkih veza u VisualNastranu 4D	23
3.2.3. Modeliranje pogona	25
3.2.4. Određivanje sila otpora	26
3.2.5. Određivanje sila opterećenja mehanizma uslijed kompresije	26
4. KINEMATIČKA ANALIZA	33
4.1. Pozicije, brzine i ubrzanja članova mehanizma	34
5. DINAMIČKA ANALIZA	37
5.1. Opterećenja koja djeluju na mehanizam	37
5.2. Dinamička analiza mehanizma	37
5.2.1. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min i puštanju plina u $t = 0,3$ s ..	41
5.2.2. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min i puštanju plina u $t = 0,5$ s te zatvaranje ventila kod $t = 1$ s	46
5.2.3. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 950 okr/min i puštanju plina u $t = 0,5$ s ..	51
5.2.4. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min pod punim opterećenjem i isključenje elektromotornog pogona u $t = 0,7$ s uz daljnje komprimiranje plina	55
5.2.5. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min pod punim opterećenjem i isključenje elektromotornog pogona u $t = 0,7$ s uz prestanak komprimiranja plina	59
5.2.6. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min, ubrzanje do 950 okr/min i usporavanje do 745 okr/min	62
6. ANALIZA NAPREZANJA I POMAKA	66
6.1. Proračun naprezanja, pomaka i deformacija pomoću visualNastrana	66
6.2. Naprezanja spojke	66
6.2.1. Analiza dijela spojke koji se spaja na elektromotor	67
6.2.2. Analiza srednjeg dijela spojke	70
7. ZAKLJUČAK	72
LITERATURA	73

SAŽETAK

U ovom radu će se koristeći programski paket visualNastran analizirati kinematika i dinamika mehanizma stapnog kompresora. Također će se provesti analiza naprezanja ključnih dijelova mehanizma koristeći visualNastran pomoću metode konačnih elemenata. Model koji će se analizirati modeliran je u SolidWorksu, programu koji služi za izradu 3D dijelova i sklopova. Proračun sila i tlakova u cilindru izraditi će se pomoću programskog paketa Mathcad.

Provesti će se realna simulacija rada četverocilindarskog, dvostupanjskog, dvoradnog kompresora tipa Dresser-Rand 4RDS-2. Na model će biti postavljena opterećenja kakva djeluju u stvarnim radnim uvjetima kompresora. Da bi se dobilo što realniji prikaz rada kompresora sile trenja će također biti uključene u kinematičke parove.

Prikazati će se više različitih dinamičkih simulacija koje najbolje prikazuju kompresor u dinamičkim uvjetima rada. Svaka će simulacija biti popraćena dijagramima koja prikazuju bitne karakteristike rada kompresora i daju potpuniju sliku ponašanja kompresora u promatranim uvjetima rada.

Osim navedenoga u radu će biti objašnjeni osnovni pojmovi vezani uz mehanizme, kinematiku i dinamiku, kao i pojmovi vezani uz stapne kompresore.

Popis slika

<i>Slika 1. Shema i radni dijagram idealnog stapnog kompresora.....</i>	11
<i>Slika 2. Shema i radni dijagram idealnog stapnog kompresora.....</i>	13
<i>Slika 3. Stapni mehanizam</i>	14
<i>Slika 4. Dijagram puta stapa u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila</i>	14
<i>Slika 5. Dijagram brzine stapa u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila</i>	15
<i>Slika 6. Dijagram ubrzanja stapa u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila</i>	16
<i>Slika 7. DRESSER–RAND 4RDS–2</i>	18
<i>Slika 8. Shematski prikaz kompresora</i>	19
<i>Slika 9. Koljenasto vratilo kompresora</i>	21
<i>Slika 10. Stapajica kompresora</i>	21
<i>Slika 11. Križna glava i stap prvog stupnja (lijevo) i drugog stupnja (desno).....</i>	22
<i>Slika 12. Pokretni dijelovi kompresora.....</i>	24
<i>Slika 13. Karakteristika elektromotornog pogona, moment u ovisnosti o brzini vrtnje</i>	25
<i>Slika 14. Promjena tlaka plina u cilindru sa strane čela (lijevo) i stapne motke (desno).....</i>	27
<i>Slika 15. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa (lijevo) i sila na stap (desno) za prvi stupanj kompresije. Razlika u dijagramu je zbog različitih površina stapa sa strane čela i sa strane stapne motke</i>	32
<i>Slika 16. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa (lijevo) i sila na stap (desno) za drugi stupanj kompresije. Razlika u dijagramu je zbog različitih površina stapa sa strane čela i sa strane stapne motke</i>	32
<i>Slika 17. Prikaz promatranih elemenata u visualNastranu.....</i>	33
<i>Slika 18. Pozicija čela stapa 1</i>	34
<i>Slika 19. Pozicija čela stapa 4</i>	34
<i>Slika 20. Brzina stapa 1</i>	35
<i>Slika 21. Brzina stapa 4</i>	35
<i>Slika 22. Ubrzanje stapa 1</i>	36
<i>Slika 23. Ubrzanje stapa 4</i>	36
<i>Slika 24. Krivulja usisa (lijevo) i kompresije (desno) u visualNastranu</i>	38
<i>Slika 25. Usis i kompresija u visualNastranu – zatvorena krivulja.....</i>	38
<i>Slika 26. Prikaz stapa opterećenog silama u visualNastranu</i>	39
<i>Slika 27. Jednadžba koja definira jednu od sila u visualNastranu.....</i>	39
<i>Slika 28. Momentna karakteristika motora u visualNastranu</i>	40
<i>Slika 29. Prikaz klizača za regulaciju broja okretaja motora</i>	40
<i>Slika 30. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu</i>	41
<i>Slika 31. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora.....</i>	41
<i>Slika 32. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu</i>	42
<i>Slika 33. Povećani detalj pogonskog momenta elektromotora</i>	42
<i>Slika 34. Dijagram momenta na elastičnoj spojci</i>	43
<i>Slika 35. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu.....</i>	43
<i>Slika 36. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu</i>	44
<i>Slika 37. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu.....</i>	44
<i>Slika 38. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu.....</i>	45
<i>Slika 39. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu</i>	46
<i>Slika 40. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora.....</i>	46
<i>Slika 41. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu</i>	47
<i>Slika 42. Povećani detalj pogonskog momenta elektromotora</i>	47

<i>Slika 43. Dijagram momenta na elastičnoj spojci</i>	48
<i>Slika 44. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu</i>	48
<i>Slika 45. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu</i>	49
<i>Slika 46. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu</i>	49
<i>Slika 47. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu</i>	50
<i>Slika 48. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu</i>	51
<i>Slika 49. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora</i>	51
<i>Slika 50. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu</i>	52
<i>Slika 51. Dijagram momenta na elastičnoj spojci</i>	52
<i>Slika 52. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu</i>	53
<i>Slika 53. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu</i>	53
<i>Slika 54. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu</i>	54
<i>Slika 55. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu</i>	55
<i>Slika 56. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu</i>	55
<i>Slika 57. Dijagram momenta na elastičnoj spojci</i>	56
<i>Slika 58. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu</i>	56
<i>Slika 59. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu</i>	57
<i>Slika 60. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu</i>	57
<i>Slika 61. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu</i>	58
<i>Slika 62. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu</i>	59
<i>Slika 63. Povećani detalj pogonskog momenta elektromotora do trenutka $t = 1$ s</i>	59
<i>Slika 64. Povećani detalj momenta na spojci do $t = 5$ s</i>	60
<i>Slika 65. Povećani detalj zakretnog momenta u sredini vratila do $t = 5$ s</i>	60
<i>Slika 66. Povećani detalj reakcija u vezi križne glave i stapajice do $t = 5$ s</i>	61
<i>Slika 67. Povećani detalj reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta do $t = 5$ s</i>	61
<i>Slika 68. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu</i>	62
<i>Slika 69. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora</i>	62
<i>Slika 70. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu</i>	63
<i>Slika 71. Dijagram momenta na elastičnoj spojci</i>	63
<i>Slika 72. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu</i>	64
<i>Slika 73. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu</i>	64
<i>Slika 74. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu</i>	65
<i>Slika 75. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu</i>	65
<i>Slika 76. Oslonci i opterećenja dijela spojke kod elektromotoru</i>	67
<i>Slika 77. Naprezanja na dijelu spojke kod elektromotora</i>	67
<i>Slika 78. Detalj mreže konačnih elemenata oko mjesta opterećenja</i>	68
<i>Slika 79. Raspodjela pomaka</i>	68
<i>Slika 80. Deformirani oblik, deformacija je uvećana 2000 puta</i>	69
<i>Slika 81. Oslonci i opterećenja na srednjem dijelu spojke</i>	70
<i>Slika 82. Naprezanja na dijelu spojke kod elektromotora</i>	70
<i>Slika 83. Raspodjela pomaka</i>	71
<i>Slika 84. Deformirani oblik, deformacija je uvećana 2000 puta</i>	71

Popis tablica

Tablica 1. Osnovni tehnički podaci elektromotora.....25

Popis oznaka i mjernih jedinica fizikalnih veličina

a	m/s^2	ubrzanje
A	m^2	površina stapa
b_0	m	kompresioni prostor
b_s	m	stapaj
d	m	promjer stapne motke
D	m	promjer stapa
f	Hz	frekvencija
F	N	sila
h	m	put
H	m	stapaj
l	m	duljina
M	Nm	moment
n		eksponent adijabate
p	Pa, bar	tlak
P	W	snaga
s	m	položaj stapa
v	m/s	brzina
α	$^\circ, \text{rad}$	kut
η		korisnost
ω	rad/s	kutna brzina

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, koristeći se znanjem stečenim u toku studija, te uz stručnu pomoć mentora prof. dr. sc. Mirka Husnjaka.

Ovim putem bih se zahvalio svom mentoru Mirku Husnjaku što je unatoč manjku vremena ipak pristao na mentorstvo i pomogao mi da privedem studij njegovu kraju.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji što je bila uz mene tijekom studija. Bez njihove podrške i strpljenja bilo bi mi puno teže (vjerojatno i ne moguće) završiti studij.

Također se zahvaljujem svima koji su bili uz mene za vrijeme studija i „gurali“ me da idem naprijed u trenucima kada sam to nisam mogao.

U Zagrebu, 12.06.2009.

Pavao Šibalić

1. UVOD

1.1. O mehanizmima

Riječ mehanizam potječe od grčke riječi mehano, što u prijevodu znači stroj. U literaturi o teoriji strojeva postoji razlika između pojmova *mehanizam* i *stroj*. *Mehanizam* je sustav međusobno povezanih članova koji služi prenošenju gibanja i sila, a *stroj* je skup mehanizama s određenom zajedničkom svrhom.

1.1.1. Struktura i klasifikacija mehanizama

Članovi mehanizma su tijela od kojih je sastavljen neki mehanizam. Oni mogu imati različite geometrijske oblike. U kinematičkim shemama prikazuju se samo one pojedinosti koje su bitne za gibanje mehanizma.

Spoj dvaju članova mehanizma koji omogućuje njihovo relativno gibanje naziva se *kinematičkim parom*. Kinematički par može imati najmanje 1, a najviše 5 stupnjeva slobode gibanja, jer slobodno kruto tijelo u prostoru ima 6 stupnjeva slobode gibanja (3 translacije i 3 rotacije). Kinematički parovi dijele se na *više* i *niže*. Kod viših kinematičkih parova dodir dvaju članova mehanizma odvija se u točki ili liniji, dok se niži kinematički dodiruju u plohi. Radi ispravnog rada kinematičkog para potrebno je osigurati neprekidni dodir njegovih elemenata. To se ostvaruje zatvaranjem kinematičkog para koje se može biti *kinematičko* (geometrijsko) ili *dinamičko*. Kinematičko zatvaranje postiže se konstrukcijskim oblikom kinematičkog para, a dinamičko se ostvaruje silama (težinom, oprugama, silama inercije i sl.).

U mehanizmu članovi se razlikuju po svojoj funkciji. Članovi koji prenose početno gibanje na ostale članove mehanizma nazivaju se *pogonski*. Svi ostali koji ostvaruju gibanje preko pogonskih članova nazivaju se *radni* članovi.

Članove mehanizma možemo podijeliti i s obzirom na gibanje. *Postolje* ili podloga je član koji miruje i prema kojemu se relativno gibaju svi ostali članovi. *Koljeno* je član koji rotira za puni krug i vezano je za postolje. *Klizač* je član koji se klizno giba po podlozi ili po nekom drugom članu. Ako se klizač giba po pomičnom članu naziva se još i kulisnim kamenom, a pomični član kulisom.

1.1.2. Kinematika mehanizama

Definiranjem članova i njihovih veza u mehanizmu dobivamo model u kojem se nakon zadavanja gibanja pogonskog člana mehanizma svi ostali članovi moraju gibati po točno određenim putanjama. To znači da za svaki položaj pogonskog člana mehanizma odgovara točno određeni položaj, brzina i ubrzanja ostalih članova mehanizma.

Opće gibanje krutog tijela u prostoru može se zamisliti sastavljeno od nekoliko osnovnih gibanja. Takva osnovna gibanja (translacija i rotacija oko osi) i neki posebni slučajevi gibanja (ravninsko gibanje, gibanje oko nepomične točke) često se u praksi pokazuju kao jedina gibanja, dok je opće gibanje slobodnog tijela u prostoru rijetkost.

Kinematika proučava gibanje čestice i krutog tijela ne razmatrajući uzroke gibanja. Samo je gibanje promjena položaja tijela u prostoru u tijeku vremena pa su sve kinematičke veličine u općem slučaju funkcije vremena. Temeljni zadatak kinematike je određivanje putanje, brzine i ubrzanja svake točke na tijelu.

Možemo zaključiti da kinematička analiza obuhvaća:

- analizu i *određivanje položaja i putanje* bilo koje točke mehanizma u ovisnosti o vremenu ili položaju pogonskog člana
- određivanje *brzine i ubrzanja* karakterističnih točaka mehanizma tj. promjena brzina i ubrzanja članova modela
- analizu *kutnih brzina i ubrzanja* članova mehanizma u ovisnosti o vremenu ili o položaju vodećeg člana

Pošto se gibanje mehanizma obično ponavlja periodički dovoljno je analizirati kretanje tijela u jednom ciklusu.

1.1.3. Dinamika mehanizama

U *dinamici* se proučavaju međusobni odnosi gibanja tijela i uzroka koji izaziva ta gibanja (sile, momenti).

Sile koje djeluju na mehanizme:

1. *Pogonske sile i momenti* djeluju na pogonske članove mehanizma i obavljaju pozitivni rad za vrijeme gibanja mehanizma ili za vrijeme jednog ciklusa gibanja, kao npr. kod motora s unutrašnjim izgaranjem.
2. *Sile i momenti otpora* obavljaju negativan rad za vrijeme svoga djelovanja ili za vrijeme jednog ciklusa gibanja mehanizma.
3. *Težine članova mehanizma* kao i *sile elastičnih elemenata* mehanizma (opruge). Za puni kinematički ciklus rad ovih sila jednak je nuli (konzervativno polje sila), jer je putanja hvatišta tih sila zatvorena krivulja.
4. *Sile i momenti* koji djeluju na *postolje* mehanizma.
5. *Reakcije među članovima mehanizma* ili sile u kinematičkim parovima. Ove se sile pojavljuju uvijek u parovima jednakih veličina i suprotnih pravaca djelovanja. Normalne komponente tih sila ne obavljaju rad, dok tangencijalne (sile trenja) obavljaju rad koji je pri relativnom gibanju članova mehanizma uvijek negativan.

Dinamička analiza je bliža realnom modelu i ona objedinjuje sve osobine tijela u gibanju (geometrija, masa i inercije članova mehanizma). Za potpunu dinamičku analizu na osnovu poznatih vanjskih sila koje djeluju na model potrebno je odrediti:

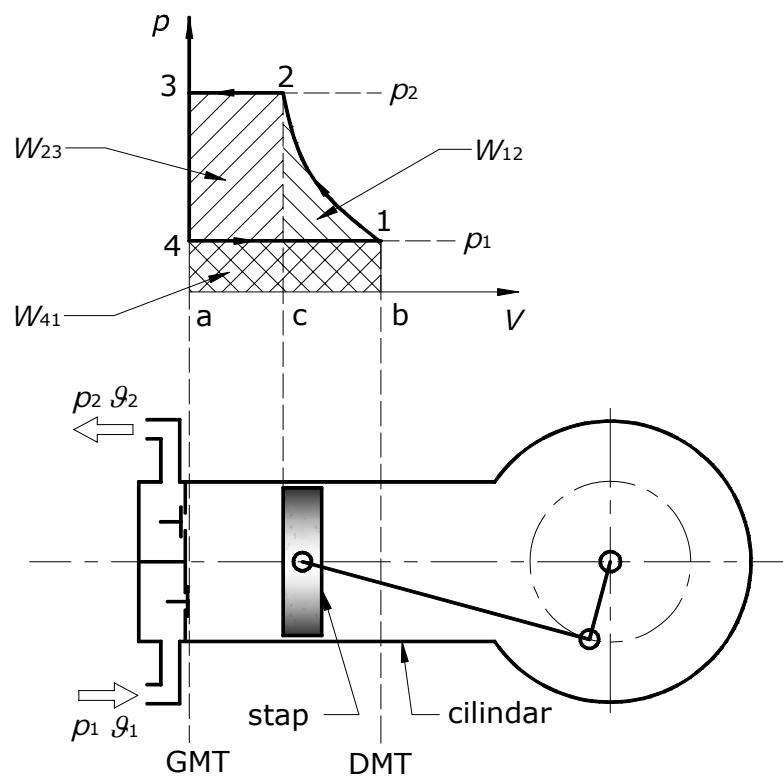
- *pogonsku silu* koja osigurava gibanje mehanizma
- *unutrašnje reakcije* u zglobovima mehanizma
- *sile trenja*, njihov smjer i djelovanje na mehanizam
- *zakon gibanja* svih tijela mehanizma uslijed djelovanja pogonske sile

Za definiranje kinematičkih veza i za modeliranje realnog dinamičkog modela koristio se programski paket *visualNastran 4D* i *SolidWorks*.

2. OPĆENITO O STAPNIM KOMPRESORIMA

Kompresori su strojevi ili uređaji koji stlačivanjem plinovima ili parama povisuju energetska razinu, tj. dovode ih u energetski vrednije stanje. Ovo je općenita definicija za sve vrste kompresora, koji se prema konstrukcijskoj izvedbi dijele na stapne, turbokompresore i mlazne kompresore. Pošto se u ovom radu govori o stapnom kompresoru s oscilirajućim stapom (u daljnjim razlaganjima će se koristiti skraćeni naziv – stapni kompresor ili samo kompresor) definiciju će se prilagoditi pa se može reći da je stapni kompresor stroj koji kretanjem stapa unutar cilindra dobavlja plinove iz prostora nižeg pritiska u prostor višeg pritiska pri čemu se plinu za vrijeme kompresije povećava temperatura i smanjuje specifični volumen.

Idealni kompresor siše plin pod niskim tlakom p_1 iz beskonačno velikog spremnika i tlači ga u beskonačno veliki spremnik gdje vlada viši tlak p_2 (slika 1). Pri tome se stap giba unutar cilindra između dva krajnja položaja – gornje mrtve točke (GMT) i donje mrtve točke (DMT). U poklopcu cilindra se nalaze ventili koji omogućuju da plin u određenom trenutku uđe, odnosno izađe u cilindra. Taj proces se u termodinamici naziva stalnotlačni proces. Kod idealnog kompresora taj se ciklus sastoji od tri faze: *usisavanja*, *kompresije* i *istiskivanja*.



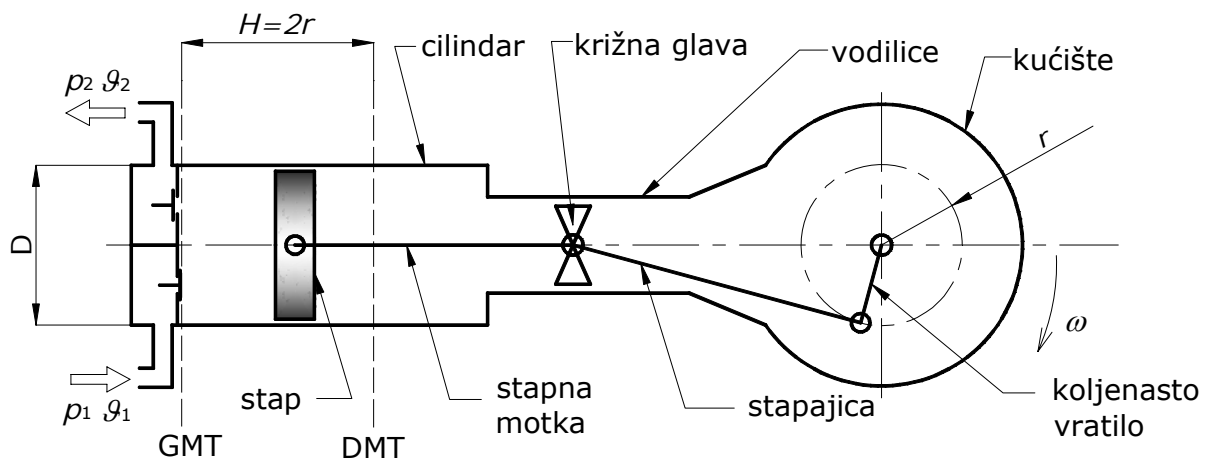
Slika 1. Shema i radni dijagram idealnog stapnog kompresora

Neka se stap nalazi u GMT, tik uz poklopac cilindra, tako da između poklopca cilindra i stapa nema niti malo plina. Kretanjem stapa prema DMT počinje se povećavati obujam cilindra od najmanje vrijednosti $V_4 = 0$ prema maksimalnoj V_1 koja se postiže kada stap dođe u DMT. Pri tome stap ostvaruje usisno djelovanje puneći cilindar plinom stalnog tlaka p_1 i temperature ϑ_1 kroz usisni ventil koji je otvoren tijekom cijelog puta stapa od GMT do DMT. Ta se faza rada naziva usisavanje.

U trenutku kada stap dođe u DMT i krene prema GMT zatvara se usisni ventil te usisani plin ostaje zarobljen u prostoru cilindra koji se sada gibanjem stapa smanjuje. Zbog smanjenja volumena dolazi do povišenja tlaka (kompresije) u cilindru, a istodobno do porasta temperature plina. Kompresija traje sve dok se u cilindru ne postigne tlak p_2 kakav vlada u tlačnom spremniku. U tom se trenutku otvara tlačni ventil pa se daljnjim gibanjem stapa prema GMT odvija istiskivanje plina iz cilindra u tlačni vod pri konstantnom tlaku. Istiskivanje traje sve dok stap ne dođe u GMT pri čemu su istisnute sve čestice plina koje su usisane u cilindar.

Ponovnom promjenom smjera gibanja stapa zatvara se tlačni, a otvara usisni ventil te usisavanjem počinje novi radni ciklus. Ovakav radni ciklus idealnog kompresora koji se sastoji od usisavanja, kompresije i istiskivanja periodički se ponavlja. Dobro je naglasiti da to nije termodinamički kružni proces, za kakav su potrebne najmanje tri različite promjene stanja zatvorenog sustava. Kao što se može vidjeti, u prikazanom ciklusu jedina promjena stanja je kompresija, dok su usisavanje i istiskivanje otvoreni procesi transporta plina pri stalnom tlaku.

Potrebno je odrediti i objasniti neke osnovne pojmove koji se odnose na stapni kompresor. Na slici 2 shematski je prikazan jednostavan stapni kompresor sa *križnom glavom*.



Slika 2. Shema i radni dijagram idealnog stapnog kompresora

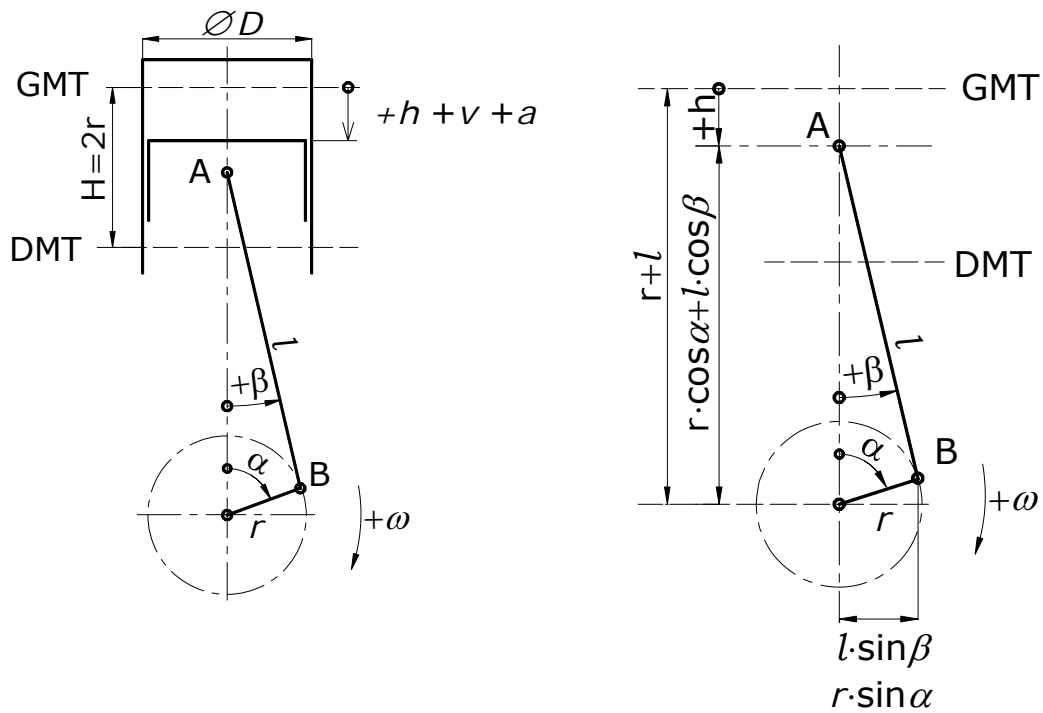
Unutar cilindra kružnog poprečnog presjeka promjera D giba se *stap* gonjen stapnim mehanizmom čiji su osnovni dijelovi *stapajica* i *koljenasto vratilo*. U ovom slučaju je stapni mehanizam dopunjen križnom glavom koja je sa stapom povezana *stapnom motkom*. Koljenasto vratilo se okreće, gonjeno nekim pogonskim strojem, kutnom brzinom ω oko središnje osi u kućištu kompresora. Mehanizam na slici 1 kao i ovaj sa križnom glavom imaju istu kinematiku, pošto se i stap i križna glava kreću isto, pravocrtno.

2.1. Kinematika stapnog mehanizma

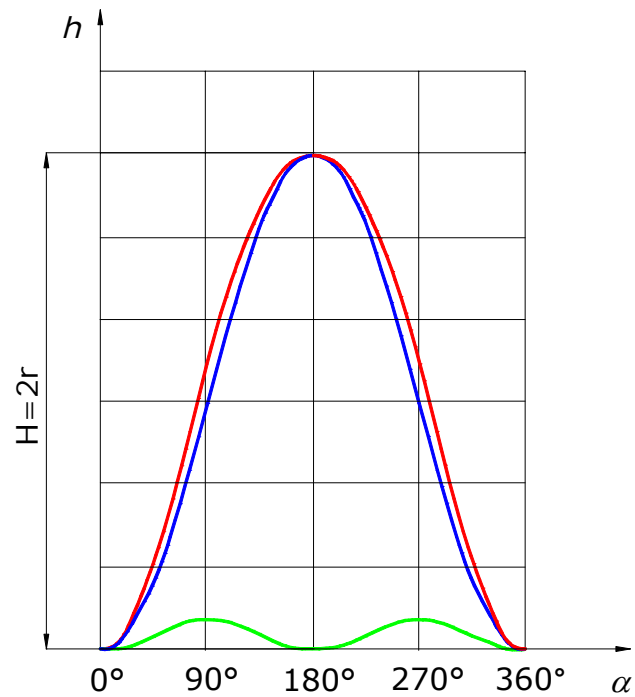
Detaljna razmatranja zahtjevaju upoznavanje s veličinama označenim na slici 3 i njihovu definiciju:

- *Kutna brzina koljenastog vratila* - ω označuje kut pomaka rukavca koljenastog vratila izražen u radijanima za vrijeme jedne sekunde.
- *Broj okretaja koljenastog vratila* - n označuje broj okretaja koljenastog vratila u jednoj sekundi. Kutna brzina i broj okretaja vezani su jednadžbom: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$
- *Kut pomaka rukavca koljenastog vratila* od položaja u kojem je stap u GMT, α
- *Kut pomaka stapajice* od osi cilindra - β
- *Put stapa* jednak je njegovom pomaku od GMT do DMT i označen je sa H
- *Odnos polumjera* na kojem se kreće rukavac, r , i duljine stapajice, l : $\lambda = \frac{r}{l}$

Konvencija o pozitivnim predznacima definirana je slikom 3.



Slika 3. Stepni mehanizam



Slika 4. Dijagram puta stapa u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila

Konačni pojednostavljeni izraz za put stapa ima oblik:

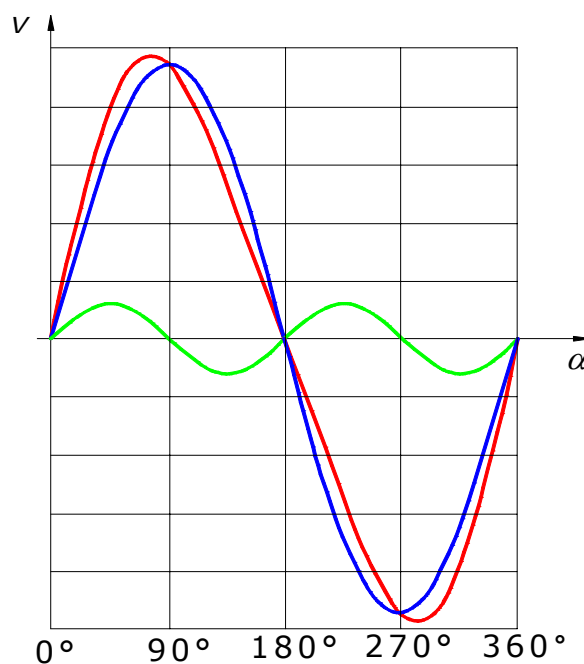
$$h = r \cdot \left[(1 - \cos \alpha) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right]$$

Dijagram puta stapa (h) u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila (α) prikazan je na slici 4, crvenom bojom je prikazan put stapa, plavom bojom je prikazan dio jednadžbe puta stapa $\frac{r \cdot \lambda}{4} (1 - \cos 2\alpha)$, a zelenom bojom dio jednadžbe $r \cdot (1 - \cos \alpha)$.

Derivacijom jednadžbe puta stapa (h) po vremenu (t), dobiva se izraz za brzinu stapa (v). Ako uzmemo u obzir da je kutna brzina $\omega = \frac{d\alpha}{dt}$ dobivamo izraz za brzinu stapa:

$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{dh}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = r \cdot \omega \cdot \left(\sin \alpha + \frac{\lambda}{2} \sin 2\alpha \right)$$

Dijagram brzine stapa u ovisnosti o kutu pomaka koljenastog vratila prikazan je na slici 5.



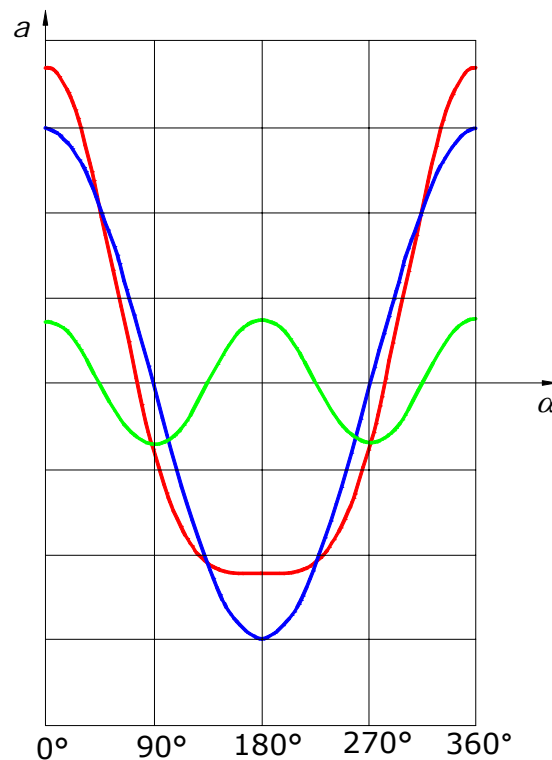
Slika 5. Dijagram brzine stapa u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila

Na slici 5 crvenom bojom je prikazana brzina stapa, plavom bojom je prikazan dio jednadžbe za brzinu stapa $r \cdot \omega \cdot \sin \alpha$, a zelenom bojom dio jednadžbe $\frac{r \cdot \omega \cdot \lambda}{2} \sin 2\alpha$. Maksimalna brzina stapa, ako se uzme u obzir prvi član, iznosi $v_{\max} = r \cdot \omega$.

Derivacijom jednadžbe brzine po vremenu dobivamo izraz za ubrzanje stapa:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = r \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda \cos 2\alpha)$$

Dijagram ubrzanja u ovisnosti o kutu pomaka koljenastog vratila prikazan je na slici 6.



Slika 6. Dijagram ubrzanja stapa u ovisnosti o kutu pomaka rukavca koljenastog vratila

Na slici 6 crvenom bojom je prikazano ubrzanje stapa, plavom bojom je prikazan dio jednadžbe za ubrzanje stapa $r \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha$, a zelenom bojom je prikazan dio jednadžbe $r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos 2\alpha$. Može se uočiti da ubrzanja u GMT i DMT nisu ista ni po smjeru ni po veličini. Odnos apsolutnih vrijednosti ubrzanja iznosi:

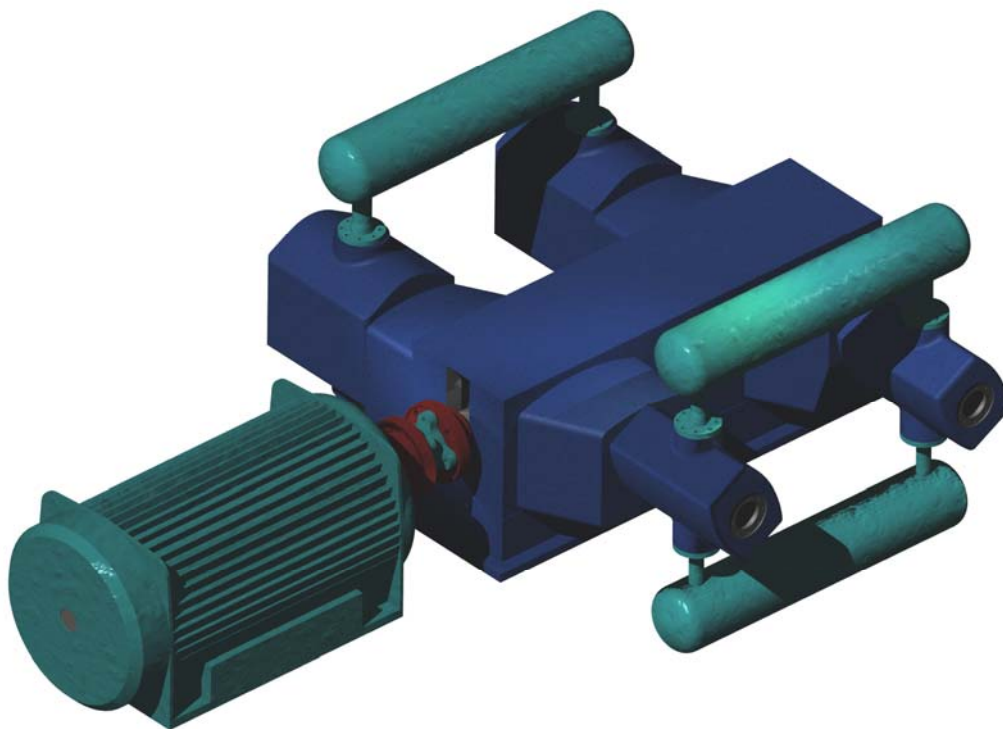
$$\left| \frac{a_{GMT}}{a_{DMT}} \right| = \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda}$$

Točno prikazivanje kinematike stapnog mehanizma tj. zakona kretanja stapa, odnosno puta, brzine i ubrzanja, moguće je uz pomoć razvoja u red s beskonačno mnogo članova. Za praktična razmatranja dovoljno je uzeti u obzir prva dva člana, što je u izvedenim jednadžbama i učinjeno. Pri tome je nastala mala greška.

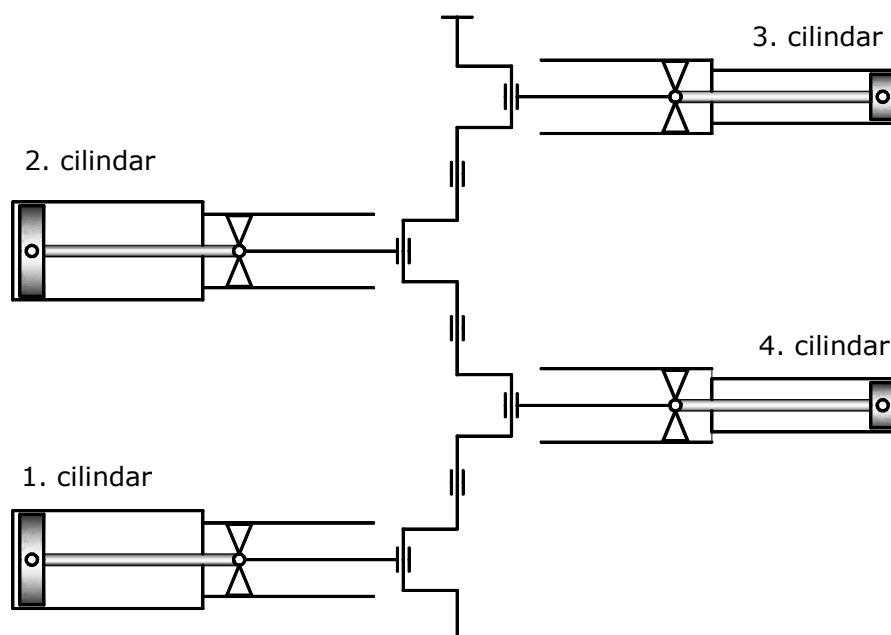
3. ANALIZA MEHANIZMA ODABRANOG STAPNOG KOMPRESORA

3.1. Karakteristike kompresora

Odabran je kompresor *DRESSER–RAND 4RDS–2* (slika 5). kompresor *DRESSER–RAND 4RDS–2* je *dvostupanjski* kompresor koji se koristi za komprimiranje plina na tlak od 47 bara s usisnog tlaka koji varira između 3 i 4 bara. Komprimiranje se provodi u 2 stupnja, u prvom stupnju se plin komprimira na tlak od 13 do 14 bara, a u drugom se komprimira na konačnih 45 do 47 bara. Kompresor ima *četiri dvoradna* cilindra, po dva za pojedini stupanj kompresije. Za pogon se koristi elektromotor tipa 8ATJ 505–08 firme Končar.



Slika 7. DRESSER–RAND 4RDS–2



Slika 8. Shematski prikaz kompresora

Osnovne karakteristike kompresora DRESSER-RAND 4RDS-2:

- hod stapa139,7 mm
- promjer stapa 1.....292,1 mm
- promjer stapa 2.....152,4 mm
- promjer stapne motke.....53,98 mm
- duljina koljenastog vratila.....2550 mm
- promjer koljenastog vratila.....171,45 mm
- duljina stapne motke.....600 mm
- duljina stapajice.....541 mm
- masa koljenastog vratila806 kg
- masa stapajice.....78 kg
- gabariti bez motora.....3000 x 2600 mm
- gabariti sa motorom.....3000 x 5150 mm

3.2. Dinamički model i definiranje kinematičkih veza

Proces modeliranja dinamičkog modela izvršen je u nekoliko faza:

- modeliranje pojedinih komponenata kompresora
- izrada kinematičkog i dinamičkog modela
- analiza modela

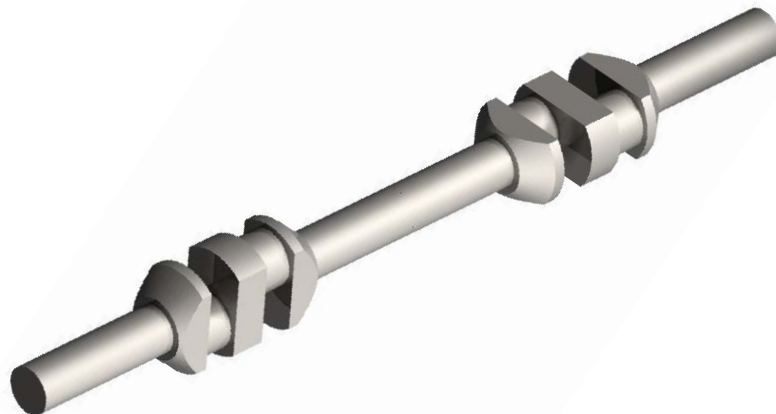
3.2.1. Modeliranje komponenata kompresora

Pojedine komponente kao i sklopni model izrađeni su u programskom paketu SolidWorks. Osim geometrije definirane su i mase komponenata, kod dinamičkog modela bitno je poznavati mase komponenata radi određivanja težišta i dinamičkih momenata inercije.

Mjere potrebne za definiranje geometrije komponenata kompresora dobivene su mjerenjem geometrije dijelova rastavljenog kompresora i podacima koji su dostupni u priručniku za održavanje (Service manual – Ingersoll-Rand).

Bitna je samo točna geometrija elemenata koji se gibaju, a za komponente koji se gibaju translatorno (stap, stapno motka, križna glava) bitna je samo masa.

Stapajica, koljenasto vratilo i dijelovi spojke prilično su točno modelirani s obzirom na to da su bili dostupni.

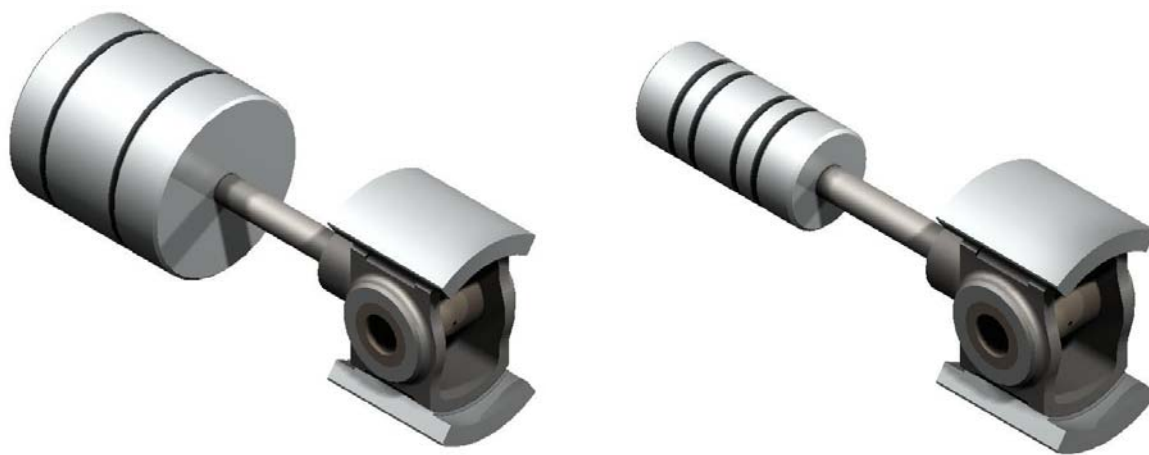


Slika 9. Koljenasto vratilo kompresora

Koljenasto vratilo je radi mjerenja momenta modelirano iz dva dijela i spojeno krutom vezom. Na ovaj način može se očitati moment u sredini vratila.



Slika 10. Stapajica kompresora



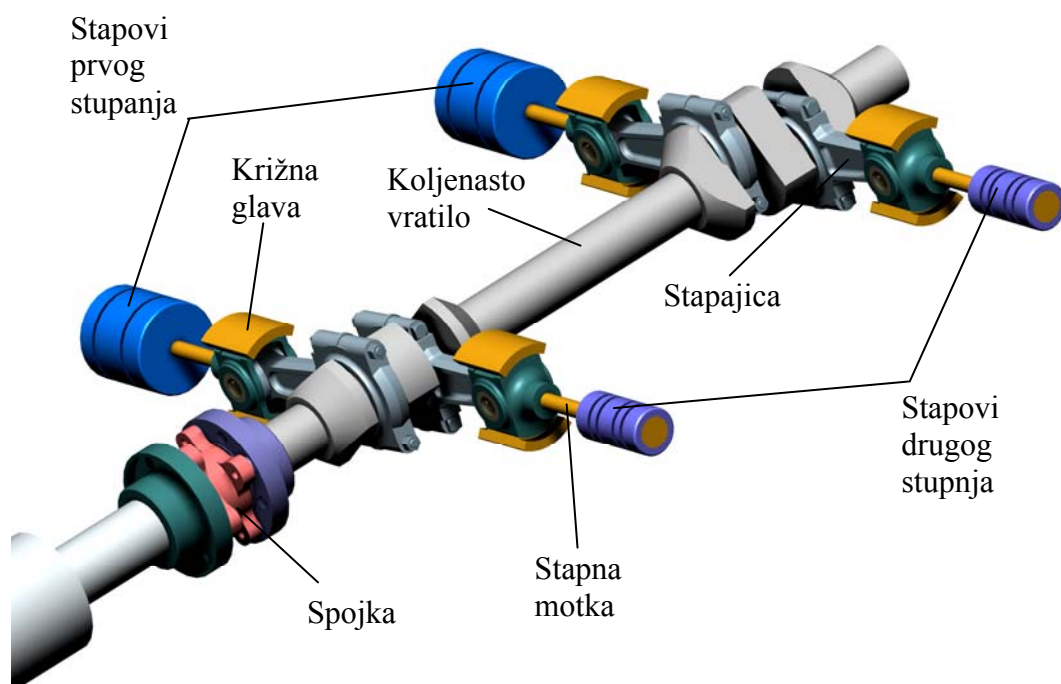
Slika 11. Križna glava i stap prvog stupnja (lijevo) i drugog stupnja (desno)

3.2.2. Definiranje kinematičkih veza u VisualNastranu 4D

U programskom paketu visualNastran 4D definirane su kinematičke veze među članovima mehanizma. VisualNastran je povezan sa SolidWorksom u kojem je modeliran kompresor, tako da je većinu kinematičkih veza automatski prepoznao i preuzeo iz njega (u SolidWorksu su odnosi među tijelima definirani kod sastavljanja sklopnog modela).

Kod povezivanja SolidWorksa i visualNastrana sve odnose između spojenih površina (coincidente, concentric, paralele, perpendicular) iz SolidWorksa visualNastran je prepoznao kao veze odnosno *constraints* (eng. ograničenje). Postoji više vrsta veza od kojih su najčešće korištene *Revolute Joint* koji dozvoljava rotaciju oko jedne osi, *Rigid Joint* koji definira čvrstu vezu bez mogućnosti rotacije ili translacije, te *Rigid Joint on slot* koji dozvoljava translaciju po jednoj osi. Moguće je odabrati i motorni pogon, zupčanike, opruge i sl.

Čvrstom vezom je povezano koljenasto vratilo koje je sastavljeno iz dva dijela. Na taj način moguće je očitati moment koji djeluje na tom presjeku vratila, odnosno na sredini vratila. Istom vrstom veze definirani su elementi spojke, spoj između priрубnice spojke i koljenaste osovine na strani kompresora, te spoj između spojke i vratila motora. Kućište nema utjecaja na rezultat pa je radi toga pojednostavljeno.



Slika 12. Pokretni dijelovi kompresora

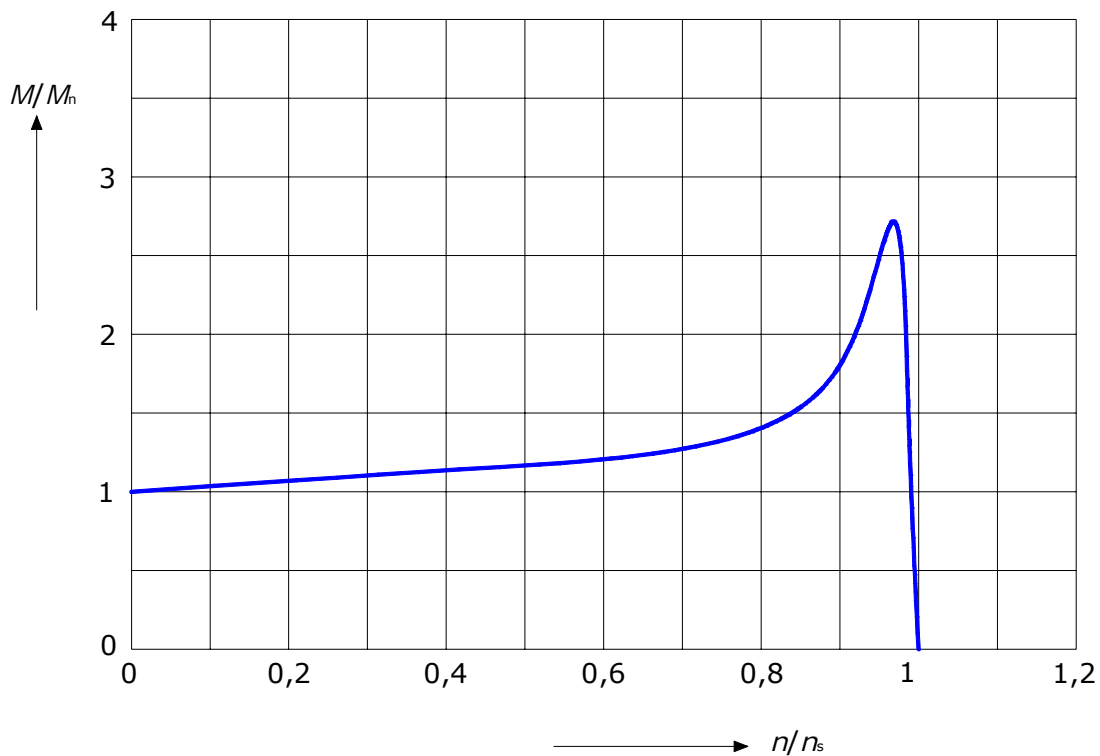
Nakon povezivanja članova mehanizma potrebno je definirati pogon, opterećenja i otpore gibanja.

3.2.3. Modeliranje pogona

Modeliran je jednostavan dinamički model rotora koji odgovara osnovnim podacima koji su dobiveni od proizvođača. Moment inercije rotora oko osi rotacije iznosi $J_0 = 76 \text{ kgm}^2$ glavni je podatak koji je korišten pri modeliranju. Za pogon se koristi elektromotor tipa 8ATJ 505–08 firme Končar.

Snaga	kW	630
Napon	V	690
Struja	A	643
Frekvencija	Hz	50 – 63,3
Brzina vrtnje	1/min	745 – 950

Tablica 1. Osnovni tehnički podaci elektromotora



Slika 13. Karakteristika elektromotornog pogona, moment u ovisnosti o brzini vrtnje

Snaga elektromotora ovisi o momentu i kutnoj brzini:

$$P_n = M_n \cdot \omega$$

Tako iz momentne karakteristike, uz nominalni zakretni moment

$$M_n = \frac{P_n}{\omega} = \frac{630000}{78,016} = 8075 \text{ Nm}$$

slijedi da je maksimalni zakretni moment:

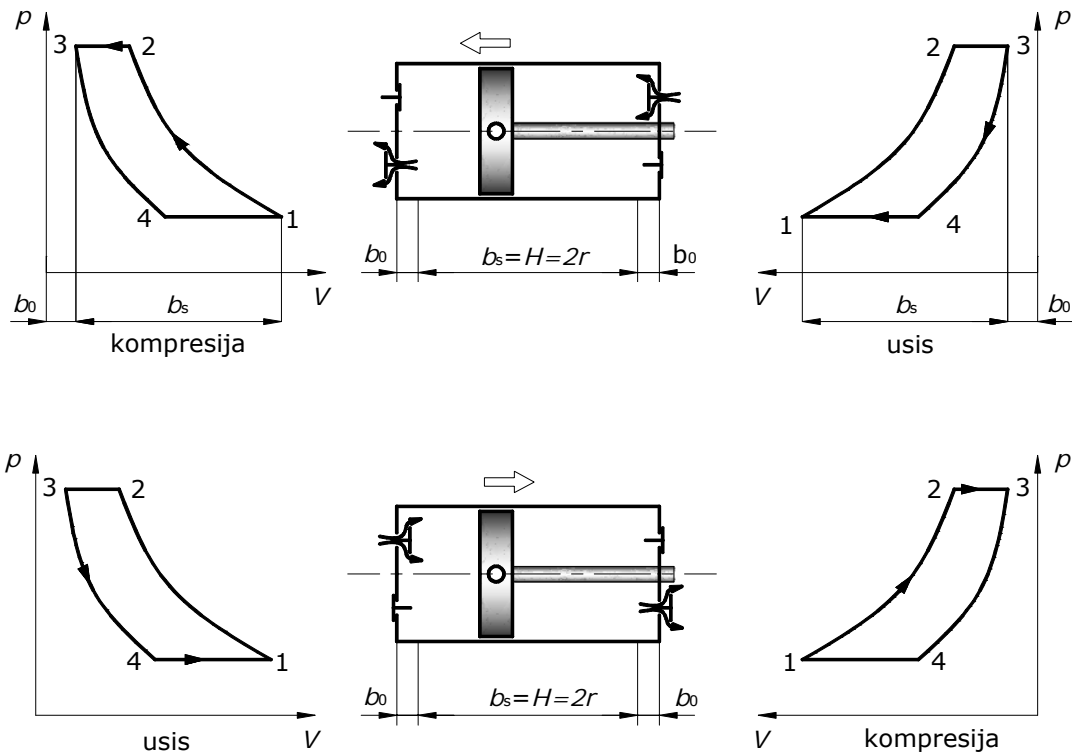
$$M_{\max} = 2,7 \cdot M_n = 2,7 \cdot 8075 = 21800 \text{ Nm}$$

2.3.4. Određivanje sila otpora

Sile otpora su definirane tako da je uzeto u obzir trenje između stapa i križne glave s cilindrima i vodilicama. Ostali gubici trenja su uzeti u obzir tako da djeluju na koljenasto vratilo kao prigušenje. Iznos tih gubitaka je 2% od nominalnog zakretnog momenta pri 950 okr/min.

2.3.5. Određivanje sila opterećenja mehanizma uslijed kompresije

Kompresor je *dvoradni*, što znači da komprimira plin sa obje strane stapa. Sile uslijed kompresije djeluju na obje strane stapa. Sila sa strane stapne motke je manja nego sa strane čela zbog manje površine na kojoj djeluje tlak kompresije. Razlika između ove dvije sile nije zanemariva i uzeti će se u obzir.



Slika 14. Promjena tlaka plina u cilindru sa strane čela (lijevo) i stapne motke (desno)

Proračun tlakova u cilindru i radova potrebnih za pokretanje kompresora izveden je u programskom paketu *Mathcad*, koji osim rješavanja kompliciranih jednažbi ima mogućnost kreiranja dijagrama na temelju dobivenih rezultata.

Proračun glavnih vrijednosti tlakova i položaja stapa prikazani su jednažbama:

Prvi stupanj kompresije

$$b_s = 139,7 \text{ mm} - \text{stapaj, hod stapa od DMT do GMT}$$

$$s_1 = b_s + b_0 = 139,7 + 47,498 = 187,198 \text{ mm}$$

$$s_2 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_1 = 66,72 \text{ mm}$$

$$s_3 = b_0 = 47,498 \text{ mm}$$

$$s_4 = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_3 = 133,26 \text{ mm}$$

Kompresioni prostor:

$$b_0 = 0,34 \cdot b_s = 47,498 \text{ mm}$$

Eksponent adijabate:

$$n = 1,3$$

Promjer stapa:

$$D_1 = 292,1 \text{ mm}$$

Površina stapa:

$$A_1 = \frac{D_1^2 \cdot \pi}{4} = 6,701 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Promjer stapne motke:

$$d_1 = 53,98 \text{ mm}$$

Površina stapa na strani stapne motke:

$$A_{1s} = \frac{(D_1^2 - d_1^2) \cdot \pi}{4} = 6,472 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Usisni tlak:

$$p_4 = 3,4 \text{ atm}; p_1 = p_4$$

Tlak kompresije:

$$p_2 = 13 \text{ atm}; p_3 = p_2$$

Sile na početku kompresije:

Sa strane čela stapa:

$$F_1 = p_1 \cdot A_1 = 22784 \text{ N}$$

Na strani stapne motke:

$$F_{1s} = p_1 \cdot A_{1s} = 22005 \text{ N}$$

Sile na kraju kompresije:

Sa strane čela stapa:

$$F_3 = p_3 \cdot A_1 = 87113 \text{ N}$$

Na strani stapne motke:

$$F_3 = p_3 \cdot A_{1s} = 84136 \text{ N}$$

Drugi stupanj kompresije

$$b_s = 139,7 \text{ mm}$$

$$s_1 = b_s + b_0 = 139,7 + 44,704 = 184,404 \text{ mm}$$

$$s_2 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_1 = 64,52 \text{ mm}$$

$$s_3 = b_0 = 44,704 \text{ mm}$$

$$s_4 = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_3 = 127,77 \text{ mm}$$

Kompresioni prostor:

$$b_0 = 0,32 \cdot b_s = 44,704 \text{ mm}$$

Eksponent adijabate:

$$n = 1,3$$

Promjer stapa:

$$D_2 = 152,4 \text{ mm}$$

Površina stapa:

$$A_2 = \frac{D_2^2 \cdot \pi}{4} = 1,824 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Promjer stapne motke:

$$d_2 = 53,98 \text{ mm}$$

Površina stapa na strani stapne motke:

$$A_{2s} = \frac{(D_2^2 - d_2^2) \cdot \pi}{4} = 1,595 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Usisni tlak:

$$p_4 = 12 \text{ atm}; p_1 = p_4$$

Tlak kompresije:

$$p_3 = 47 \text{ atm}; p_3 = p_2$$

Sile na početku kompresije:

Sa strane čela stapa:

$$F_1 = p_1 \cdot A_2 = 21888 \text{ N}$$

Na strani stapne motke:

$$F_{1s} = p_1 \cdot A_{2s} = 19140 \text{ N}$$

Sile na kraju kompresije:

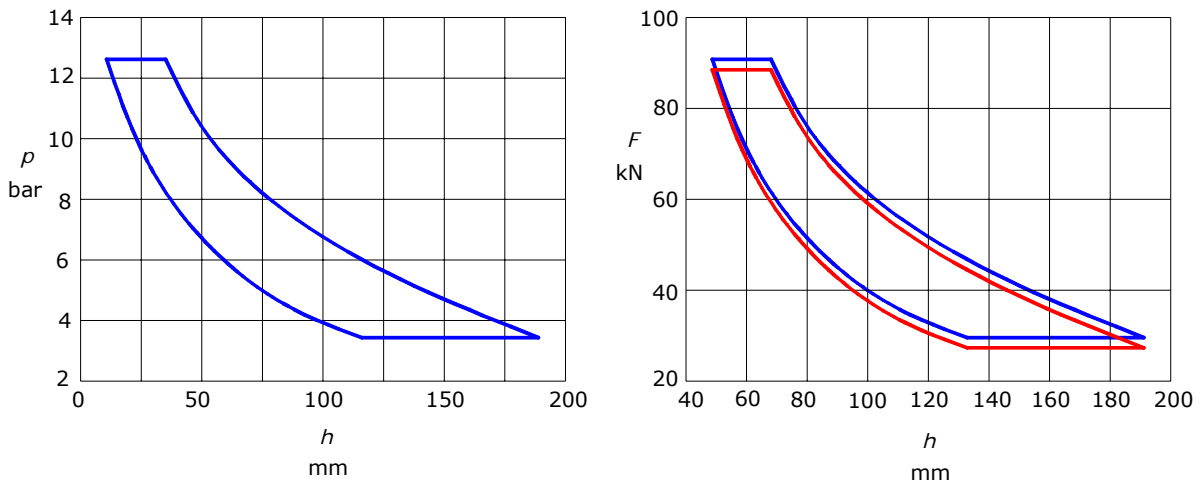
Sa strane čela stapa:

$$F_3 = p_3 \cdot A_2 = 85728 \text{ N}$$

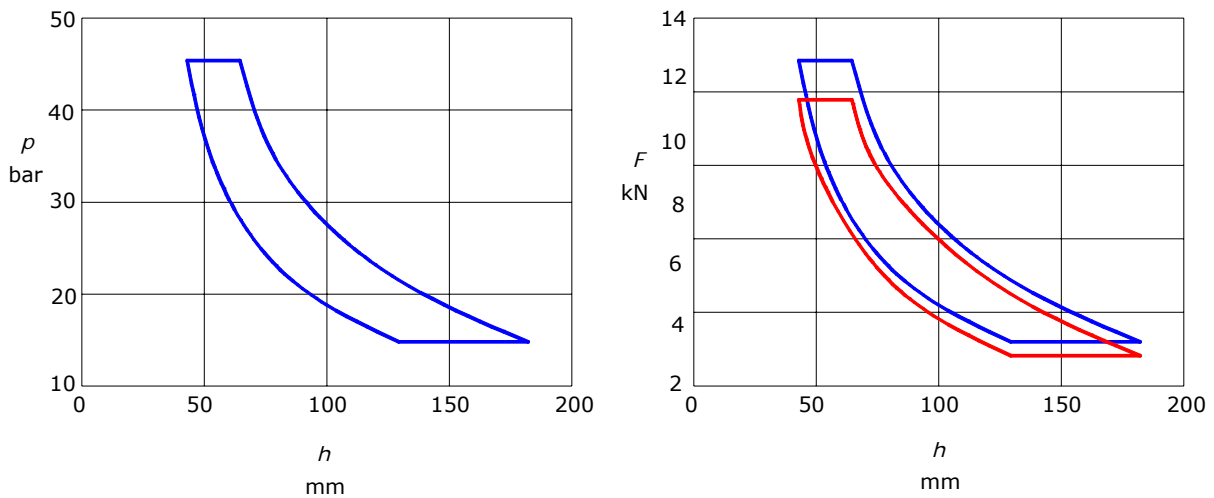
Na strani stapne motke:

$$F_3 = p_3 \cdot A_{2s} = 74965 \text{ N}$$

Potpuniji proračun nalazi se u prilogu.



Slika 15. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa (lijevo) i sila na stap (desno) za prvi stupanj kompresije. Razlika u dijagramu je zbog različitih površina stapa sa strane čela i sa strane stapne motke

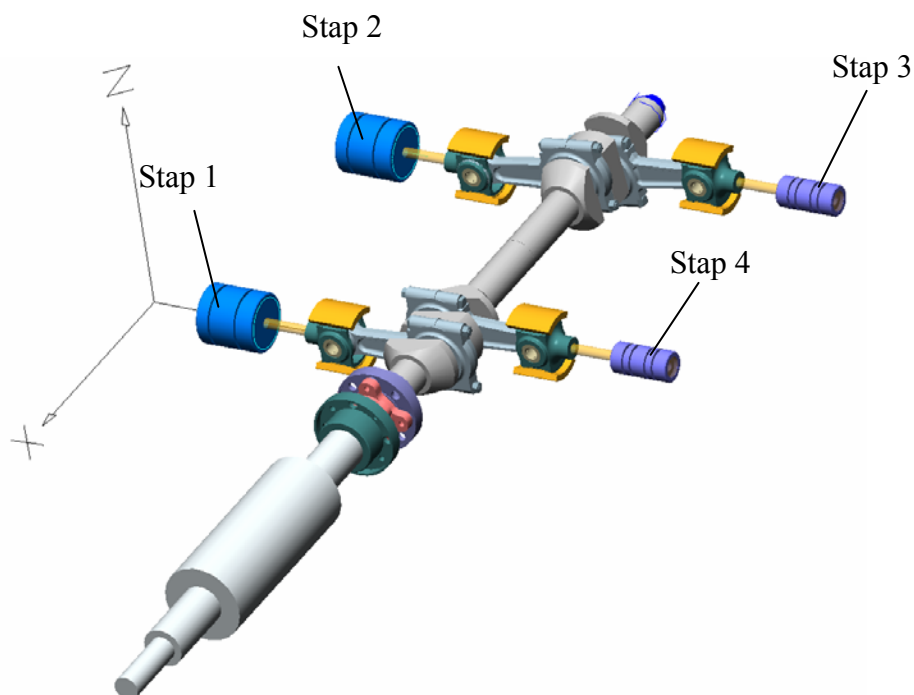


Slika 16. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa (lijevo) i sila na stap (desno) za drugi stupanj kompresije. Razlika u dijagramu je zbog različitih površina stapa sa strane čela i sa strane stapne motke

4. KINEMATIČKA ANALIZA

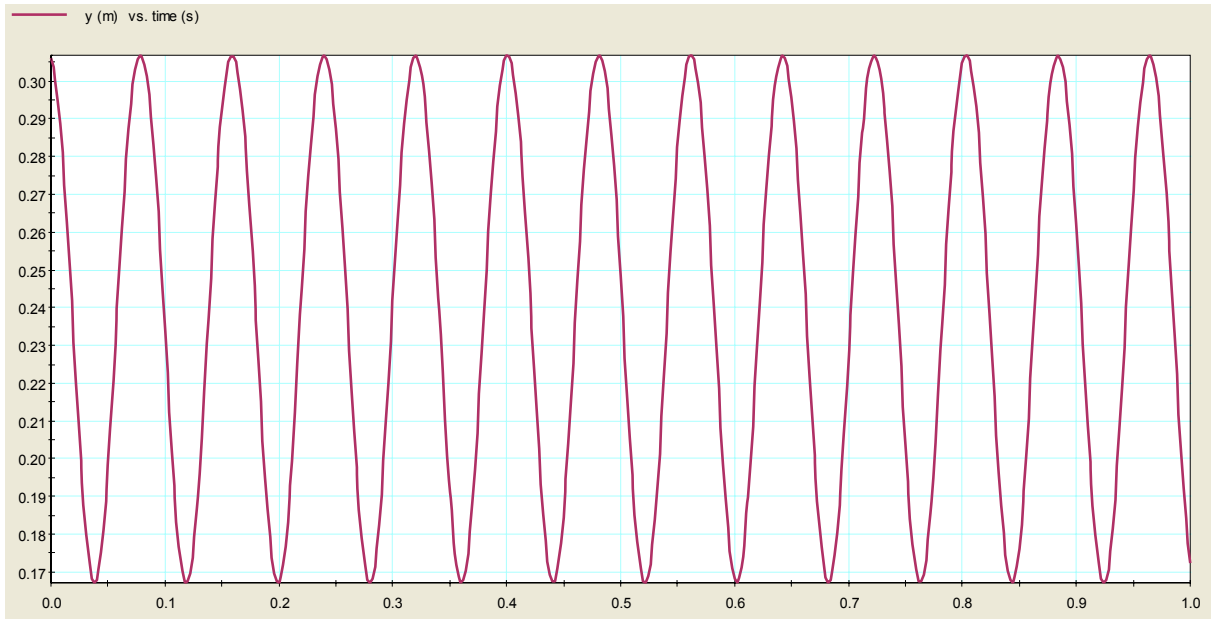
Mehanizam stapnog kompresora se promatrao pri konstantnom broju okretaja elektromotora od 745 okr/min, a promatrao se položaj, brzina i ubrzanje stapova 1 i 4. Pošto je zadatak kinematike proučavanje gibanja, na članove mehanizma nisu djelovale sile niti su se javljali gubici koji bi mogli utjecati na gibanje mehanizama. Vrijeme trajanja simulacije iznosi 1 s, a trajanje ciklusa je 0,8 s.

Položaj stapova je izražen u metrima, brzina gibanja stapova u m/s a ubrzanja u m/s^2 . Vrijeme je izraženo u sekundama.

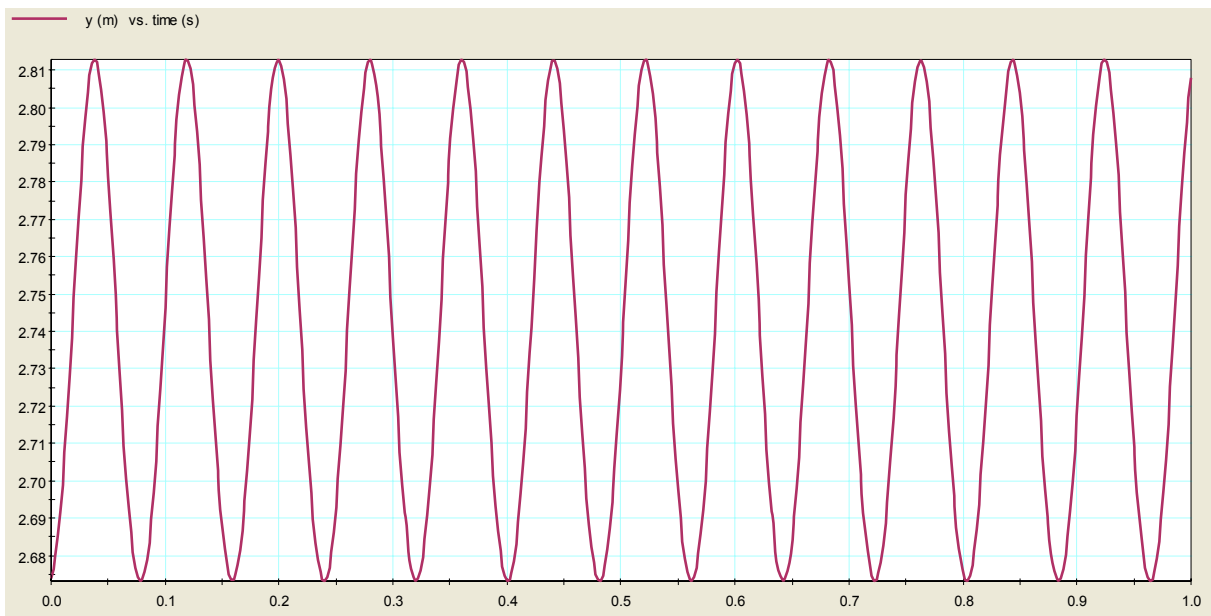


Slika 17. Prikaz promatranih elemenata u visualNastranu

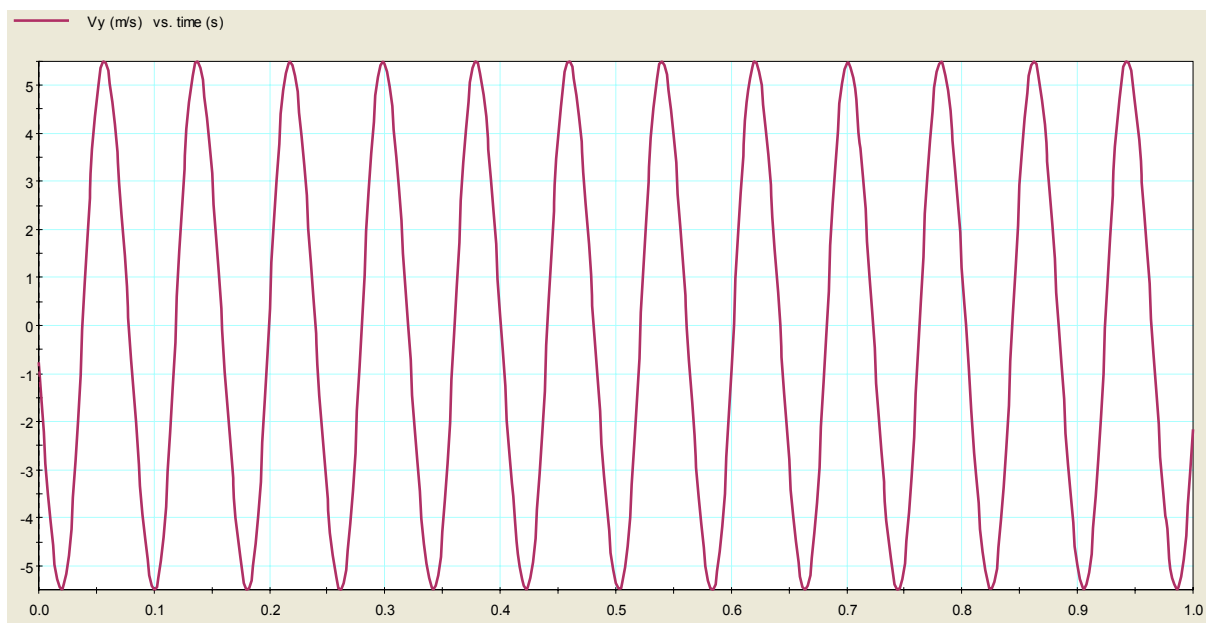
4.1. Pozicije, brzine i ubrzanja članova mehanizma



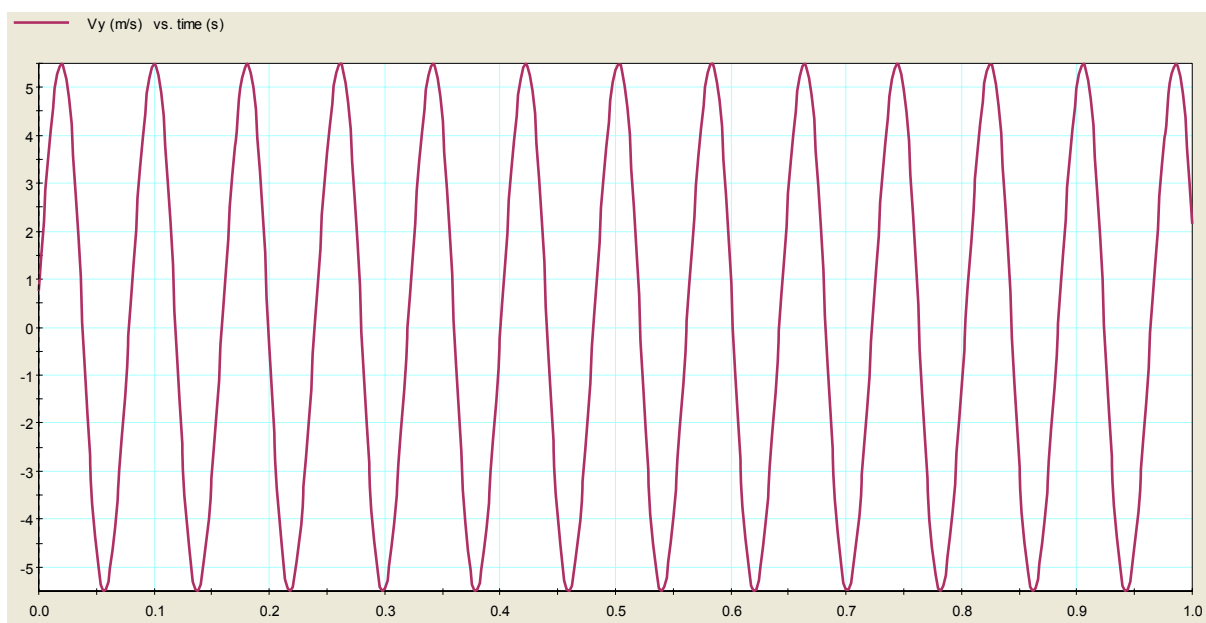
Slika 18. Pozicija čela stapa 1



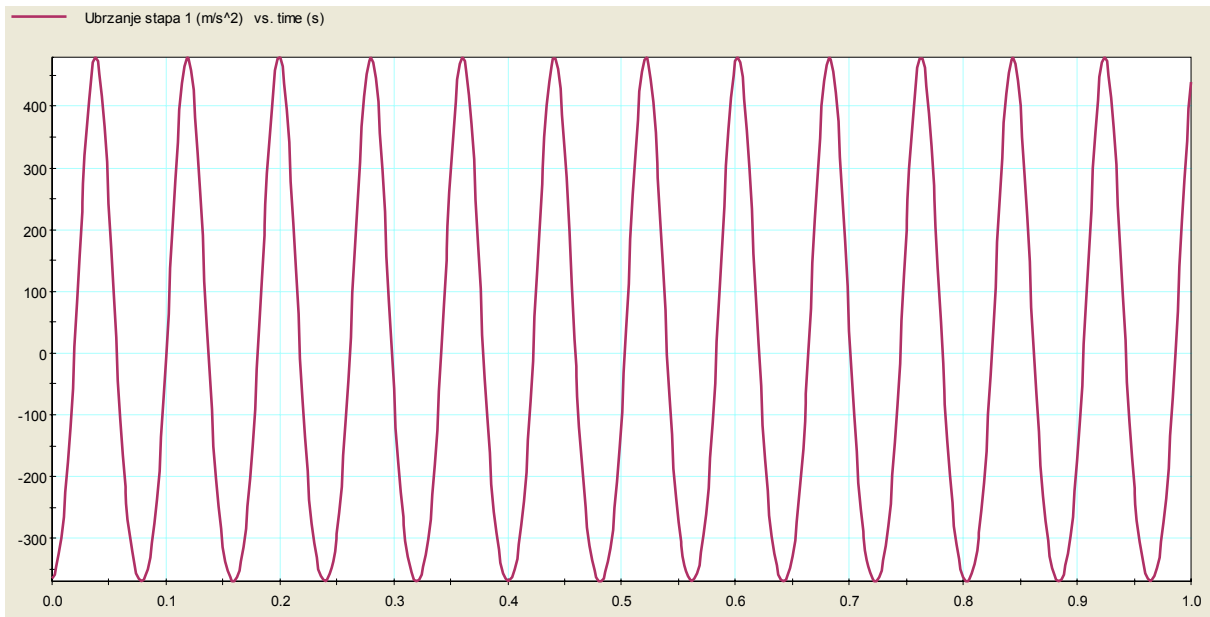
Slika 19. Pozicija čela stapa 4



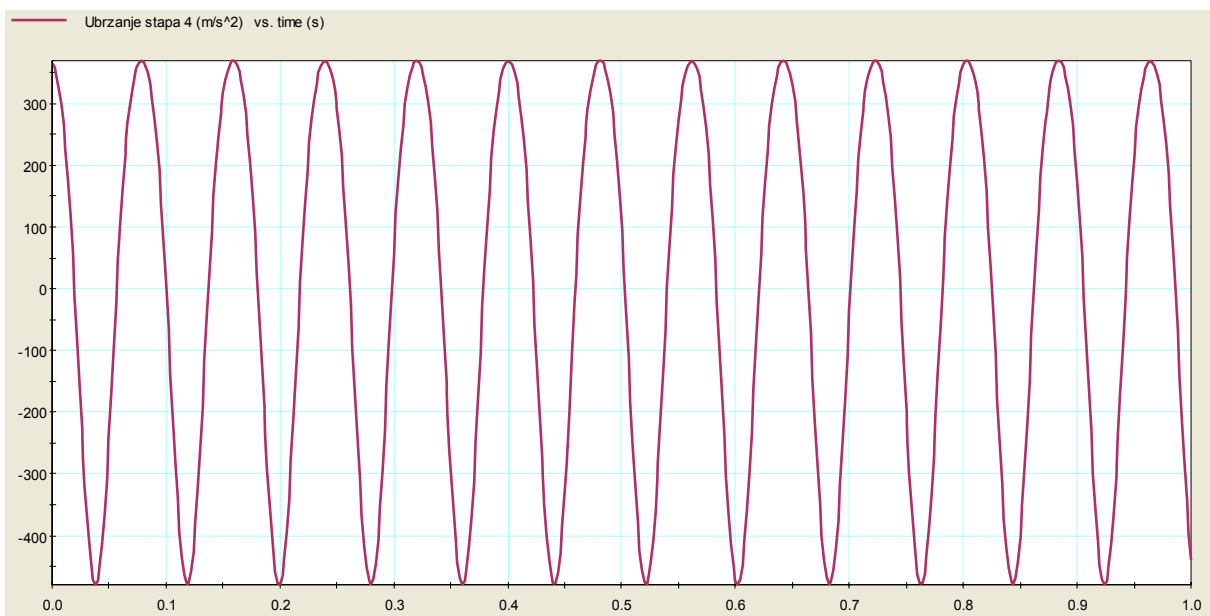
Slika 20. Brzina stapa 1



Slika 21. Brzina stapa 4



Slika 22. Ubrzanje stapa 1



Slika 23. Ubrzanje stapa 4

Čelo stapa se kreće od $y = 167$ mm do $y = 306,7$ mm što odgovara stapaju od 139,7 mm. Kretanje stapa 4 također odgovara jednom stapaju, a kreće se od $y = 2670$ mm do $y = 2809,7$ mm. Dijagrami brzina i ubrzanja su istih iznosa ali suprotnih predznaka, kako i treba biti. Može se vidjeti da prilikom prolaska stapova kroz DMT i GMT brzina stapova iznosi nula, što se poklapa sa kinematikom.

5. DINAMIČKA ANALIZA

Kod dinamičke analize mehanizama proučavaju se vanjske, unutarnje i inercijske sile koje se pojavljuju kod mehanizama tijekom njihovog rada.

Jedan od zadataka kinematičke i dinamičke analize je pronaći gibanje kinematičkog sistema na osnovu mehaničkog sistema i polja sila koje djeluju na zatvoreni mehanički sistem. Drugi zadatak je iz zadanog stanja gibanja mehaničkog sistema pronaći sile koje izazivaju to gibanje.

Pod aktivne sile mehanizama spadaju pogonske sile i momenti, sile i momenti otpora, težine članova mehanizama i sile elastičnih elemenata. Te sile se najčešće mogu procijeniti ili su poznate, a pošto djeluju izvana na mehanizam nazivaju se i vanjskim silama. Reakcije među članovima mehanizma su unutrašnje sile jer se pojavljuju kao reakcije na djelovanje vanjskih sila. One nisu poznate jer su posljedica djelovanja aktivnih sila i momenata, te ubrzanja članova mehanizama. Na gibanje mehanizama najviše utječu pogonske sile i momenti, te sile i momenti otpora.

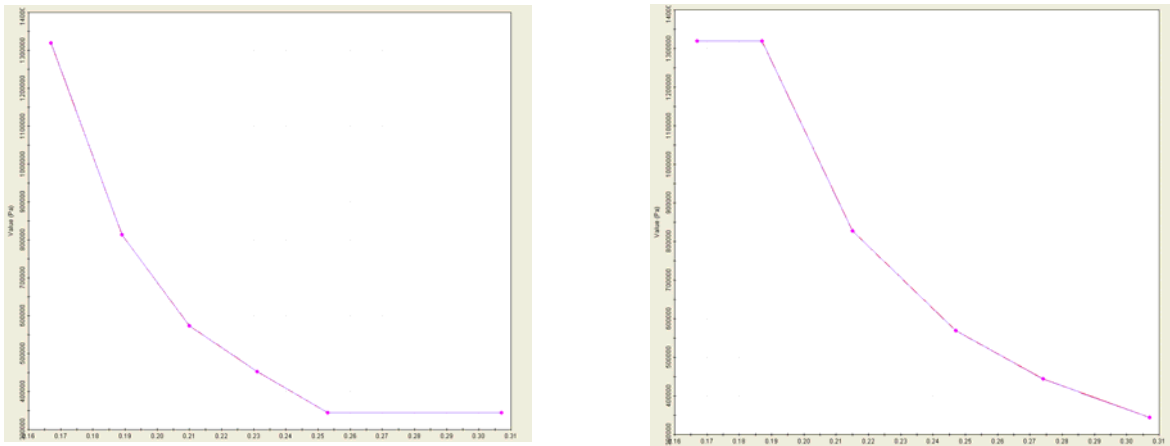
5.1. Opterećenja koja djeluju na mehanizam

Pri dinamičkoj analizi uzimaju se u obzir sljedeća opterećenja:

- Pogonski moment elektromotora
- inercijske sile
- sile prilikom tlačenja medija
- sile otpora reducirane na koljenasto vratilo
- sile trenja u cilindrima

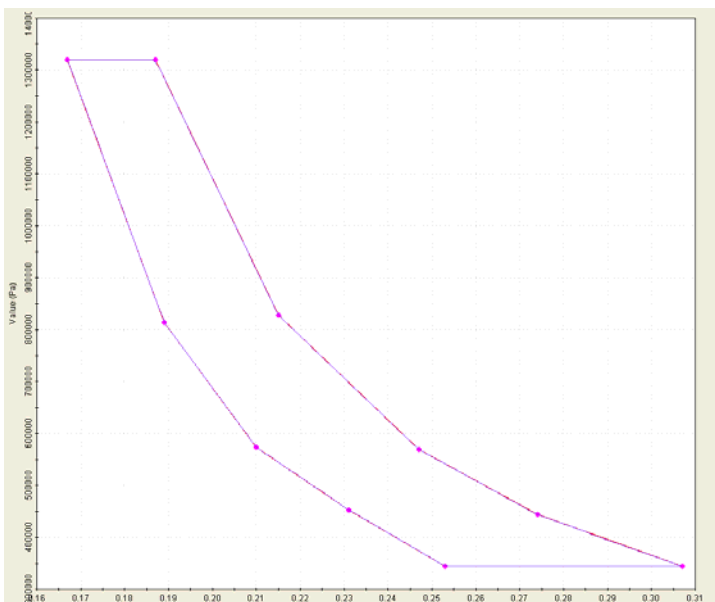
5.2. Dinamička analiza mehanizma

Da bi proces komprimiranja plina u kompresoru bio što realnije prikazan promjena tlaka plina u cilindru je unesena u visualNastranu u obliku krivulje, i to tako da za određeni položaj stapa odgovara određeni tlak. Pošto stap tokom jednog ciklusa dva puta prolazi kroz istu točku potrebne su dvije krivulje, jedna za usis, a druga za kompresiju.

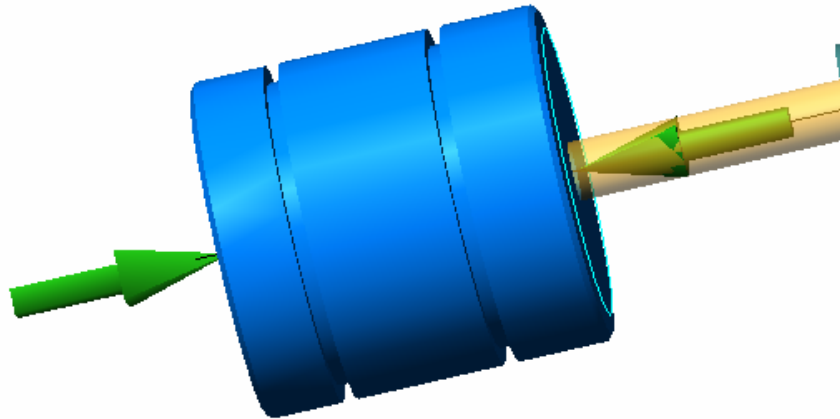


Slika 24. Krivulja usisa (lijevo) i kompresije (desno) u visualNastranu

Kada bi se krivulje sa slike 24 spojile dobila bi se jedna zatvorena krivulja koja je prikazana na slici 25.



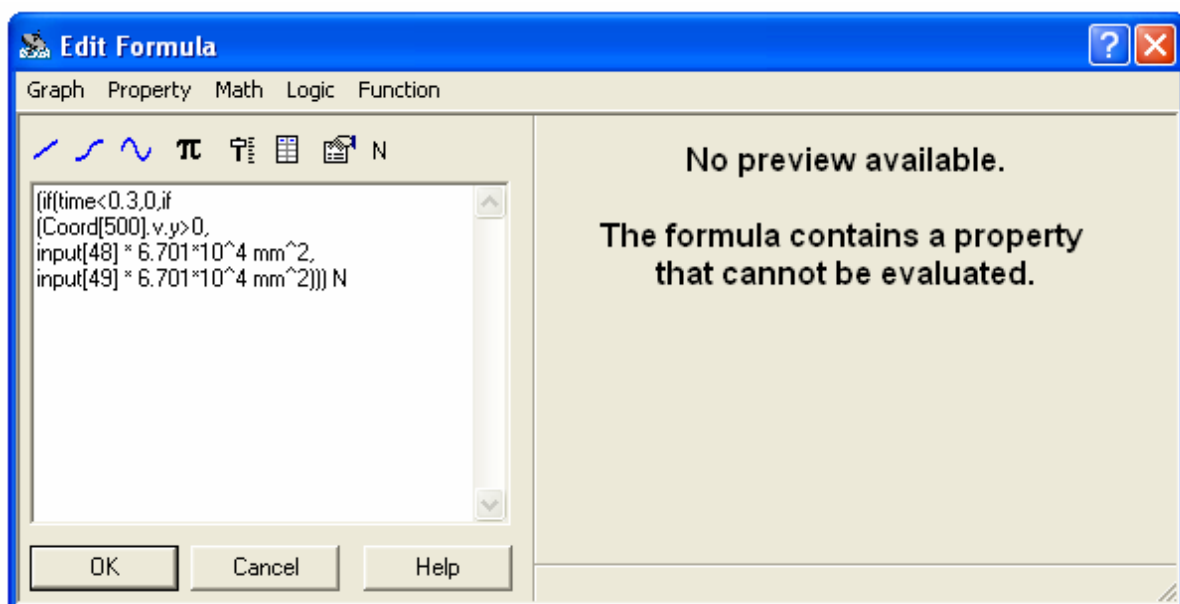
Slika 25. Usis i kompresija u visualNastranu – zatvorena krivulja



Slika 26. Prikaz stapa opterećenog silama u visualNastranu

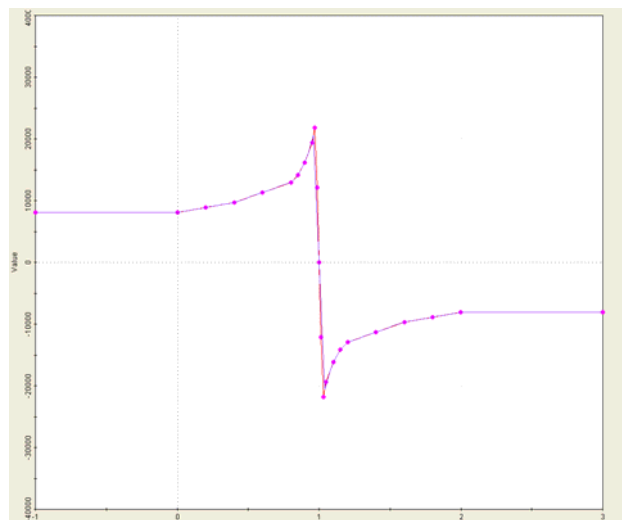
Kompresor je dvoradni, pa su sile u visualNastranu postavljene tako da na svaki stap djeluju 2 sile. Jedna djeluje sa strane čela stapa, a druga sa strane stapne motke. Sile su nezavisne i predstavljaju opterećenje na stap tokom usisa i kompresije. Iznos sila je tlak u cilindru pomnožen sa površinom na kojoj tlak djeluje. To rezultira da je sila sa strane stapne motke, zbog manje površine, manja nego sa strane čela stapa.

Sile su u visalNastranu unesene u obliku jednačbi, kako je prikazano na slici 27.



Slika 27. Jednačba koja definiira jednu od sila u visualNastranu

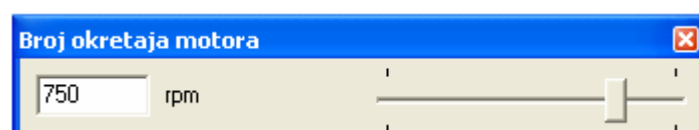
Kompresor energiju potrebnu za normalan rad dobiva od elektromotora. Moment elektromotora je definiran momentnom karakteristikom koja je u obliku dijagrama unesena u visualNastran. Nominalni moment elektromotora je 8070 Nm u trenutku pokretanja elektromotora. Kako se brzina vrtnje približava sinkronoj brzini zakretni moment raste do 2,7 puta veće vrijednosti od nominalnom momenta, a kada se brzina vrtnje i sinkrona brzina izjednače zakretni moment naglo pada u nulu. Kada se postigne željena, sinkrona, brzina svako odstupanje, bilo ubrzanje ili usporavanje, rezultirati će takvim momentom koji će vratiti brzinu vrtnje na sinkronu brzinu.



Slika 28. Momentna karakteristika motora u visualNastranu

Koeficijent trenja između stapa i cilindra iznosi, kao i između stapajice i križne glave 0,02. Ostali gubici su definirani kao prigušenje na koljenastom vratilu koje ovisi o kvadratu kutne brzine koljenastog vratila i iznosi $0,6456 \text{ Nms}^2/\text{okr}^2$ tako da u slučaju najveće brzine vrtnje elektromotora od 950 okr/min ti gubici iznose 2% pogonskog momenta.

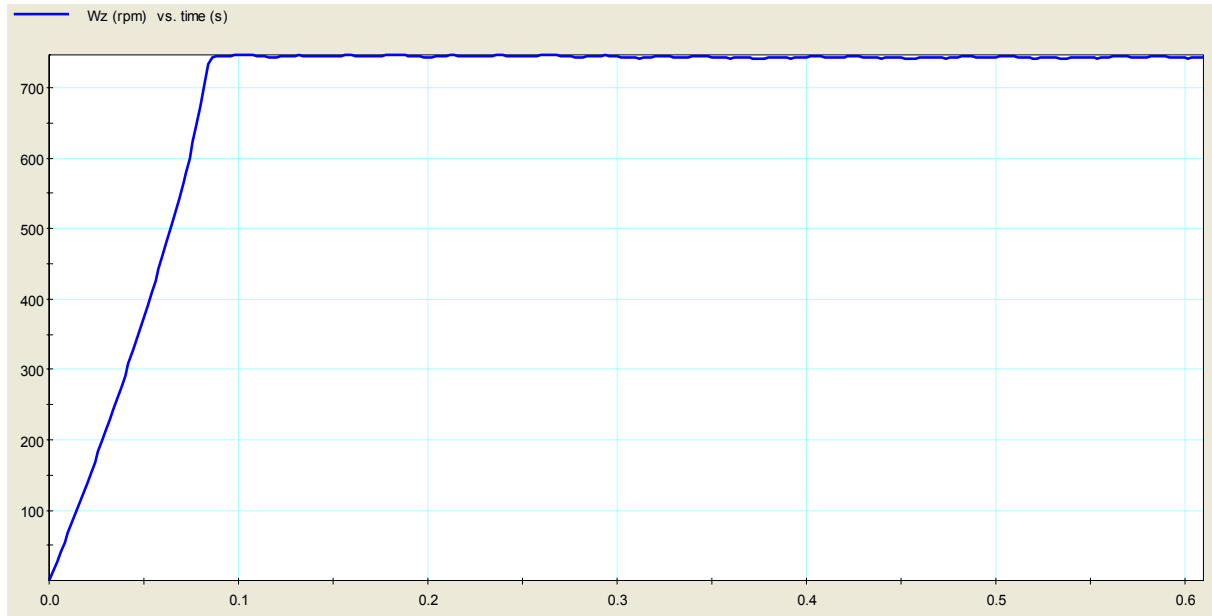
Brzinu vrtnje elektromotora se regulira preko klizača. Za potrebe simulacije broj okretaja u minuti se može regulirati od 1 to 950 okr/min dok se kod stvarnog elektromotora može regulirati od 745 – 950 okr/min.



Slika 29. Prikaz klizača za regulaciju broja okretaja motora

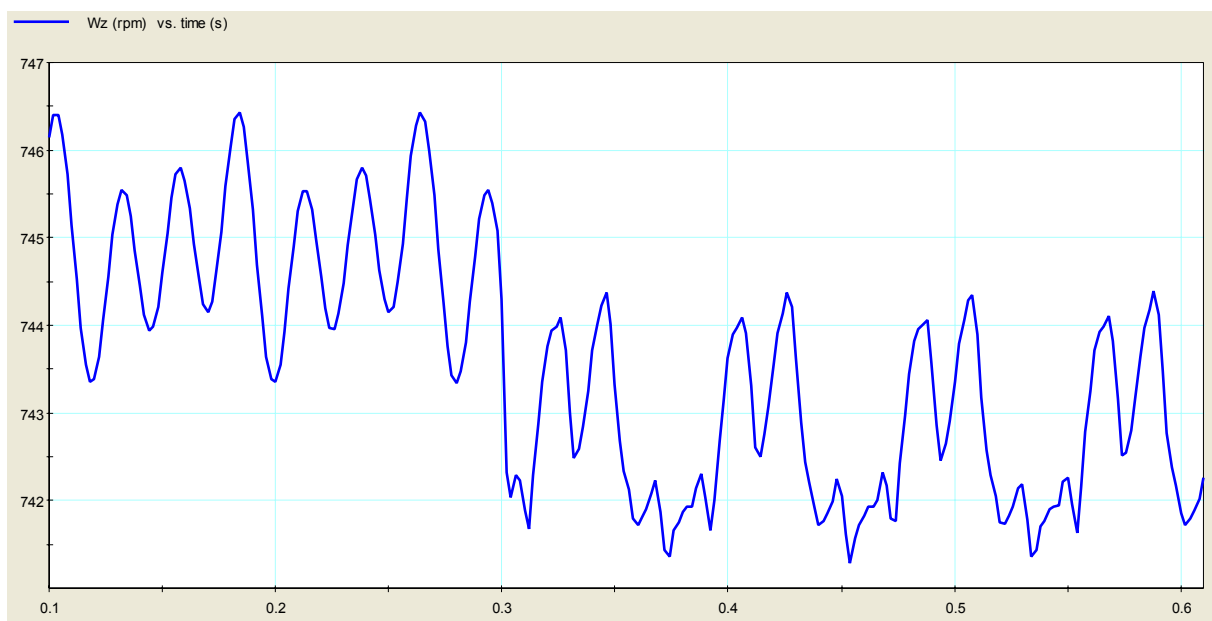
5.2.1. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min i puštanju plina u $t = 0,3$ s

Kompresor se pušta neopterećen u pogon iz stanja mirovanja. Plin se počinje komprimirati u $t = 0,3$ s. Na slici 30 se vidi da kompresor punu brzinu postiže za 0,1 s.

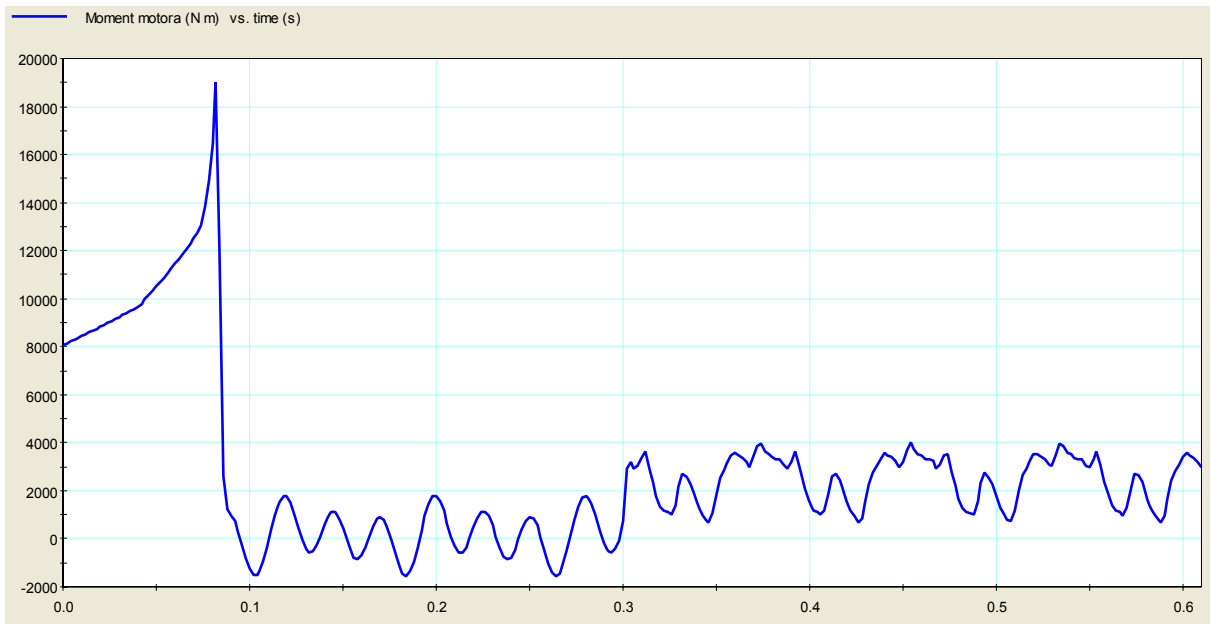


Slika 30. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu

Na slici 31 se vidi da je regulacija brzine vrlo dobra i oscilira 3 okr/min nakon što se rad kompresora stabilizira tokom komprimiranja plina.

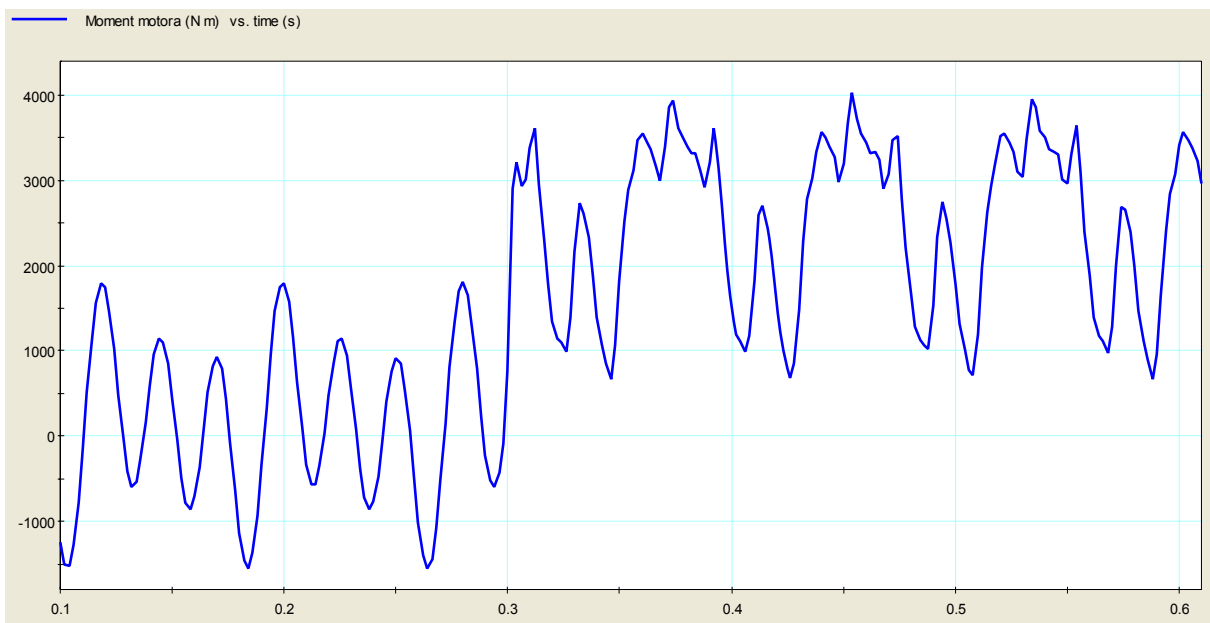


Slika 31. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora

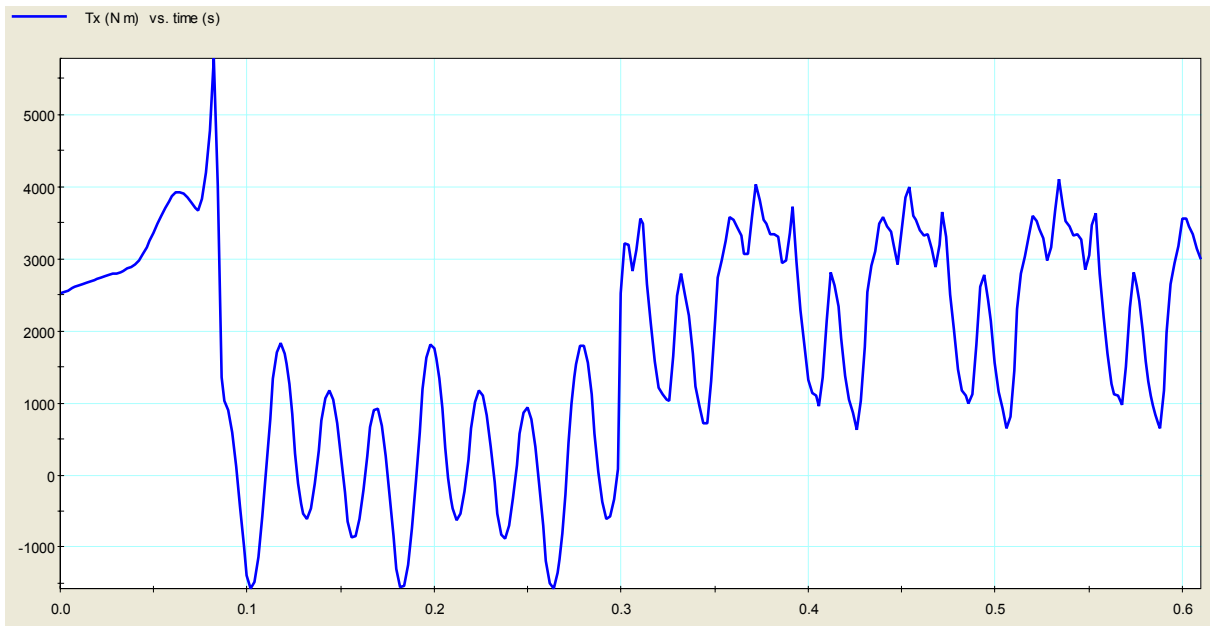


Slika 32. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu

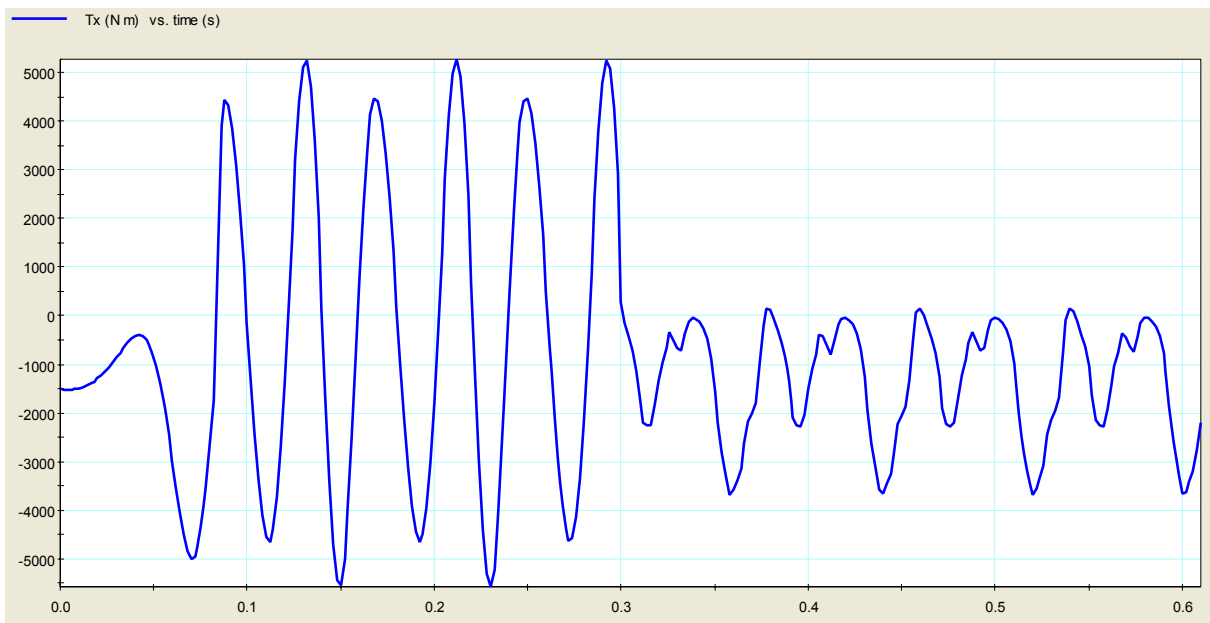
Na slici 32 se vidi kako se mijenja moment elektromotora prema momentnoj karakteristici. Jasno je vidljivo povećanje srednjeg momenta potrebnog za komprimiranje plina naspram neopterećenog kompresora čiji moment oscilira približno oko 0 Nm.



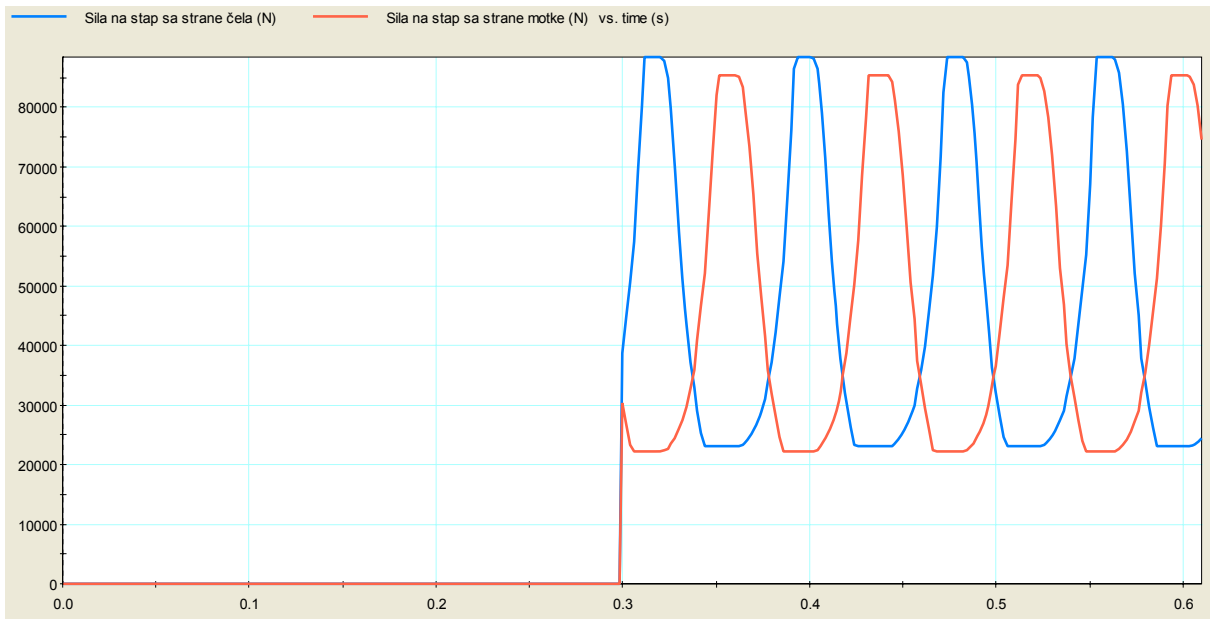
Slika 33. Povećani detalj pogonskog momenta elektromotora



Slika 34. Dijagram momenta na elastičnoj spojci

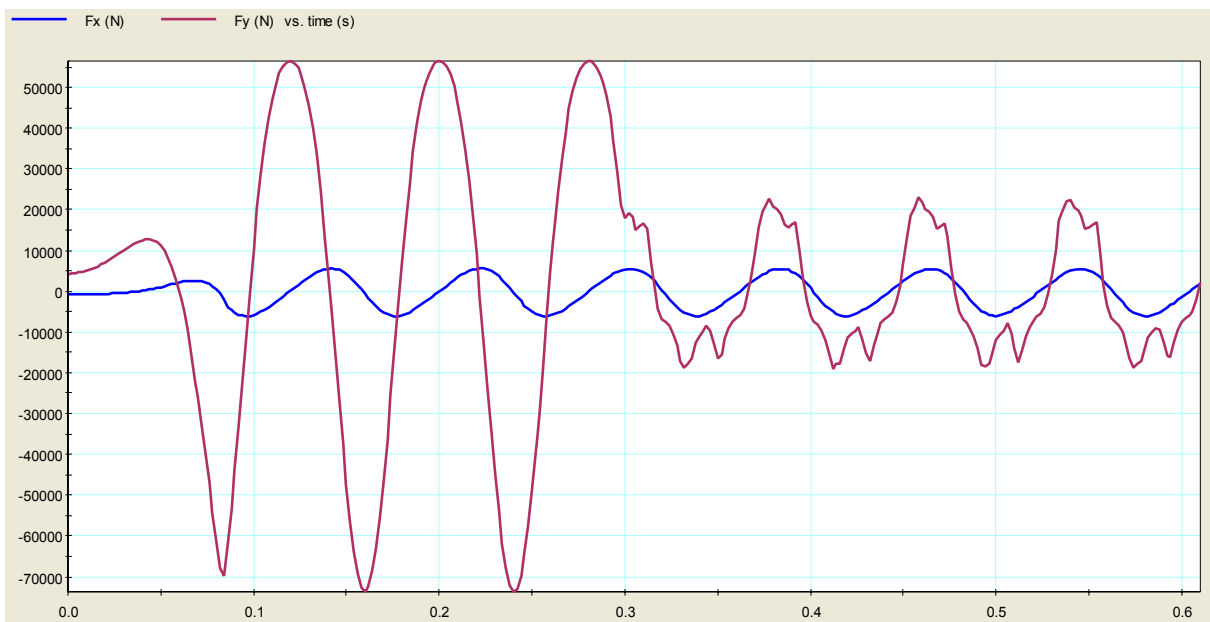


Slika 35. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu

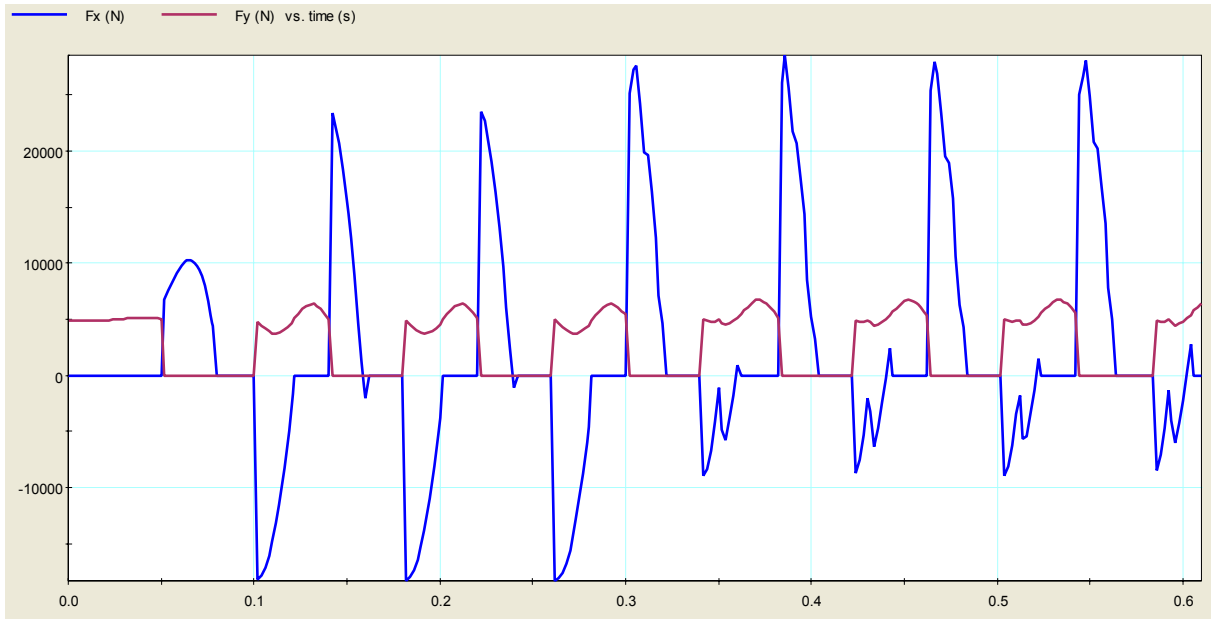


Slika 36. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu

Na slici 36 su prikazane sile koje djeluju na stap 1. Plavom bojom je prikazana sila koja djeluje na stap sa strane čela, a crvenom bojom sila sa strane stapne motke. Sile počinju djelovati u $t = 0,3$ s. Može se uočiti manji iznos sile sa strane stapne motke zbog manje površine na kojoj djeluje tlak od one sa strane čela.



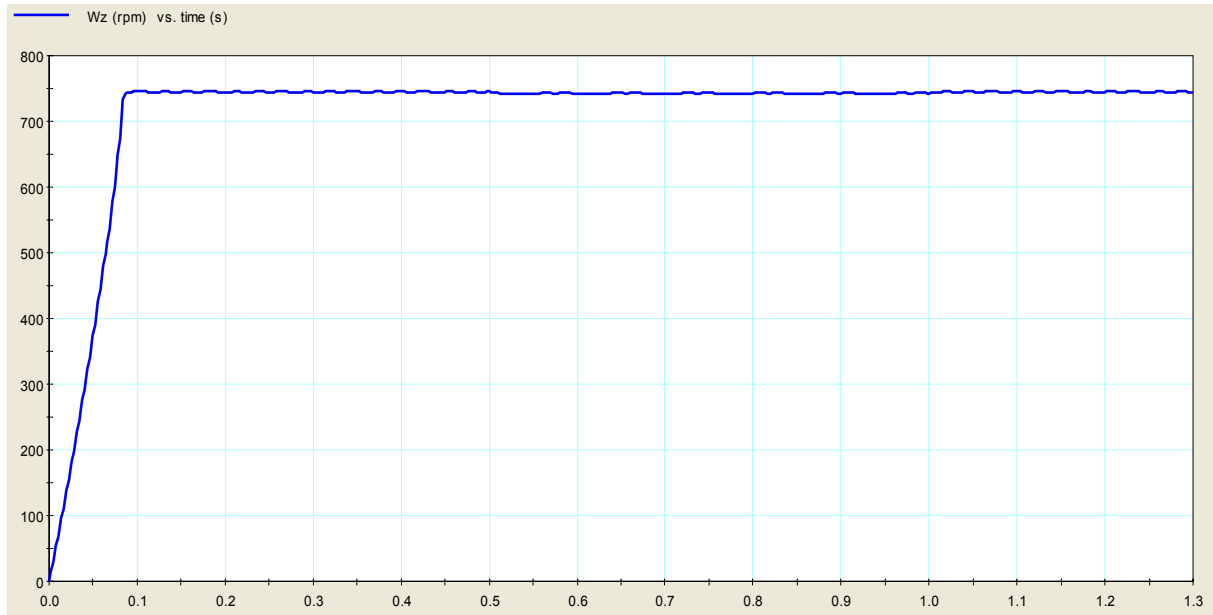
Slika 37. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu



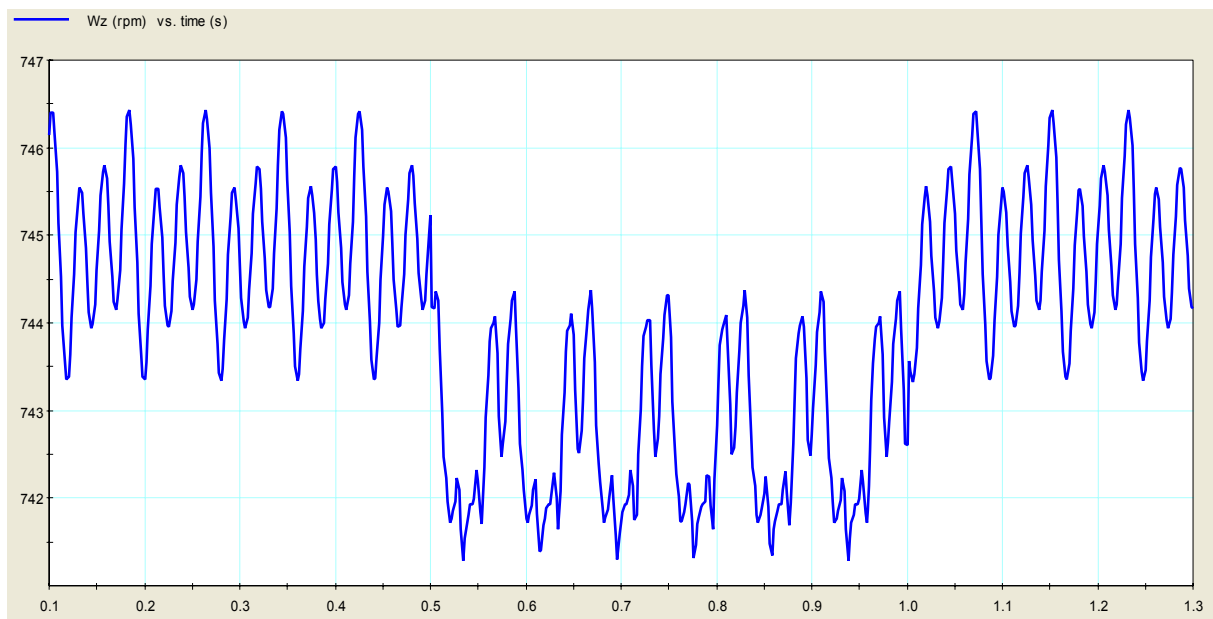
Slika 38. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu

5.2.2. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min i puštanju plina u $t = 0,5$ s te zatvaranje ventila kod $t = 1$ s

Kompresor se pušta u rad neopterećen i u trenutku $t = 0,5$ s počinje komprimiranje plina. Komprimiranje prestaje u $t = 1$ s.

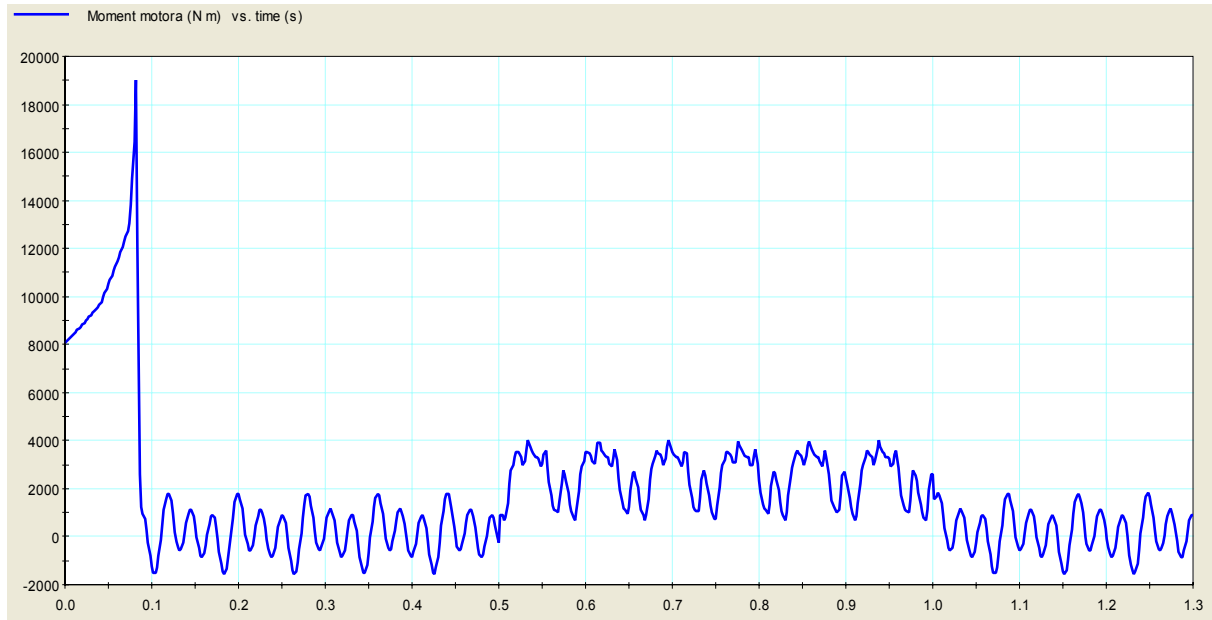


Slika 39. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu



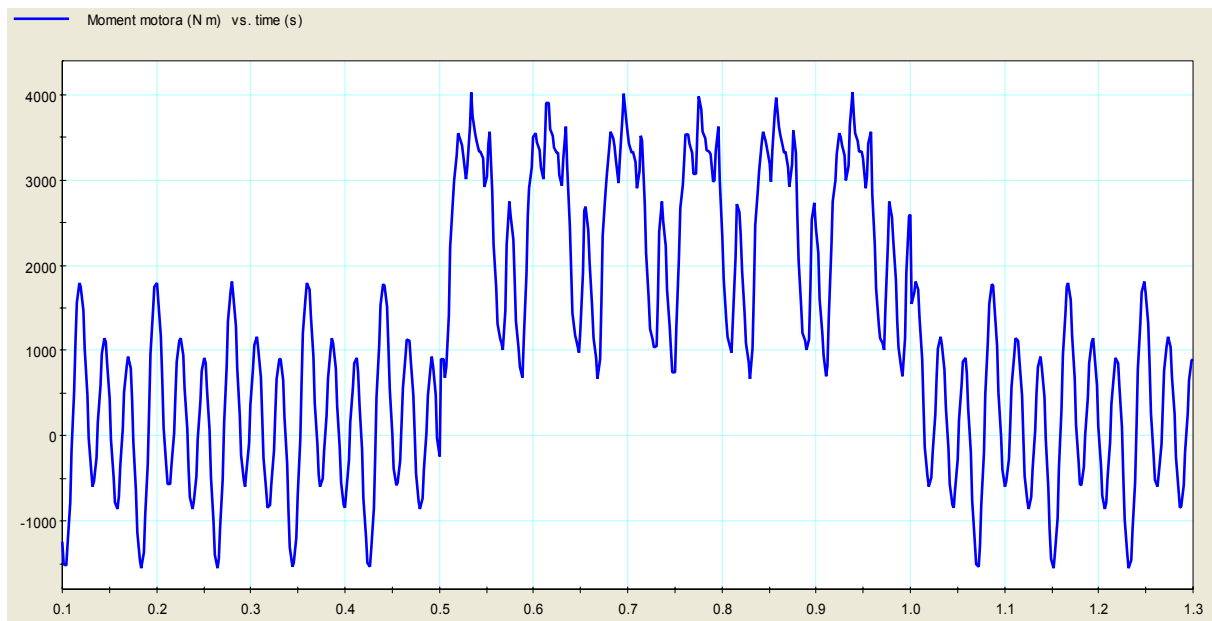
Slika 40. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora

Na slici 40 se može uočiti kako je regulacija brzine vrtnje odlična za vrijeme dok je kompresor neopterećen i oscilira oko $n = 745$ okr/min. Za vrijeme komprimiranja oscilira oko $n = 743$ okr/min što je vrlo dobro. Amplituda oscilacija iznosi približno 3 okr/min.

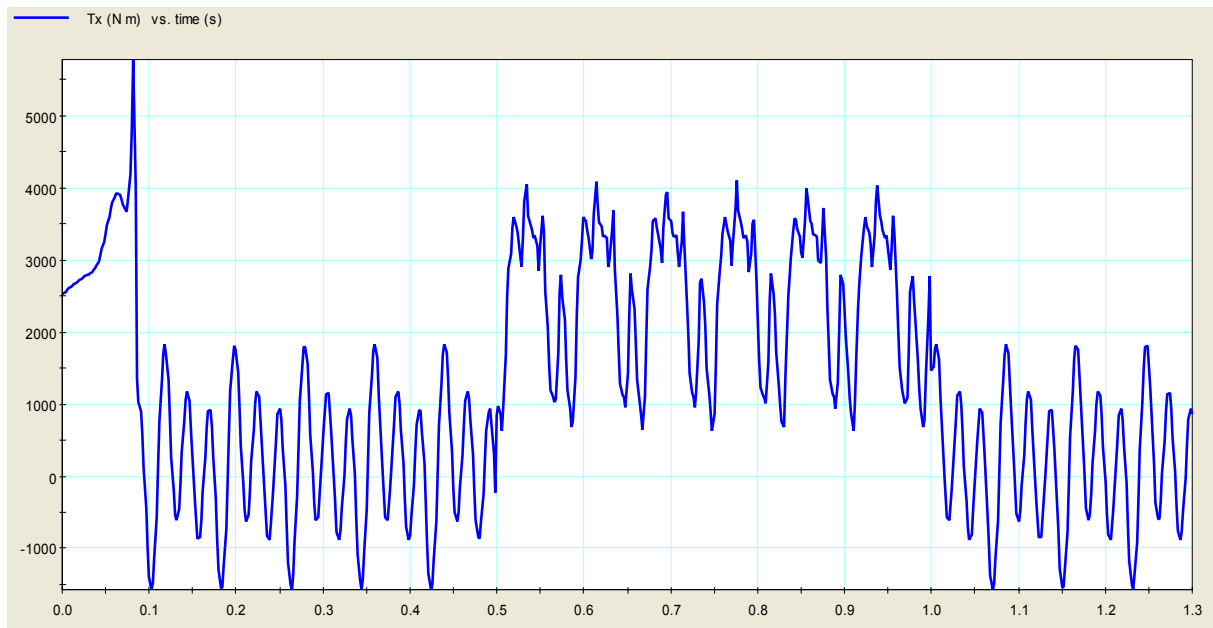


Slika 41. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu

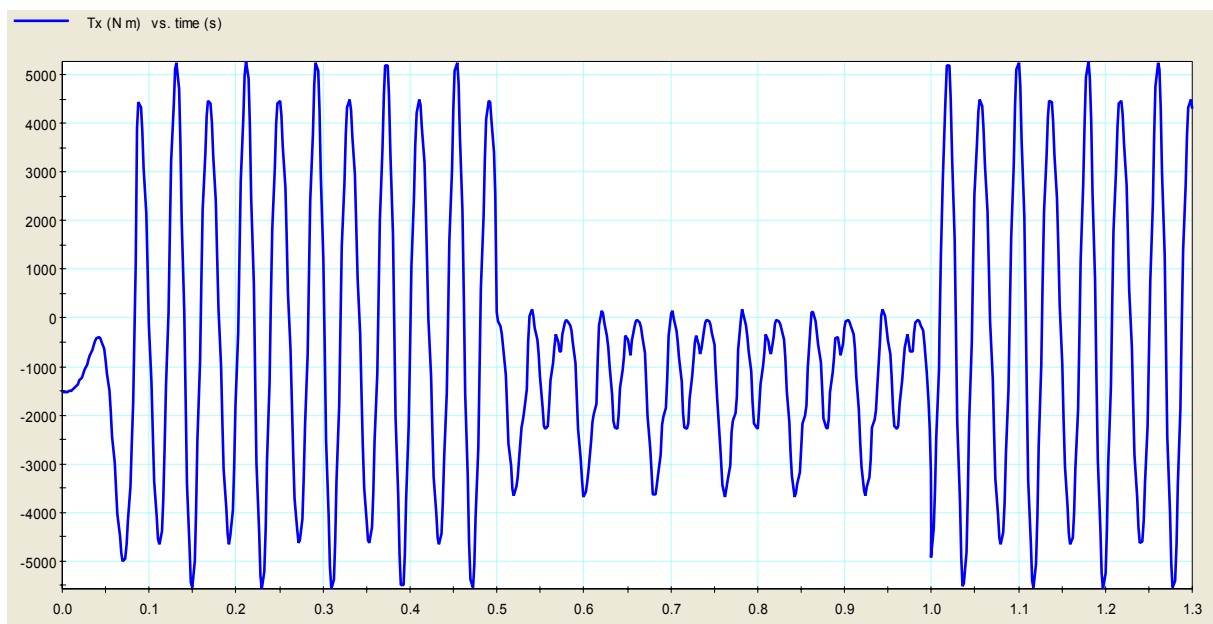
Na slici 42 se opet može uočiti kako elektromotor različito odgovara na različita opterećenja za vrijeme praznog hoda i za vrijeme komprimiranja.



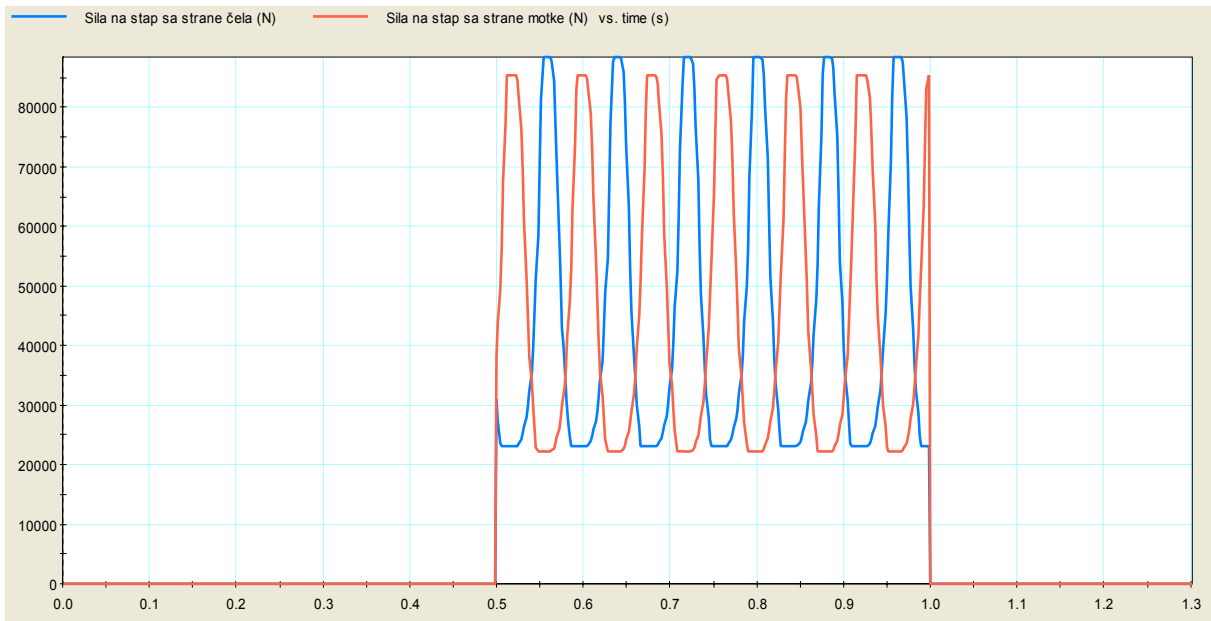
Slika 42. Povećani detalj pogonskog momenta elektromotora



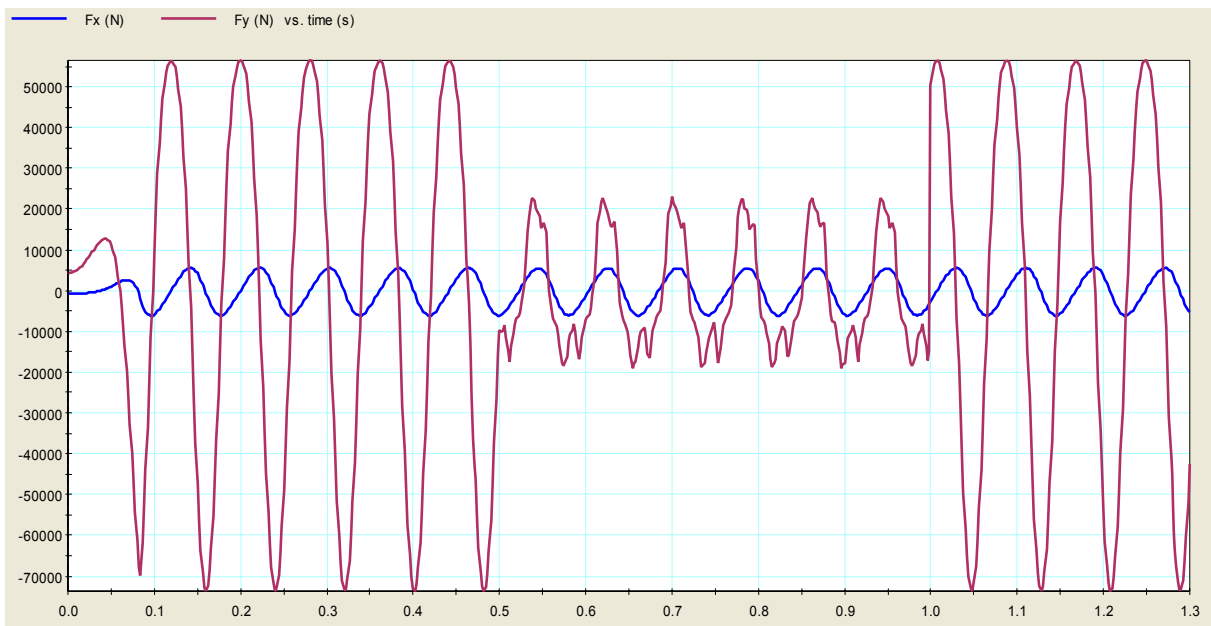
Slika 43. Dijagram momenta na elastičnoj spojci



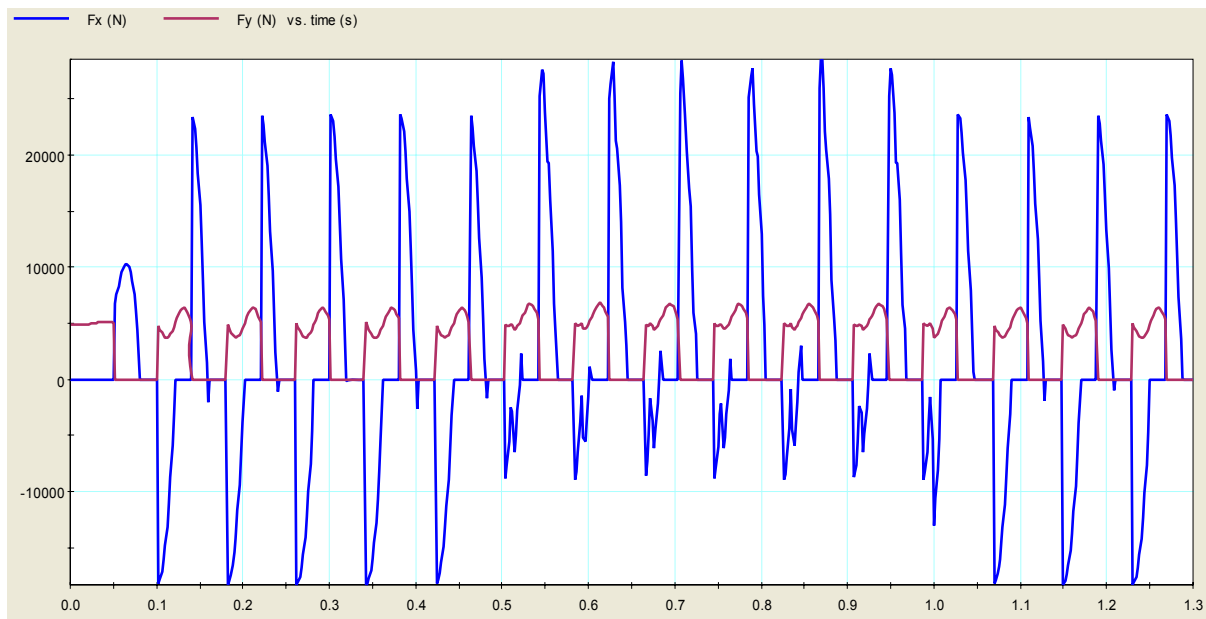
Slika 44. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu



Slika 45. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu



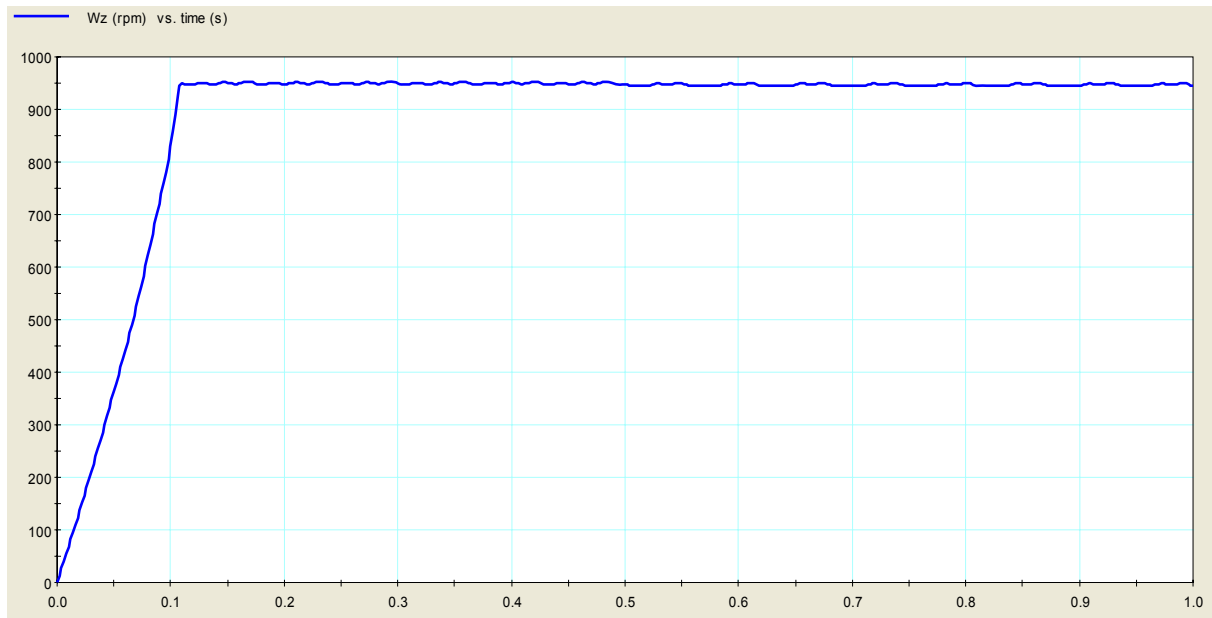
Slika 46. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu



Slika 47. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu

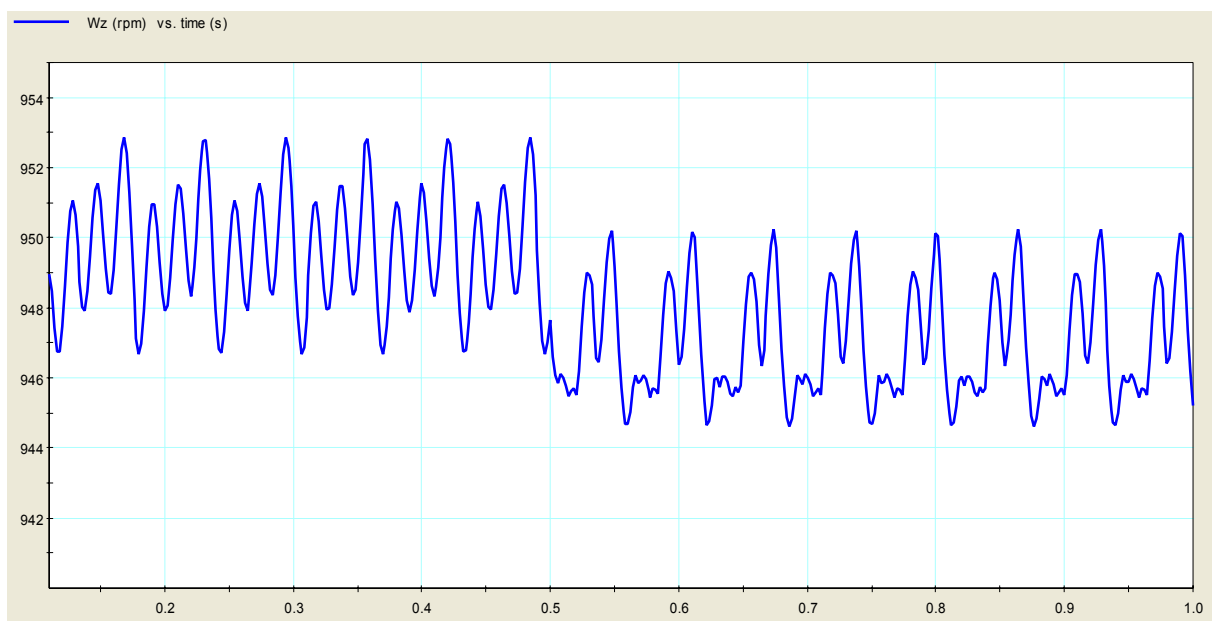
5.2.3. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 950 okr/min i puštanju plina u $t = 0,5$ s

Ova analiza je slična kao i prva s tom razlikom što je brzina kompresora povećana s 745 na 950 okr/min.

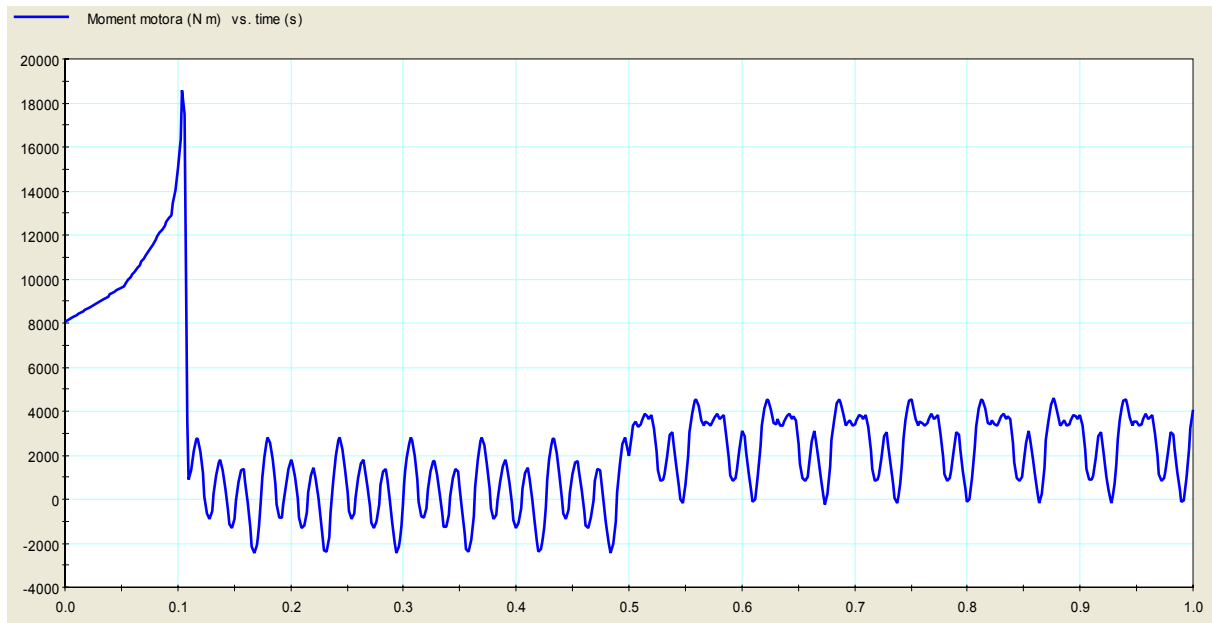


Slika 48. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu

Elektromotor opet uspijeva regulirati broj okretaja u dosta uskim tolerancijama, kao što se vidi na slici 49.

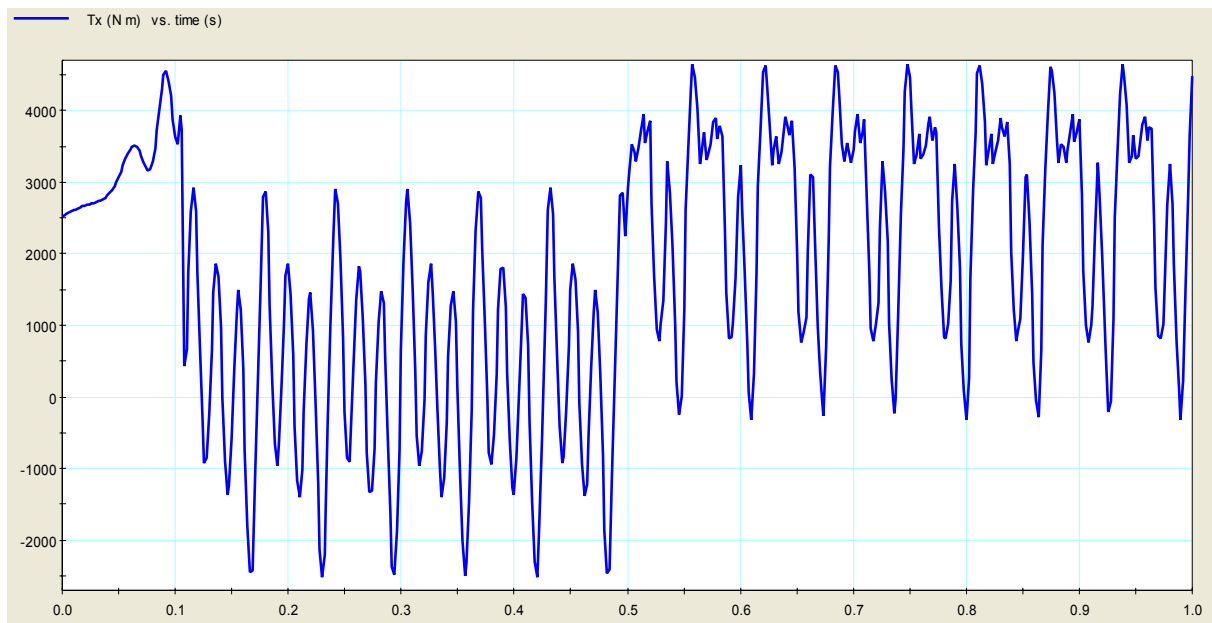


Slika 49. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora

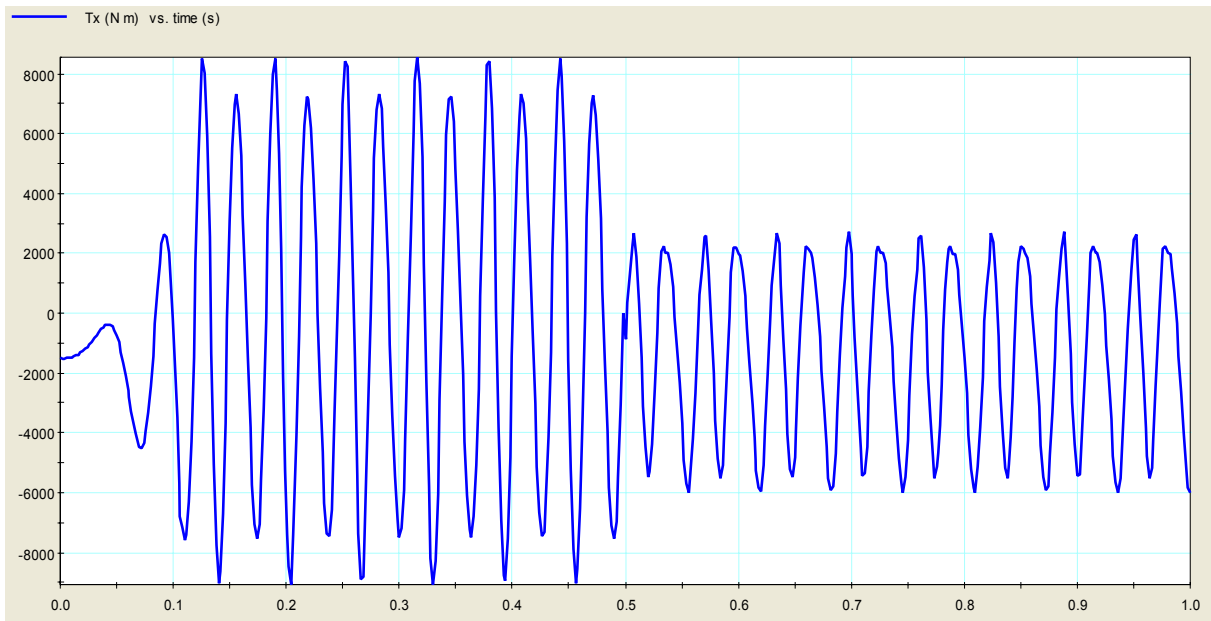


Slika 50. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu

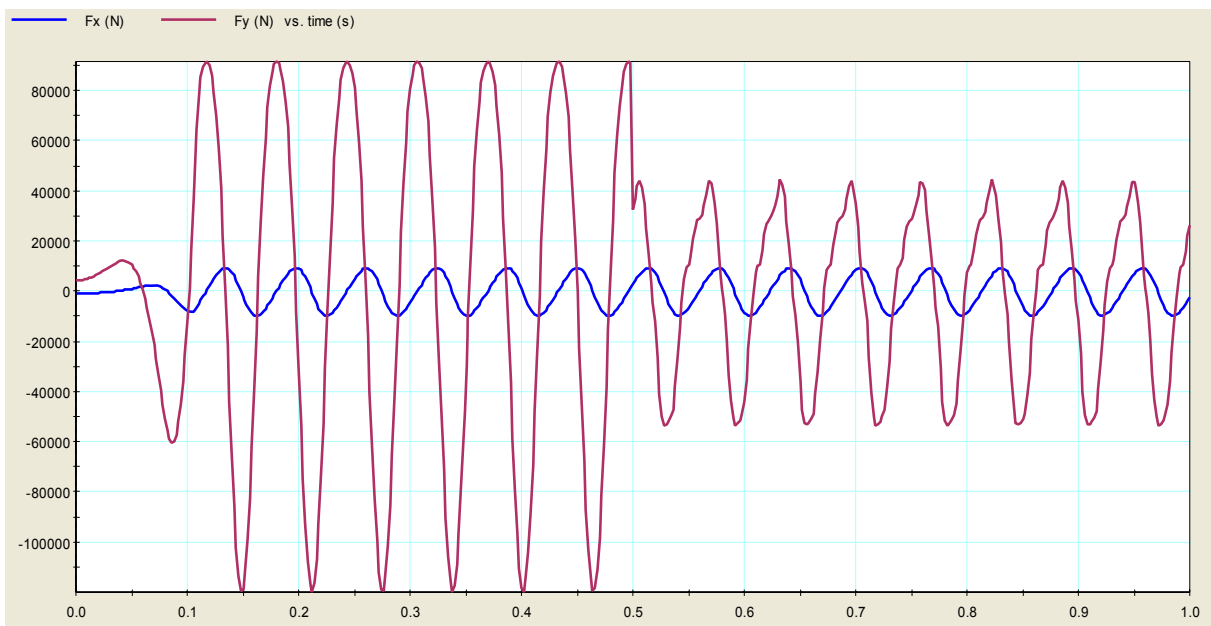
Iz slike 50 se vidi je vršni moment viši kod komprimiranja plina pri 950 okr/min nego pri 745 okr/min.



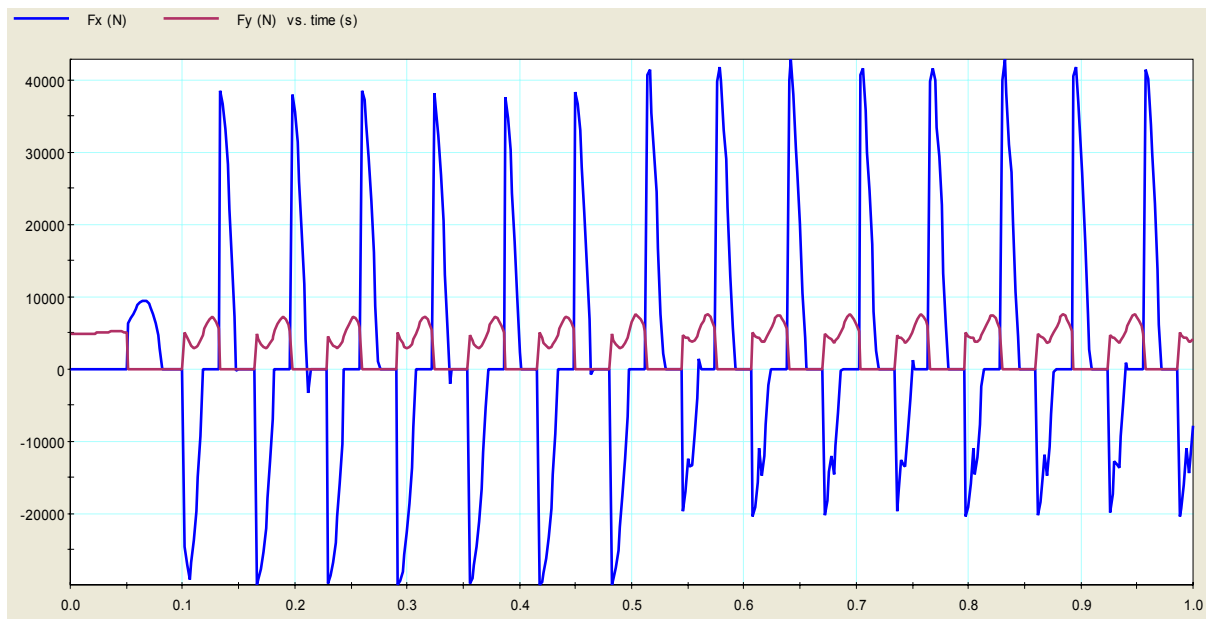
Slika 51. Dijagram momenta na elastičnoj spojci



Slika 52. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu



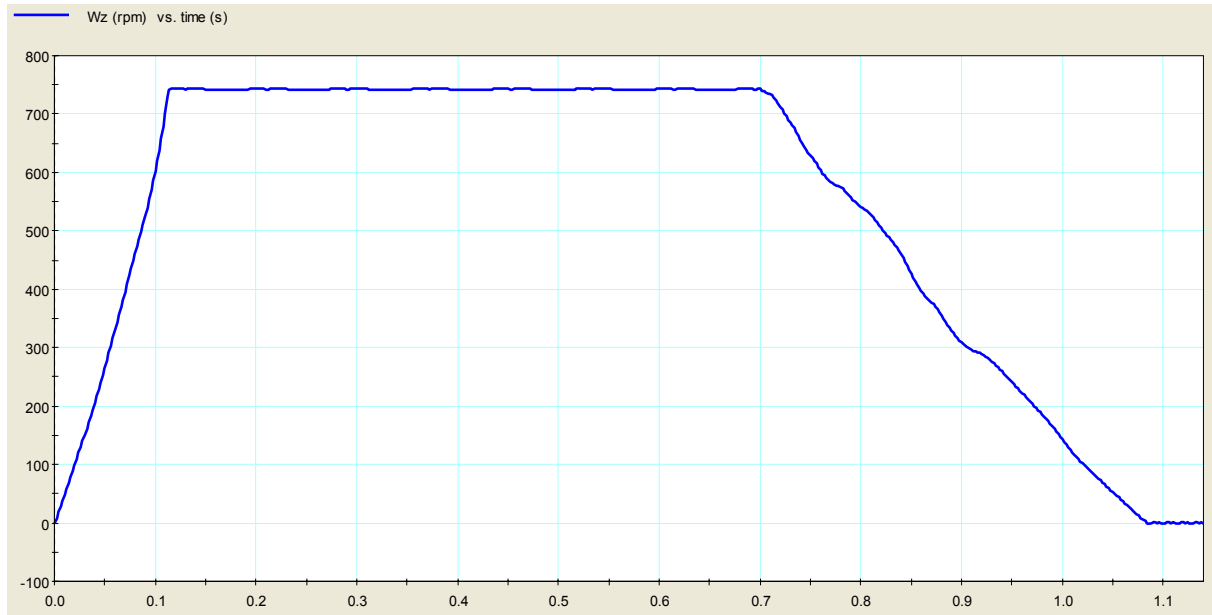
Slika 53. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu



Slika 54. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu

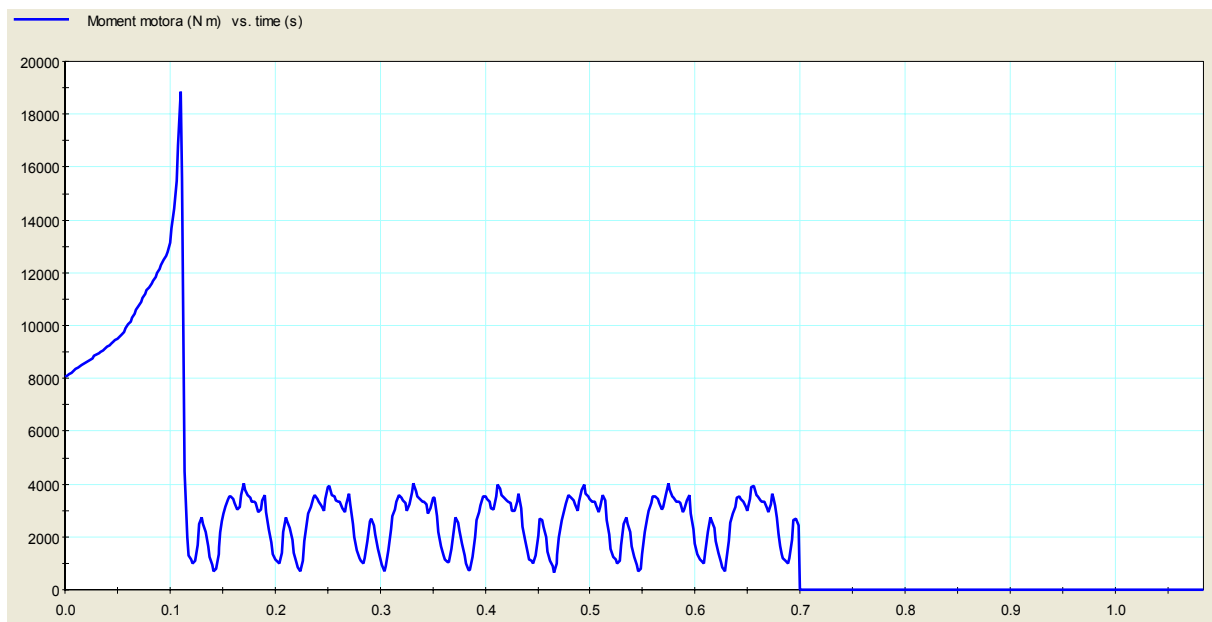
5.2.4. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min pod punim opterećenjem i isključenje elektromotornog pogona u $t = 0,7$ s uz daljnje komprimiranje plina

Ovom analizom se htjelo pokazati koliko treba kompresoru treba da se zaustavi od 745 do 0 okr/min, ako se isključi elektromotor ($M = 0$ Nm) a kompresor nastavi komprimirati plin.

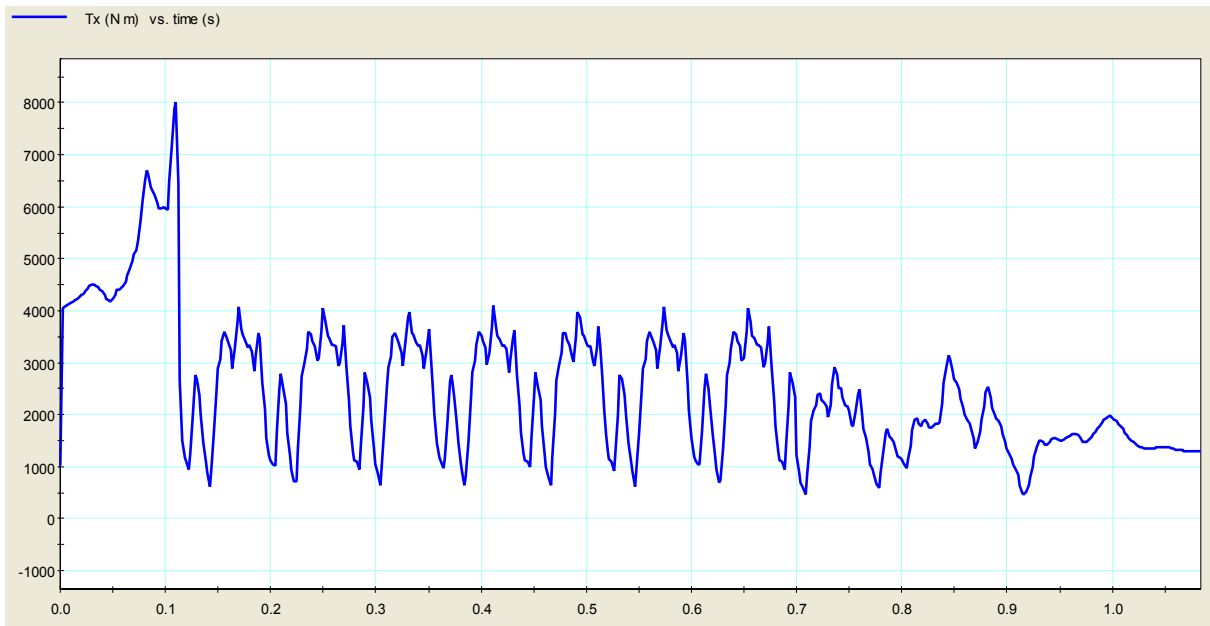


Slika 55. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu

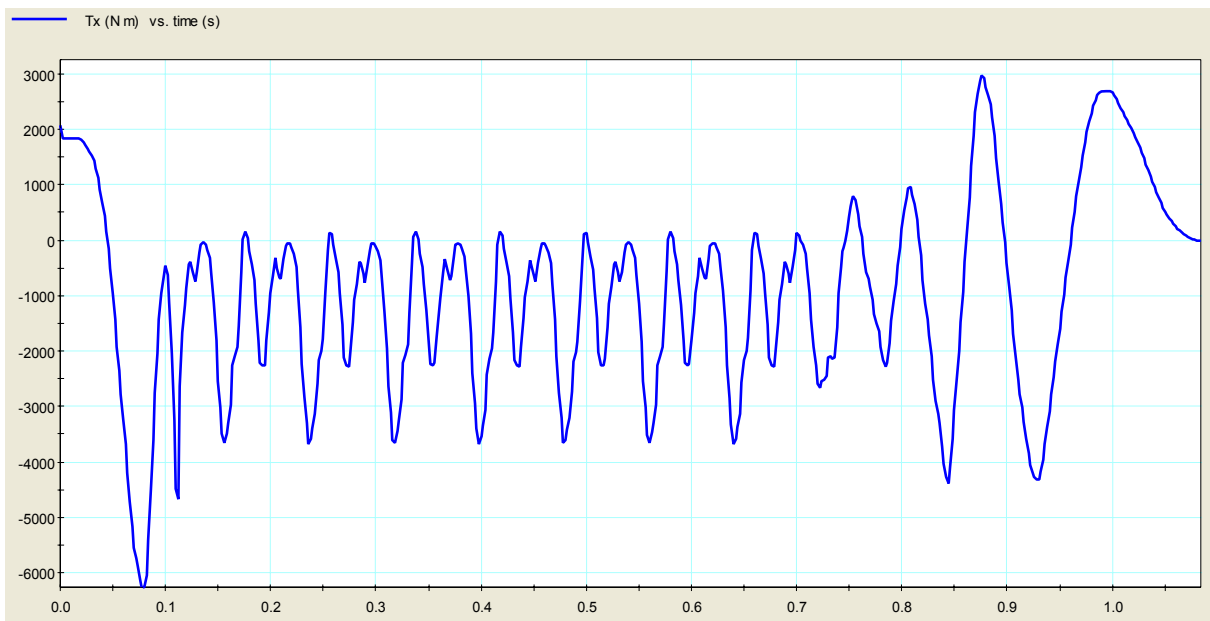
Slika 55 pokazuje da će proteći 0,4 sekunde do zaustavljanja kompresora.



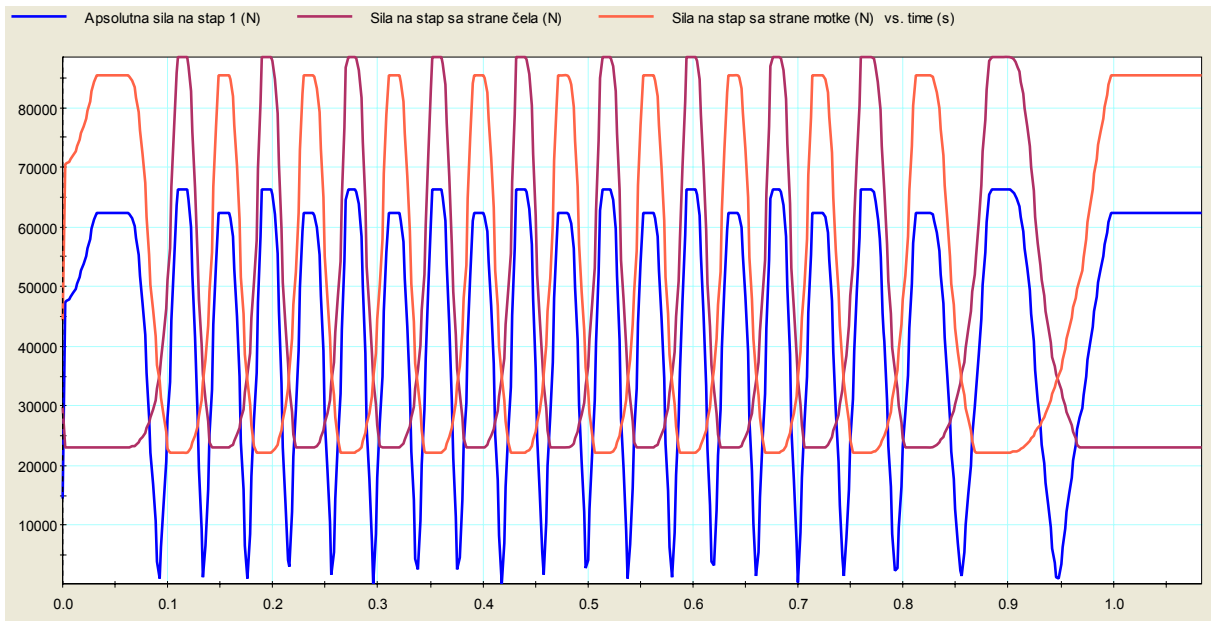
Slika 56. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu



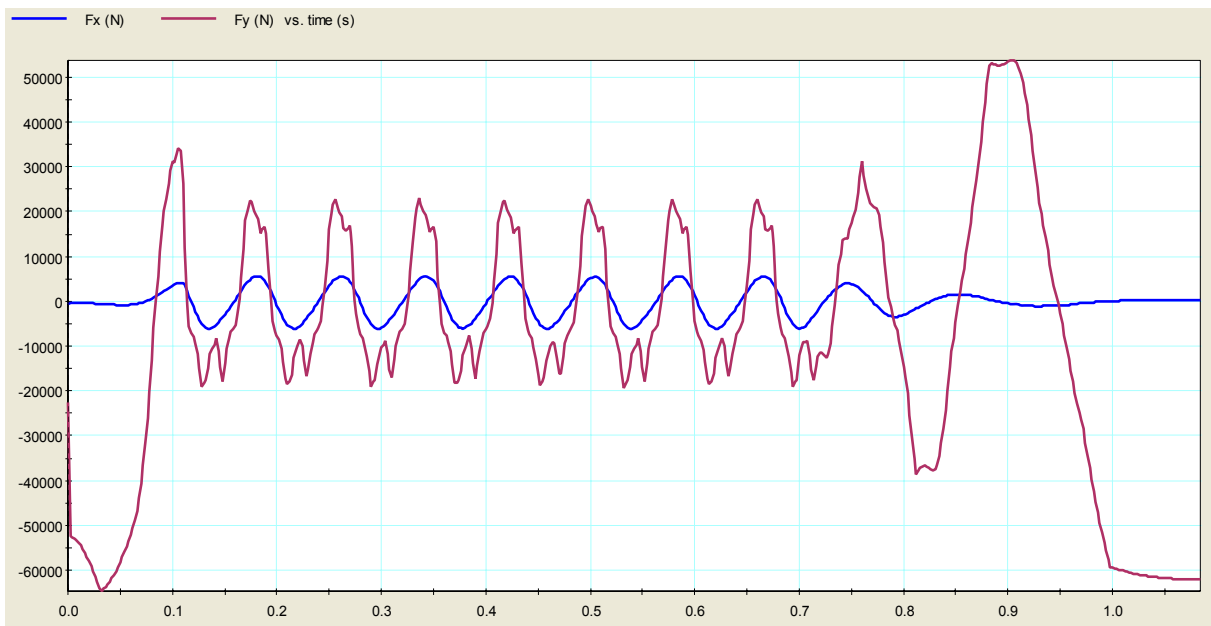
Slika 57. Dijagram momenta na elastičnoj spojci



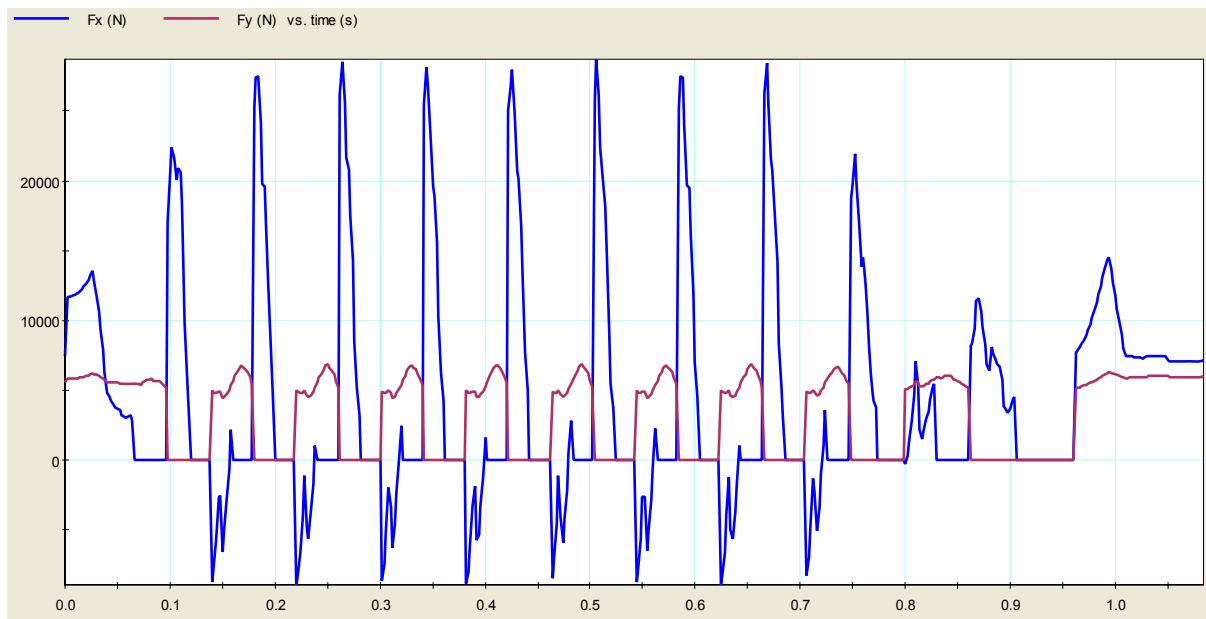
Slika 58. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu



Slika 59. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu



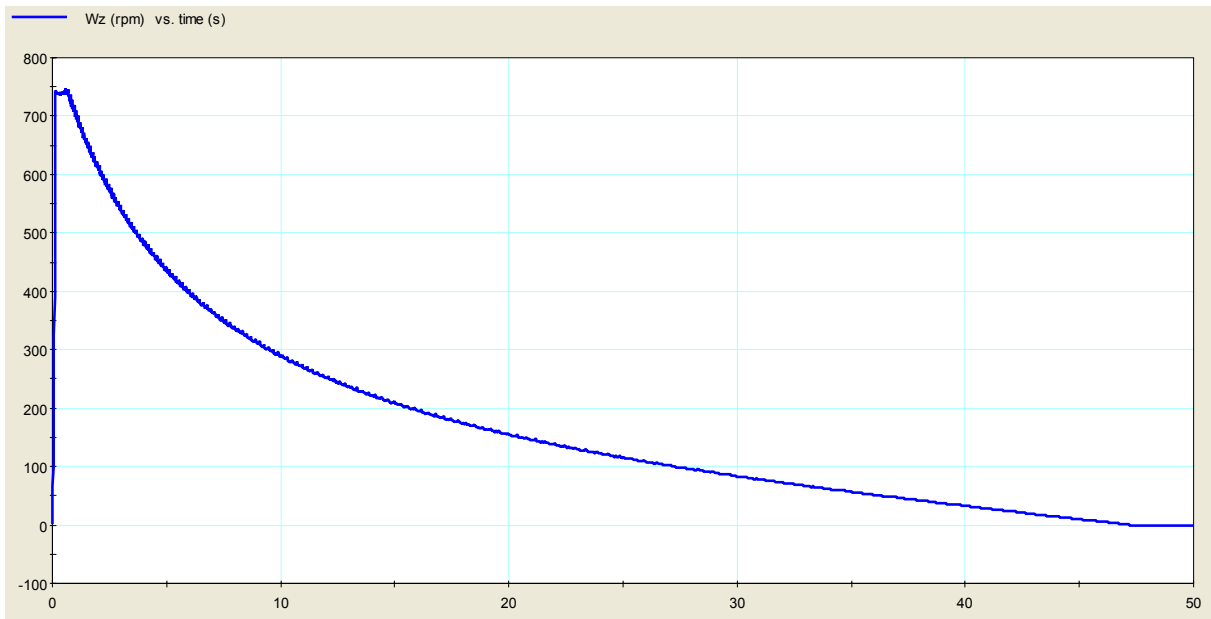
Slika 60. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu



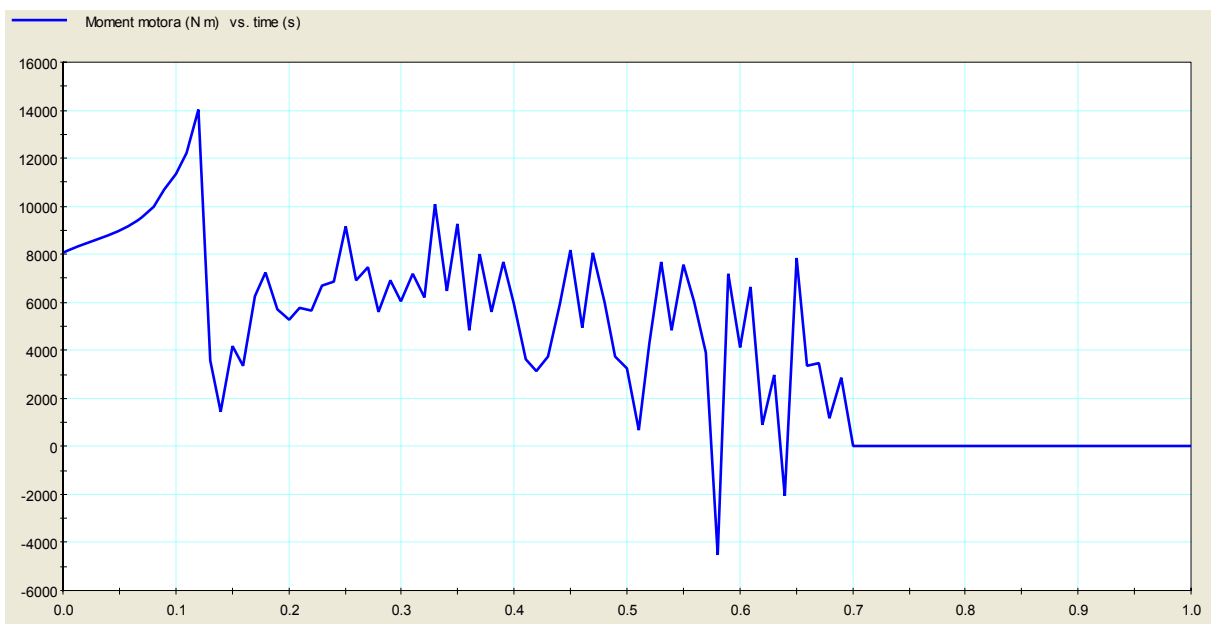
Slika 61. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu

5.2.5. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min pod punim opterećenjem i isključenje elektromotornog pogona u $t = 0,7$ s uz prestanak komprimiranja plina

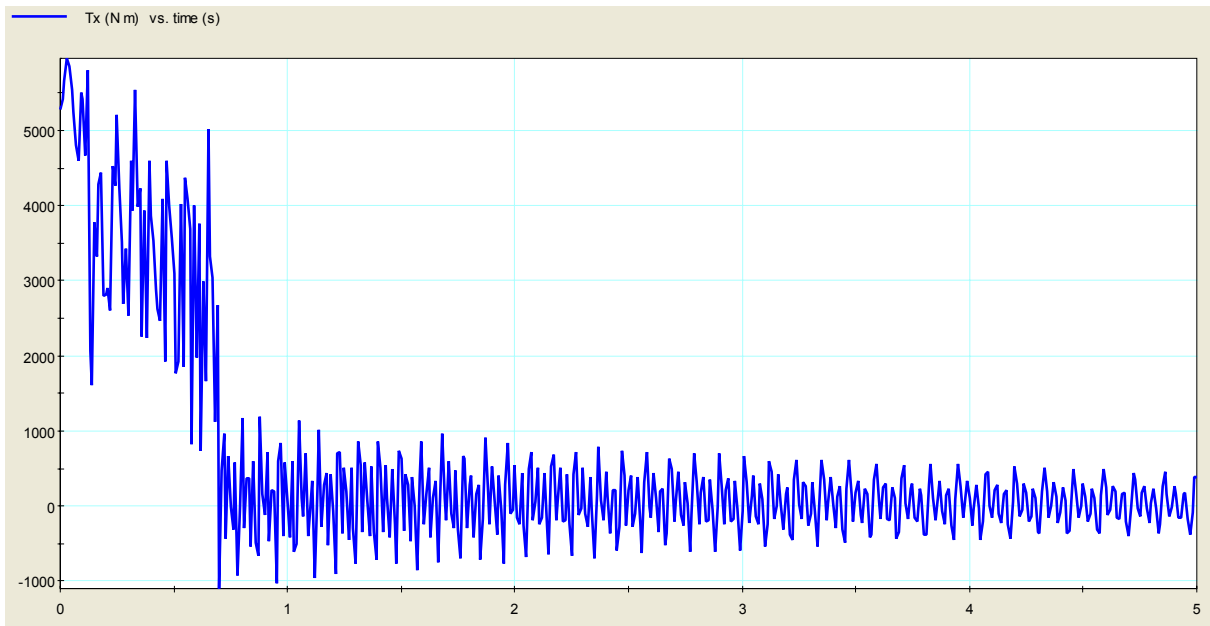
Kod ove analize elektromotor je isključen u $t = 0,7$ s uz istodobni prestanak komprimiranja plina. Potrebno je gotovo 50 s da bi se kompresor zaustavio, kao što se vidi na slici 62.



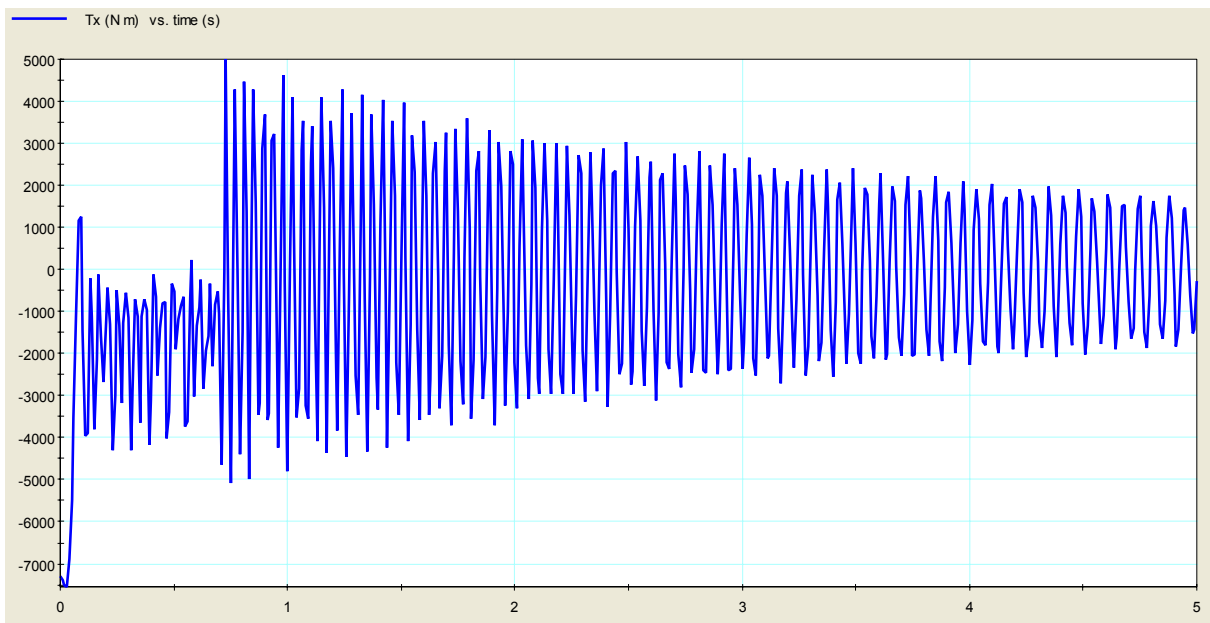
Slika 62. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu



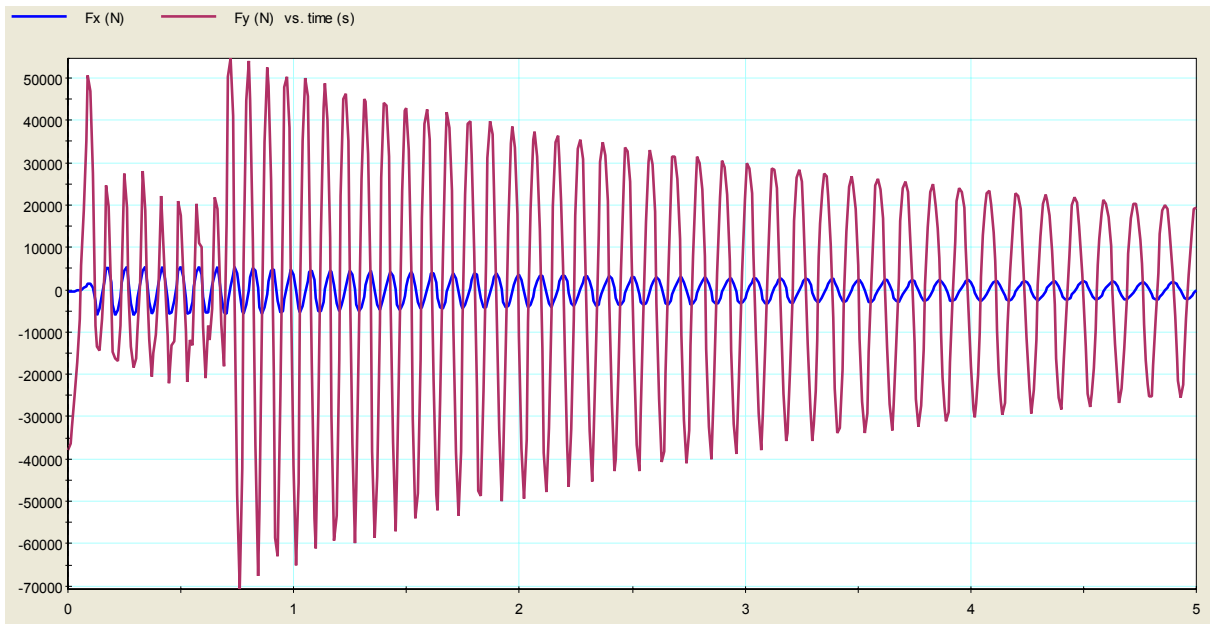
Slika 63. Povećani detalj pogonskog momenta elektromotora do trenutka $t = 1$ s



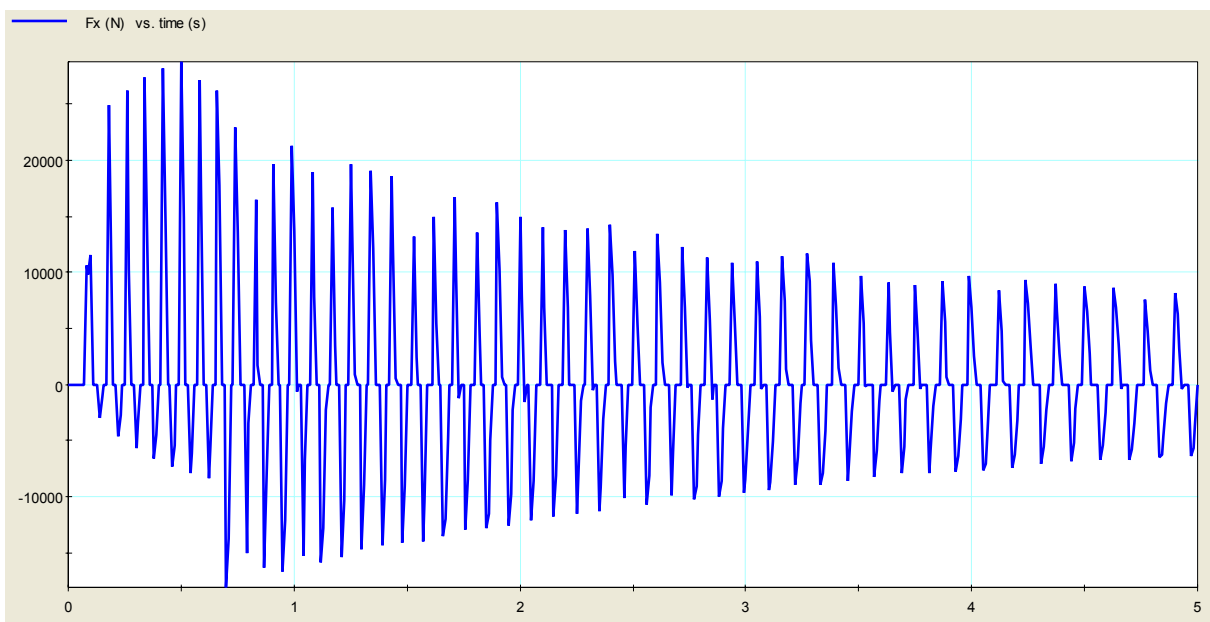
Slika 64. Povećani detalj momenta na spojci do $t = 5$ s



Slika 65. Povećani detalj zakretnog momenta u sredini vratila do $t = 5$ s



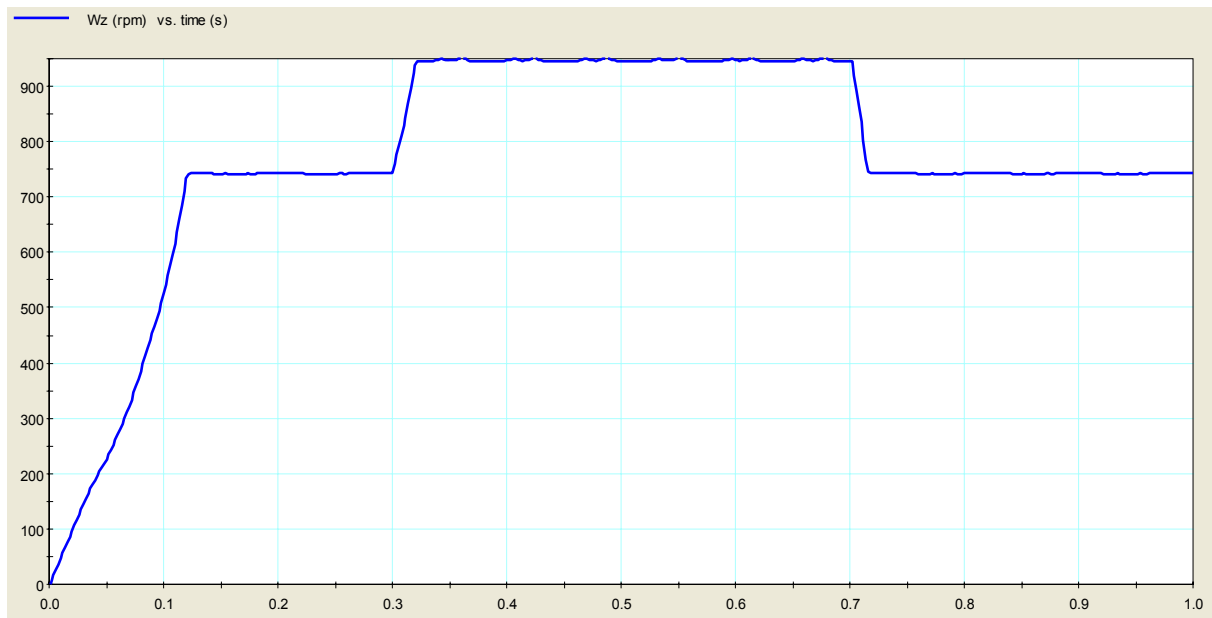
Slika 66. Povećani detalj reakcija u vezi križne glave i stapajice do $t = 5$ s



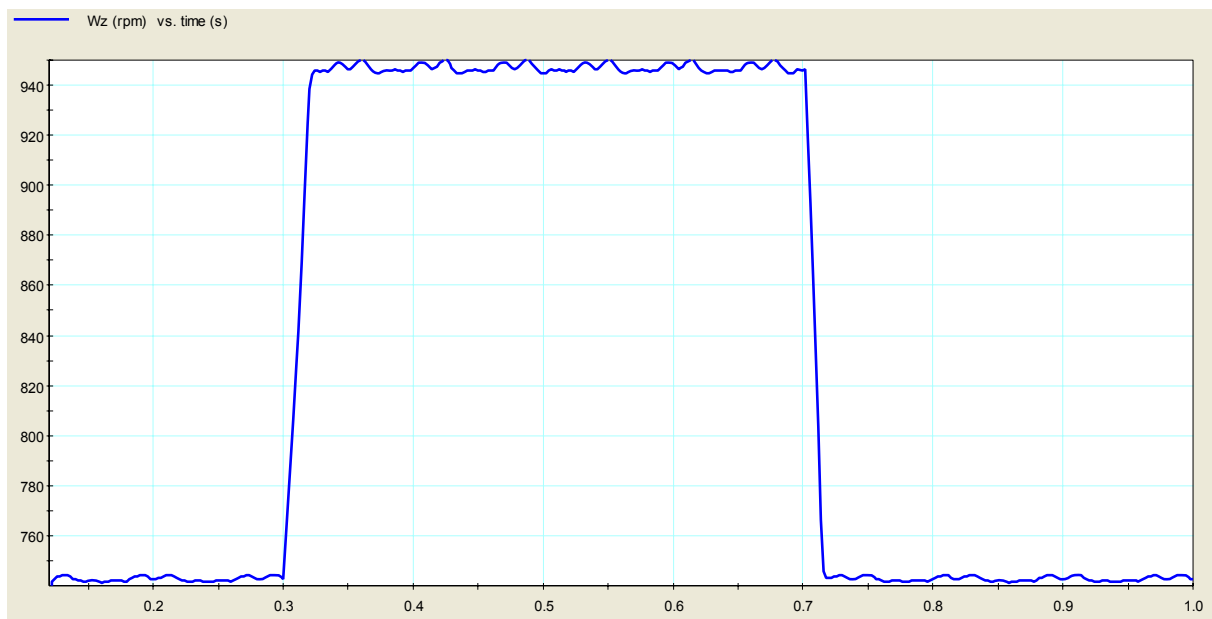
Slika 67. Povećani detalj reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta do $t = 5$ s

5.2.6. Analiza kod zaleta kompresora od 0 do 745 okr/min, ubrzanje do 950 okr/min i usporavanje do 745 okr/min

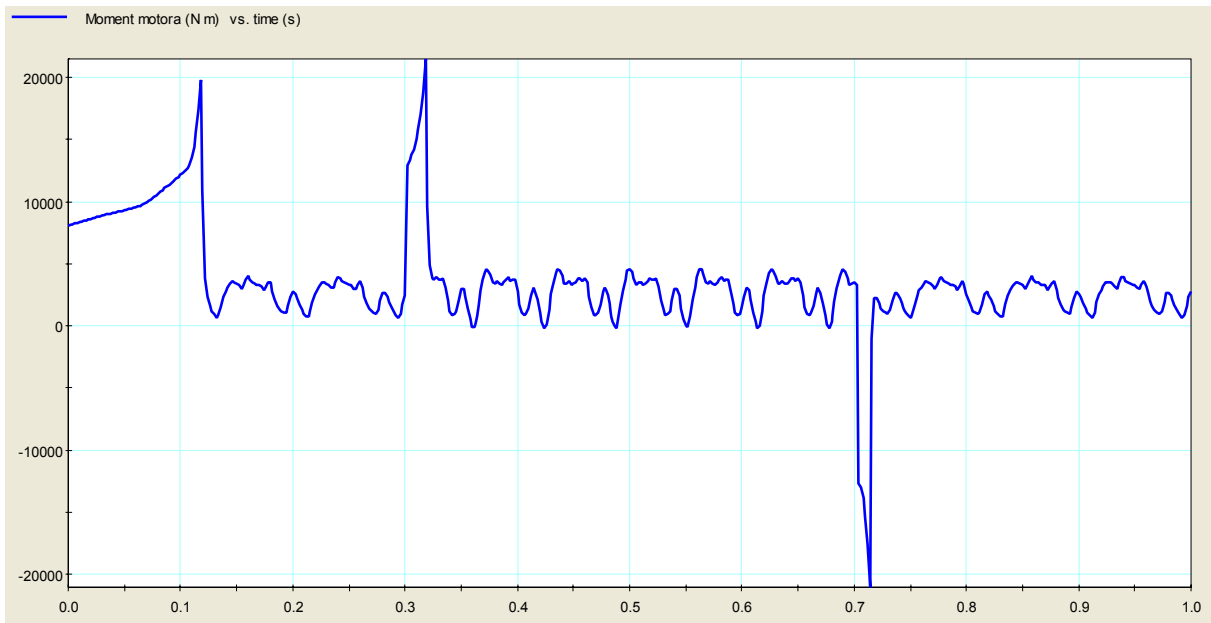
Analiza je provedena tako da se u trenutku $t = 0,3$ s brzina kompresoru poveća sa 745 na 950 okr/min i zatim u $t = 0,7$ s vrati na 745 okr/min.



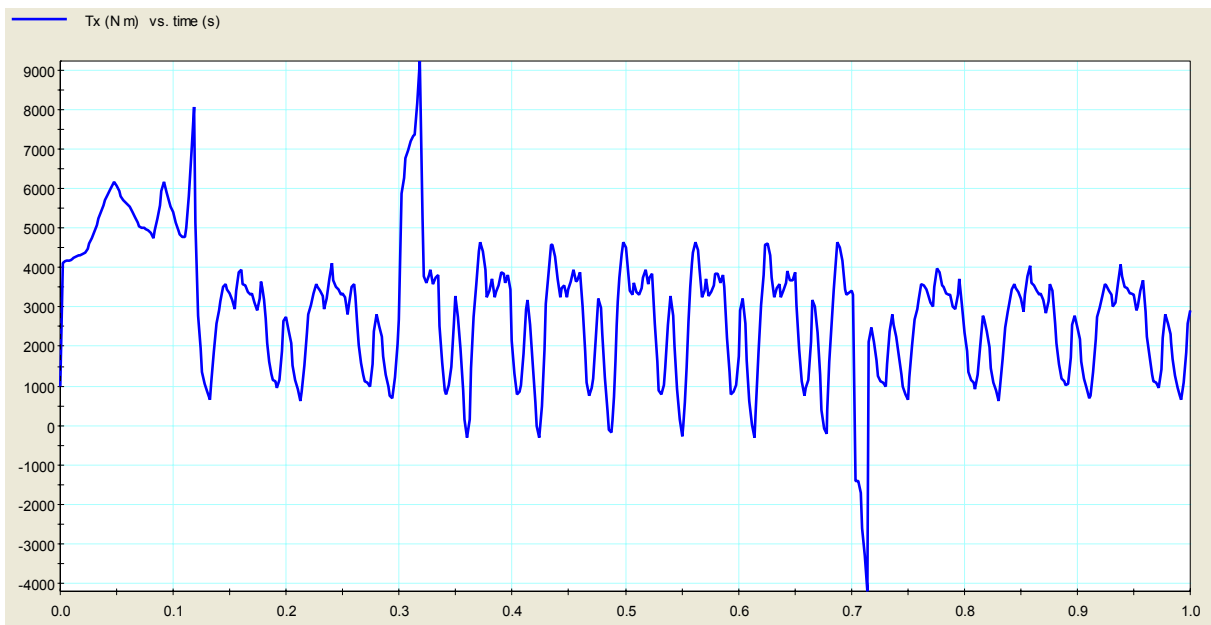
Slika 68. Dijagram brzine vrtnje rotora kompresora u ovisnosti o vremenu



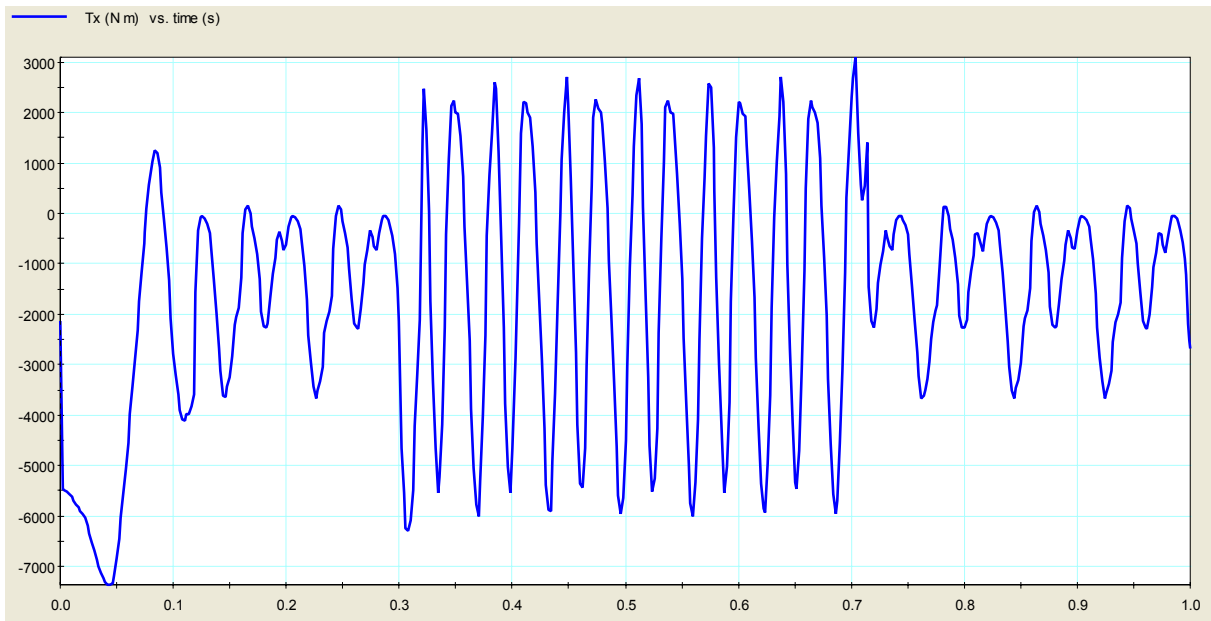
Slika 69. Povećani detalj brzine vrtnje rotora kompresora



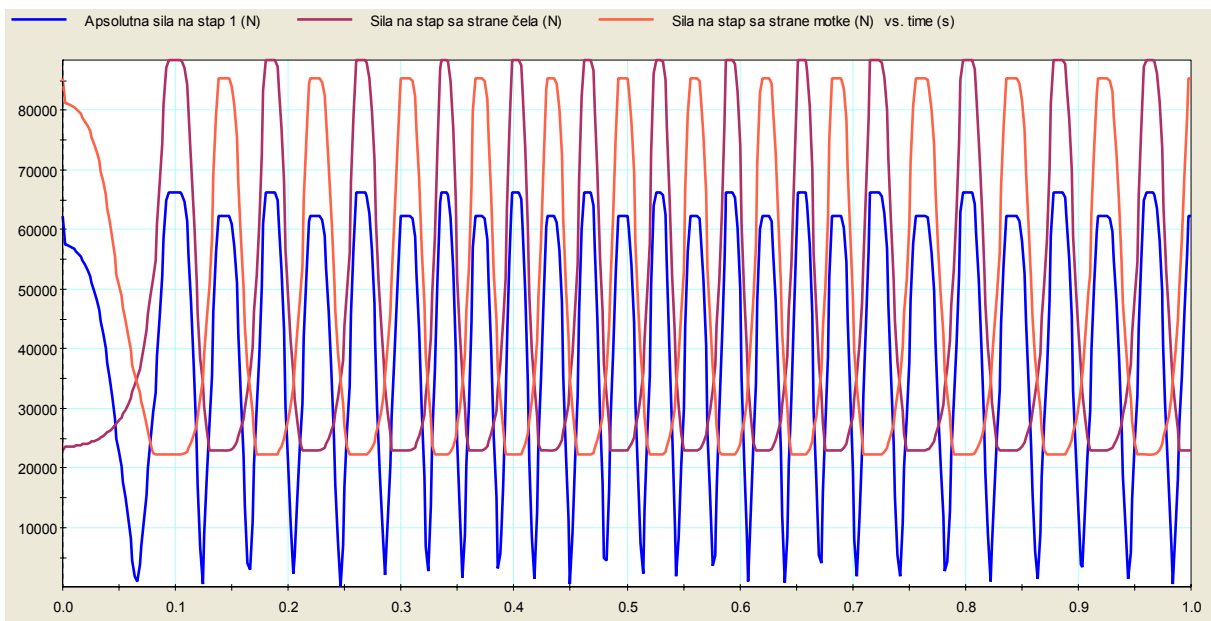
Slika 70. Dijagram pogonskog momenta elektromotora u ovisnosti o vremenu



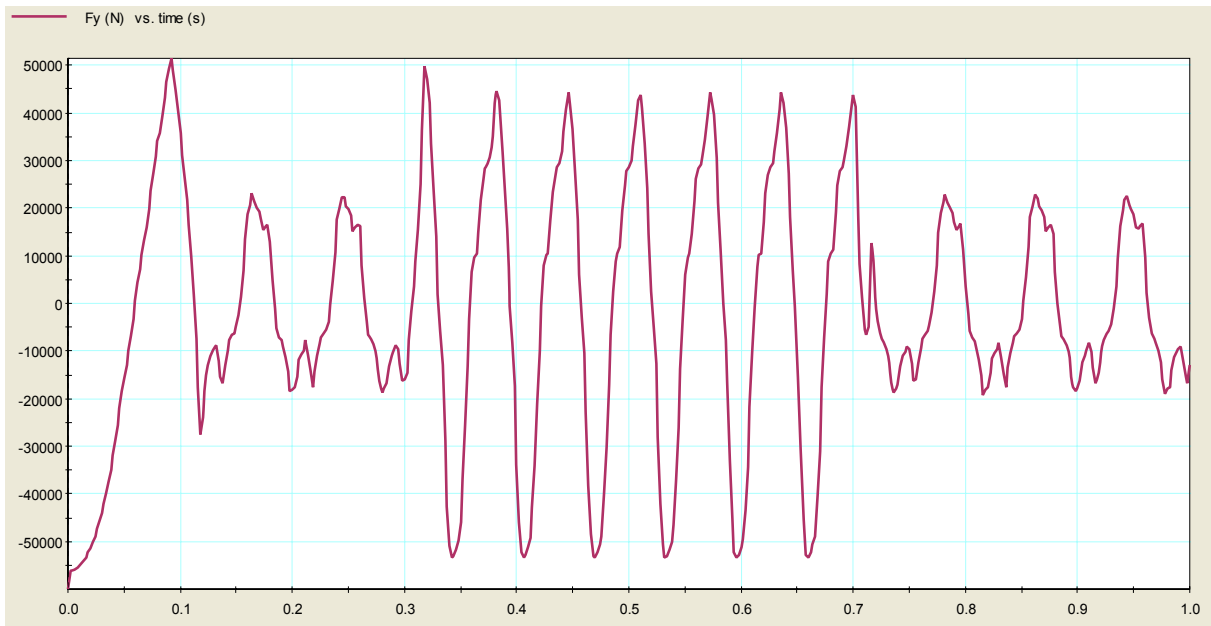
Slika 71. Dijagram momenta na elastičnoj spojci



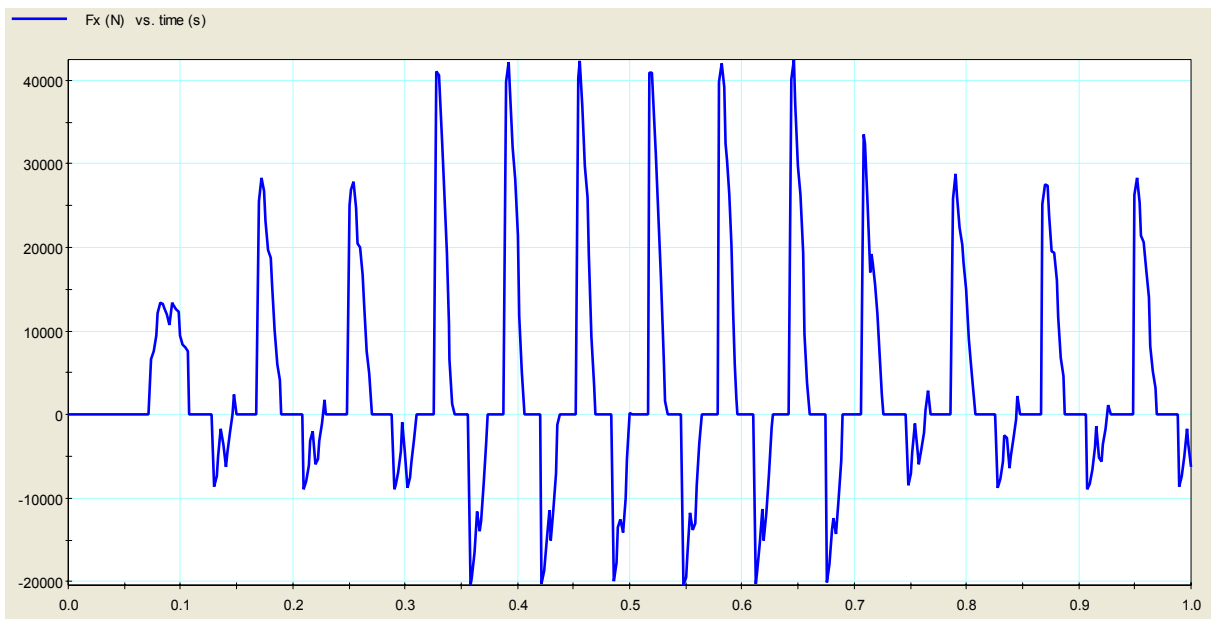
Slika 72. Dijagram zakretnog momenta u sredini vratila u ovisnosti o vremenu



Slika 73. Sile na stap 1 u ovisnosti o vremenu



Slika 74. Dijagram sila reakcija u vezi križne glave i stapajice u ovisnosti o vremenu



Slika 75. Dijagram sila reakcija u uležištenju koljenastog vratila i kućišta u ovisnosti o vremenu

6. ANALIZA NAPREŽANJA I POMAKA

Nakon izvršene dinamičke analize potrebno je provjeriti osnovne elemente mehanizma kod opterećenja dinamičkim silama. Analiza će se provesti u visualNastranu metodom konačnih elemenata, a rješenja će biti prikazana preko spektarske raspodjele naprežanja i pomaka, a biti će pokazana i deformacija analiziranog dijela.

6.1. Proračun naprežanja, pomaka i deformacija pomoću visualNastrana

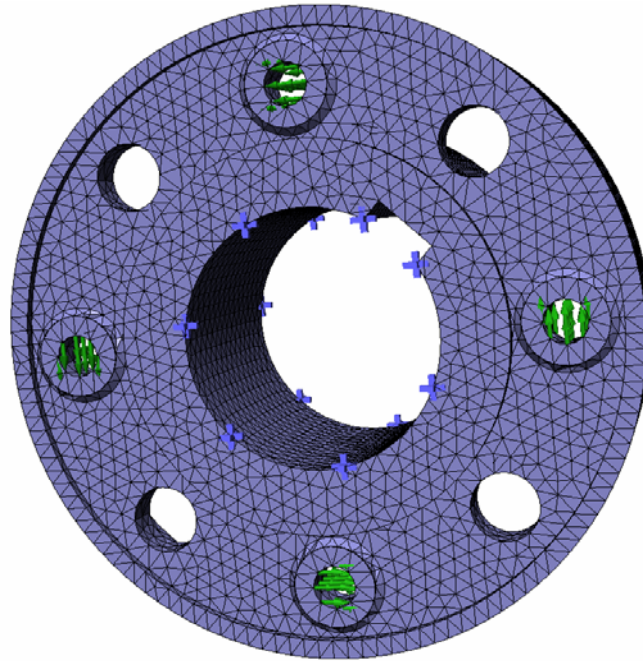
U programskom paketu visualNastranu, osim simuliranja stvarnih procesa, moguće je izvršiti i analizu naprežanja. Pri tome aplikacija za rješavanje problema iz mehanike koristi metodu konačnih elemenata. Da bi se izvršila analiza potrebno je napraviti 3D model promatranog elementa, što je učinjeno u SolidWorksu. Prije analize potrebno je odabrati materijale te postaviti sile i oslonce. Za materijal je odabran ANSI C1020 čelik iz biblioteke materijala visualNastrana. Nakon postavljanja sila i oslonaca generira se mreža konačnih elemenata, koju je moguće modificirati (mijenjati veličinu konačnih elemenata). Kao rješenje se dobije obojeni model sa spektrom boja od plave (minimalno naprežanje i pomaci) do crvene (maksimalno naprežanje i pomaci).

6.2. Naprežanja spojke

Spojka koja se koristi za spajanje elektromotora i kompresora je trodijelna, a analiza se provodi za dva dijela spojke – dio spojke do kompresora i srednji dio spojke. Dio spojke koji se spaja na kompresor nije analiziran pošto je oblikom identičan dijelu spojke što se spaja na elektromotor, a niti opterećenje se ne razlikuje.

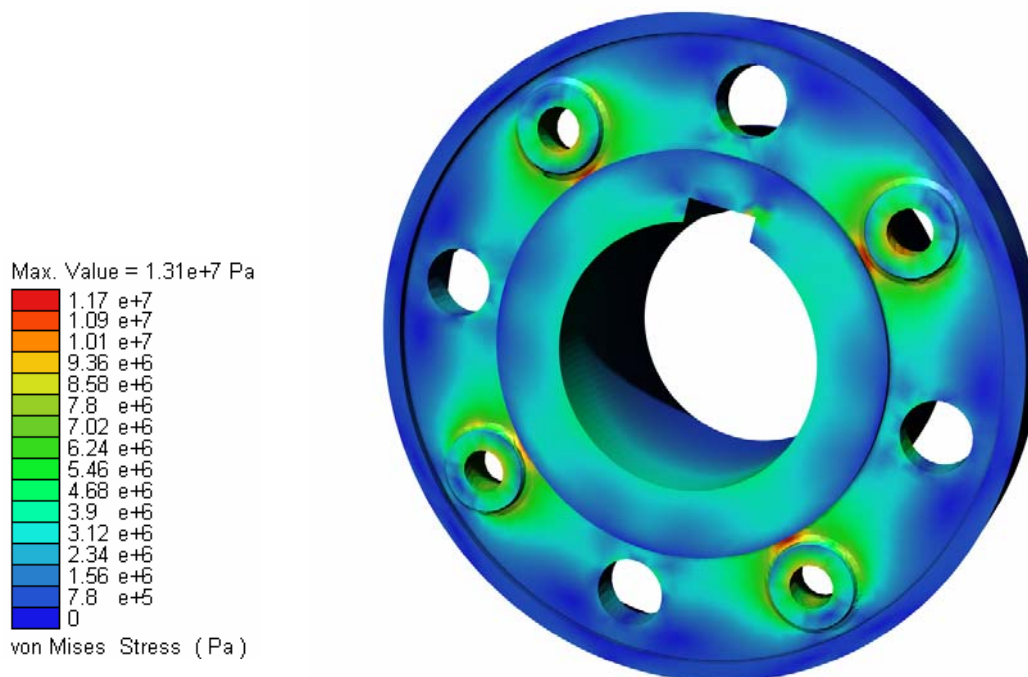
Naprežanja u elementima spojke računaju se prema nominalnom momentu elektromotora koji djeluje na spojku a iznosi $M_n = 8075$ Nm. Moment se na spojku prenosi preko četiri vijka. Opterećenje na spojku je u visualNastranu definirano kao sile koje djeluju na mjestima vijaka. Svaka sila iznosi 12270 N, proračun se nalazi u prilogu.

6.2.1. Analiza dijela spojke koji se spaja na elektromotor

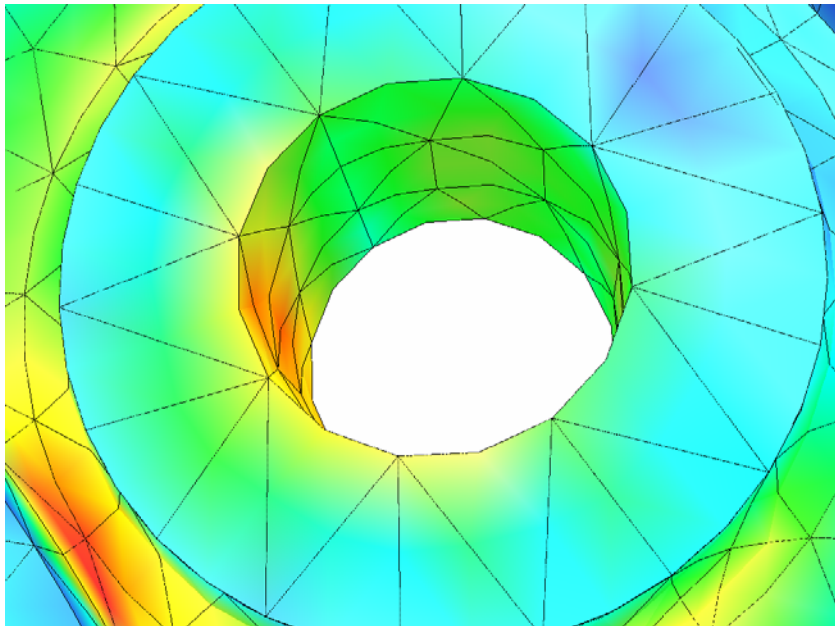


Slika 76. Oslonci i opterećenja dijela spojke kod elektromotoru

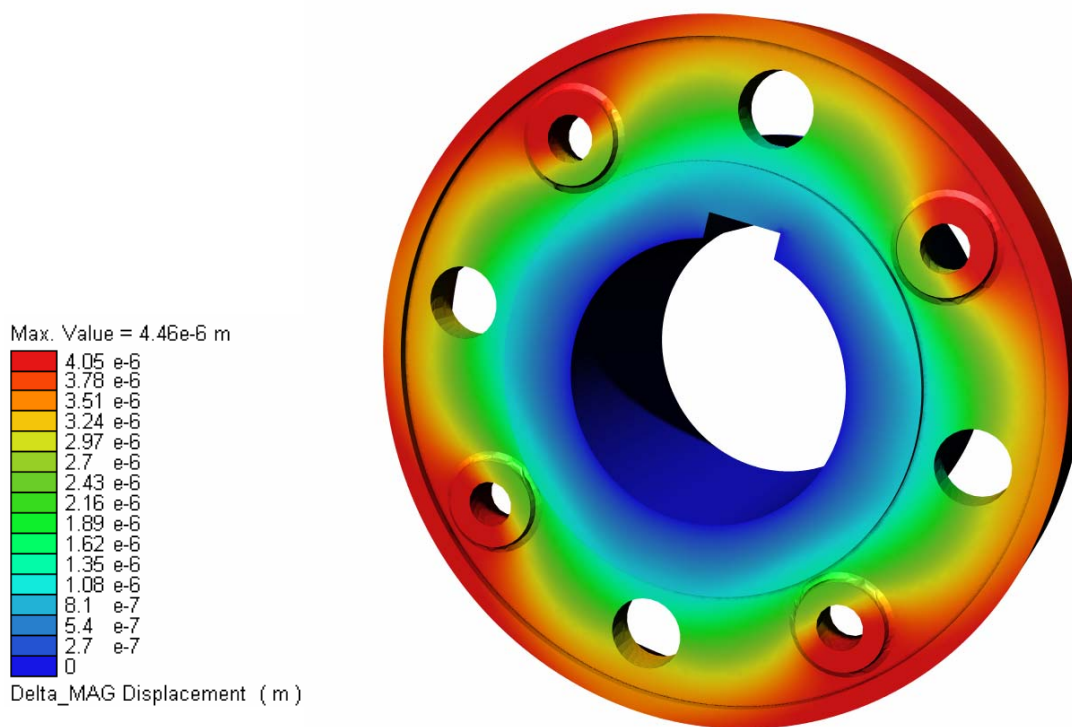
Na slici 81 prikazan je dio spojke kod elektromotora sa generiranom mrežom konačnih elemenata. Oslonci su prikazani plavom, a sile zelenom bojom.



Slika 77. Naprezanja na dijelu spojke kod elektromotora

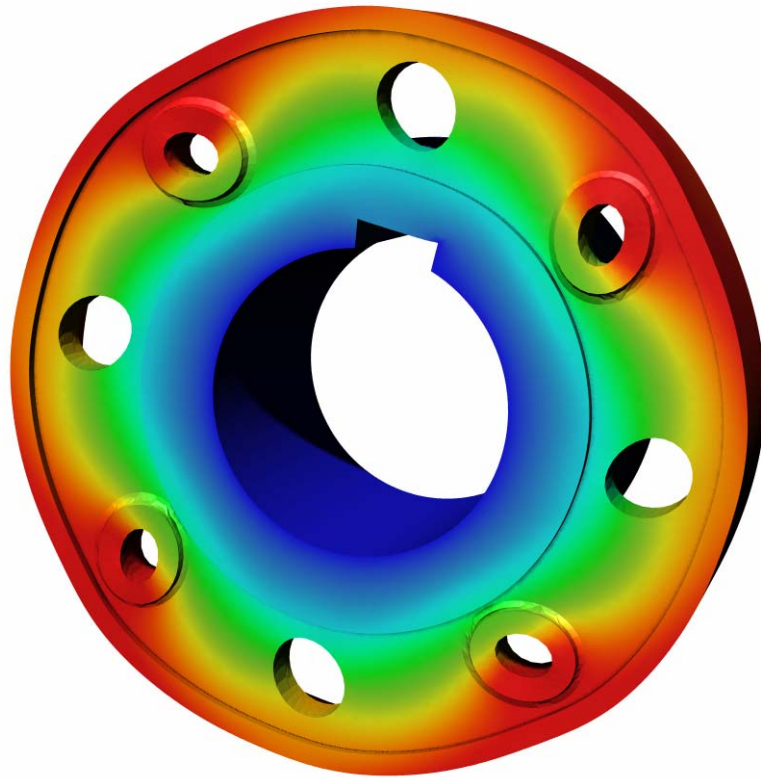


Slika 78. Detalj mreže konačnih elemenata oko mjesta opterećenja



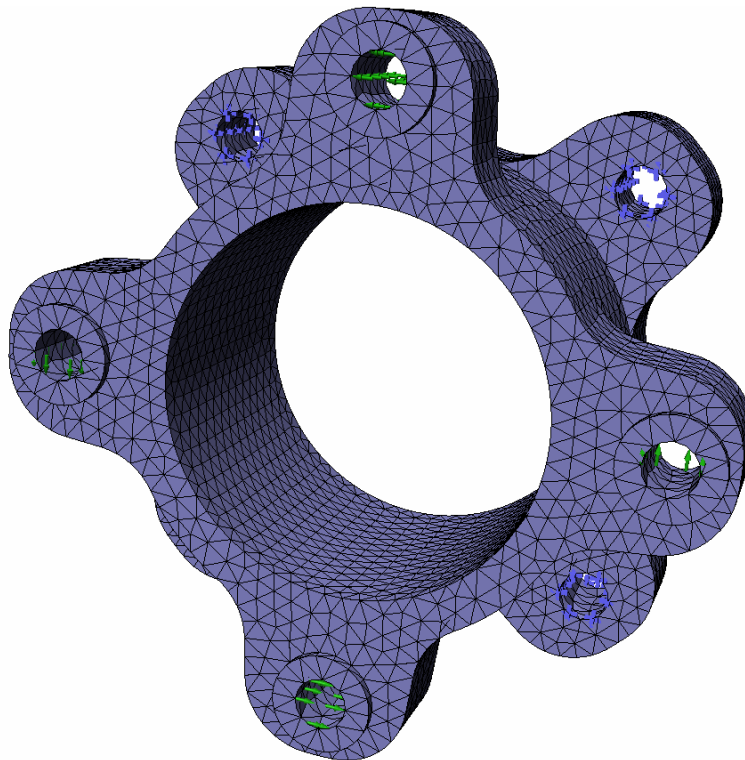
Slika 79. Raspodjela pomaka

Najveći pomak iznosi 0,00446 mm.

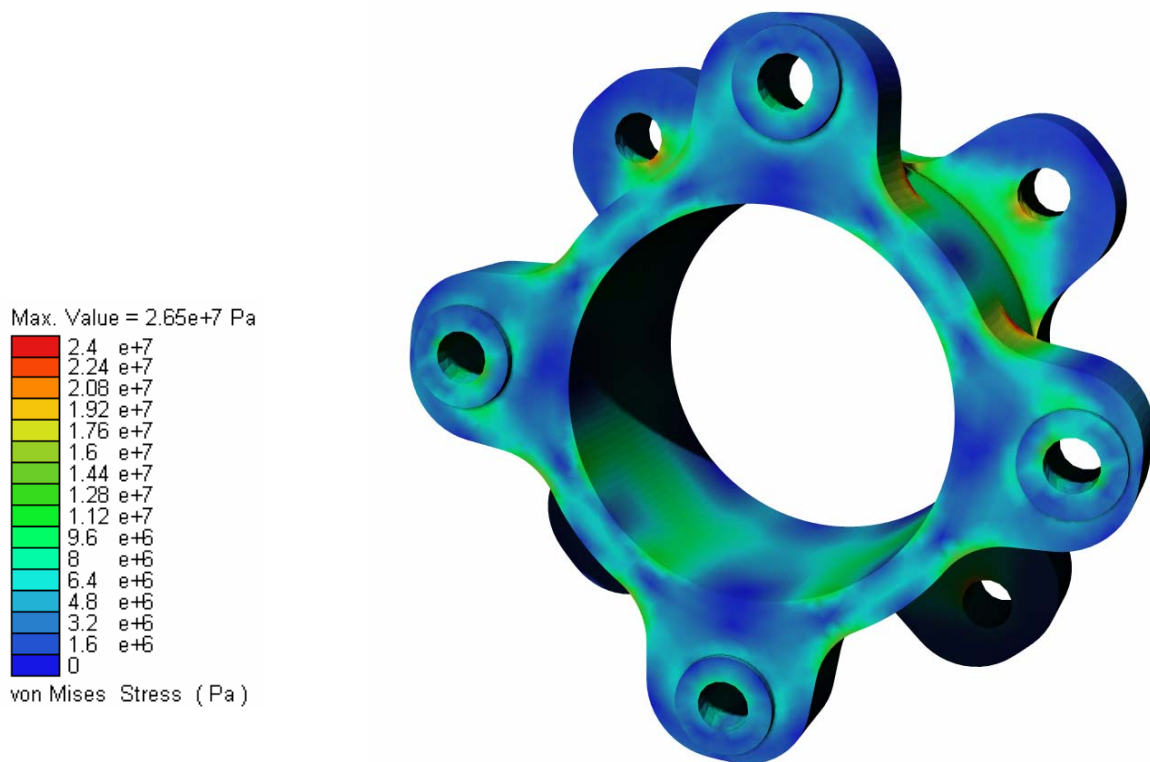


Slika 80. Deformirani oblik, deformacija je uvećana 2000 puta

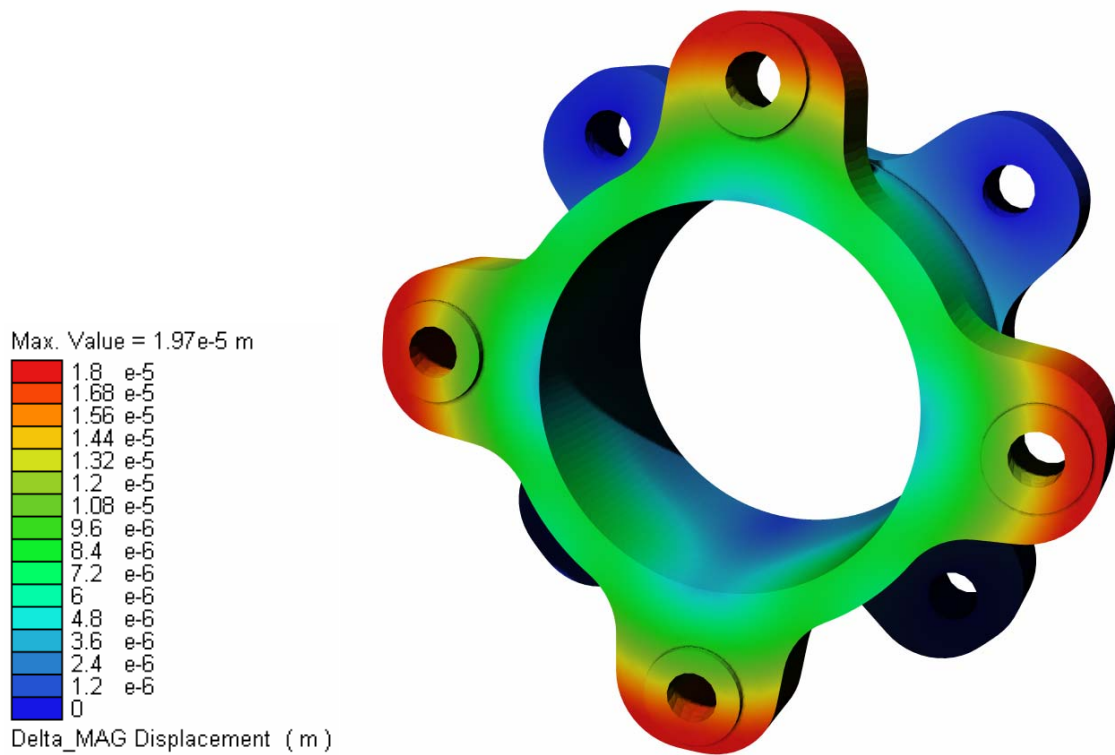
6.2.2. Analiza srednjeg dijela spojke



Slika 81. Oslonci i opterećenja na srednjem dijelu spojke

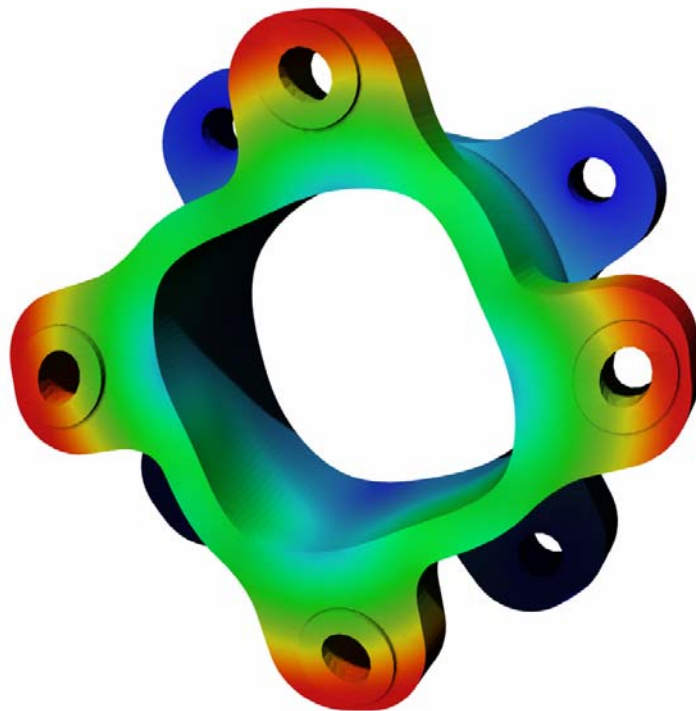


Slika 82. Naprezanja na dijelu spojke kod elektromotora



Slika 83. Raspodjela pomaka

Najveći pomak iznosi 0,01974 mm.



Slika 84. Deformirani oblik, deformacija je uvećana 2000 puta

7. ZAKLJUČAK

Provedena je kinematička i dinamička analiza stapnog kompresora tipa Dresser-Rand 4RDS-2, također je pomoću metode konačnih elemenata izračunato naprezanje u pojedinim dijelovima mehanizma čime je obavljen primarni zadatak ovoga rada. Najviše je korišten programski paket visualNastran koji se pokazao kao vrlo moćan alat za simulaciju stvarnosti. Ne mogu mu se naći veće zamjerke i ovaj zadatak je gotovo u potpunosti moguće obaviti u njemu te nije bilo potrebe za posezanjem u druge programske pakete. Od ostalih aplikacija korišteni su SolidWorks u kojem je izrađen sklop elektromotora i kompresora, te Mathcad za izradu proračuna.

Analizu mehanizma moguće je provesti analitički ali osim što iziskuje više vremena, puno je kompliciranije, a i veća je mogućnost pogreške. Korištenjem računala i odgovarajućih aplikacija ovakva analiza je puno brža i moguće je doći do nekih rezultata do kojih je analitičkim metodama gotovo nemoguće doći.

Iako ovaj rad nije obuhvatio strogo detaljnu analizu, napravljen je dovoljno realan model u čijoj je analizi može prikazati ponašanje bitnih dijelova mehanizma. Za detaljniju analizu bilo bi potrebno puno više vremena u pripremi modela i istraživanjima vezanima uz gubitke što bi rezultiralo manjim poboljšanjem ovakvog modela, a to nije bio cilj ovoga rada.

LITERATURA

- [1] O. Muftić, K. Drača: Uvod u teoriju mehanizama, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1974.
- [2] Inženjerski priručnik IP1, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- [3] M. Andrassy: Stapni kompresori, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [4] I. Mahalec, Z. Lulić, D. Kozarac: Motori s unutarnjim izgaranjem, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [5] A. Galović: Termodinamika 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [6] B. Kraut: Krautov strojarski priručnik, Axiom, Zagreb, 1997.
- [7] Service manual – Ingersoll-Rand

PRILOG:

- Proračun sila i tlakova u cilindru kompresora
- Proračun sila na spojci

PRORAČUN SILA I TLAKOVA

Stapaj:

$$b_s = 139,7 \text{ mm} = 0,139 \text{ m}$$

PRVI STUPANJ

Kompresioni prostor:

$$b_0 = 0,34 \cdot b_s = 0,34 \cdot 139,7 = 47,498 \text{ mm}$$

EkspONENT adijabate:

$$n = 1,3$$

Promjer stapa:

$$D_1 = 292,1 \text{ mm} = 0,2921 \text{ m}$$

Površina stapa:

$$A_1 = \frac{D_1^2 \cdot \pi}{4} = \frac{292,1^2 \cdot \pi}{4} = 6,472 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Promjer stapne motke:

$$d_1 = 53,975 \text{ mm}$$

Površina stapa na strani stapne motke:

$$A_{1s} = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d_1^2) = \frac{\pi}{4} (292,1^2 - 53,975^2) = 6,472 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Usisni tlak:

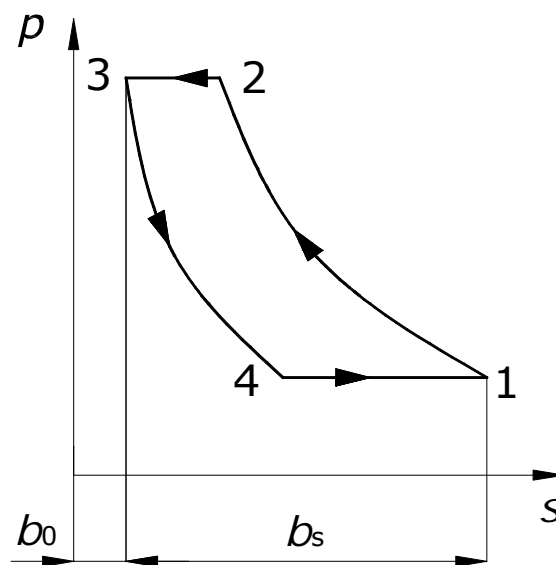
$$p_1 = 3,4 \text{ atm} = 3,4 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 3,44 \text{ bar}$$

$$p_4 = p_1$$

Tlak kompresije:

$$p_2 = 13 \text{ atm} = 13 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 13,169 \text{ bar}$$

$$p_3 = p_2$$



Slika 1. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa

Karakteristični položaji stapa:

$$s_1 = b_s + b_0 = 139,7 + 47,498 = 187,198 \text{ mm}$$

$$s_2 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_1 = \left(\frac{3,44}{13,169} \right)^{\frac{1}{1,3}} \cdot 187,198 = 66,72 \text{ mm}$$

$$s_3 = b_0 = 47,498 \text{ mm}$$

$$s_4 = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_3 = \left(\frac{13,169}{3,44} \right)^{\frac{1}{1,3}} \cdot 47,498 = 133,26 \text{ mm}$$

Tlakovi:

$$s = b_0 \dots b_0 + b_s$$

Tlak kompresije:

$$p_k(s)_{1-2} = p_1 \cdot \left(\frac{s_1}{s}\right)^n \qquad p_k(s)_{2-3} = p_2$$

Tlak usisa:

$$p_u(s)_{3-4} = p_3 \cdot \left(\frac{s_3}{s}\right)^n \qquad p_u(s)_{4-1} = p_1$$

Sile

Sila na čelu stapa za vrijeme kompresije:

$$F_{k1}(s) = p_k(s) \cdot A_1$$

Sila na čelu stapa za vrijeme usisa:

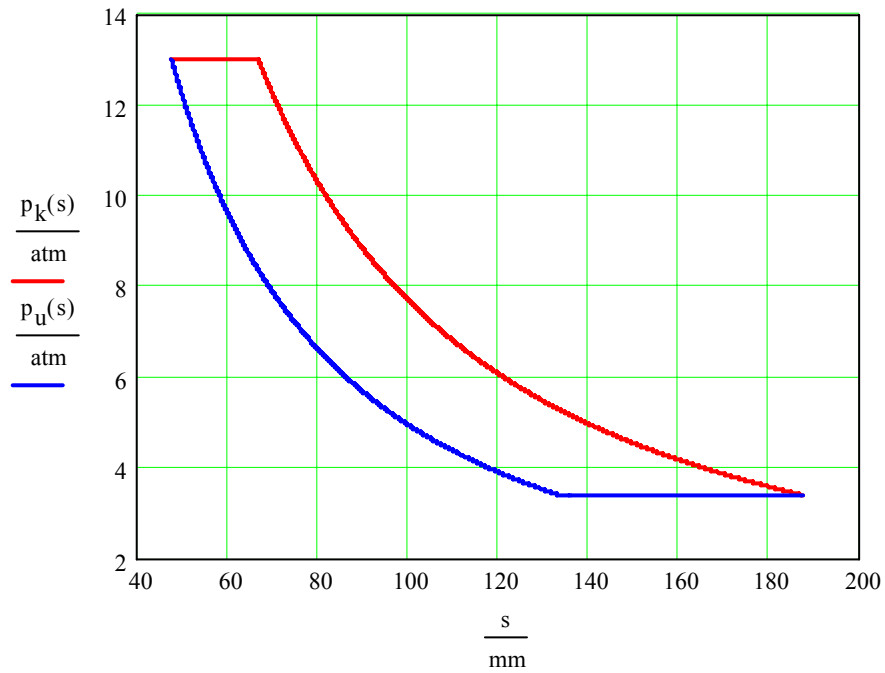
$$F_{u1}(s) = p_u(s) \cdot A_1$$

Sila na strani stapne motke za vrijeme kompresije:

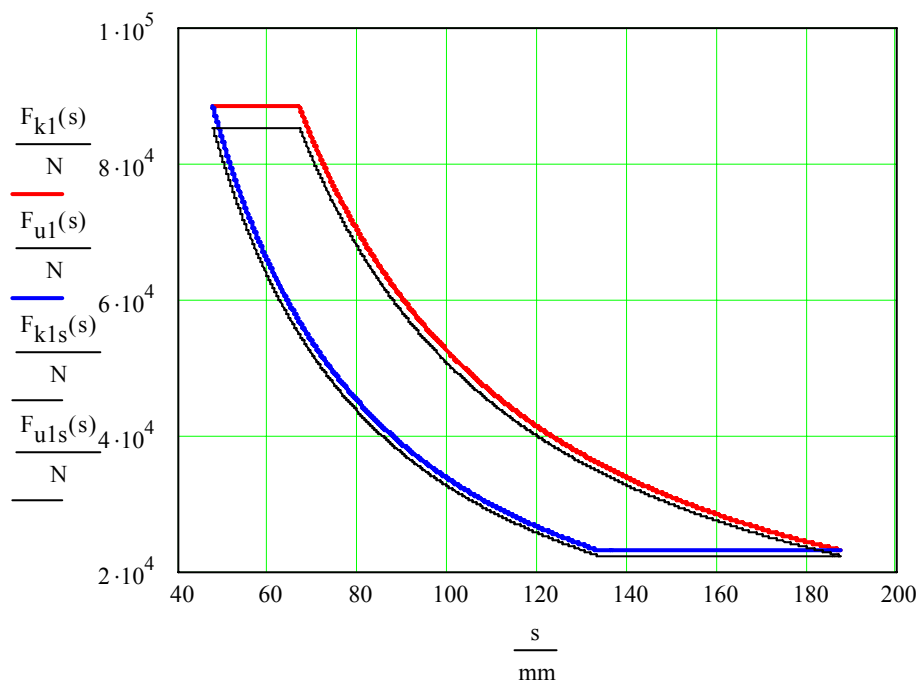
$$F_{k1s}(s) = p_k(s) \cdot A_{1s}$$

Sila na strani stapne motke za vrijeme usisa:

$$F_{u1s}(s) = p_u(s) \cdot A_{1s}$$



Slika 2. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa



Slika 3. Sila na čelo stapa (crvena i plava boja) i sila na strani stapne motke (crna boja)

DRUGI STUPANJ

Kompresioni prostor:

$$b_0 = 0,32 \cdot b_s = 0,32 \cdot 139,7 = 44,704 \text{ mm}$$

Eksponent adijabate:

$$n = 1,3$$

Promjer stapa:

$$D_2 = 152,4 \text{ mm}$$

Površina stapa:

$$A_2 = \frac{D_2^2 \cdot \pi}{4} = \frac{152,4^2 \cdot \pi}{4} = 1,824 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Promjer stapne motke:

$$d_2 = 53,975 \text{ mm}$$

Površina stapa na strani stapne motke:

$$A_{2s} = \frac{\pi}{4} (D_2^2 - d_2^2) = \frac{\pi}{4} (152,4^2 - 53,975^2) = 1,595 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

Usisni tlak:

$$p_1 = 12 \text{ atm} = 12 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 12,156 \text{ bar}$$

$$p_4 = p_1$$

Tlak kompresije:

$$p_2 = 13 \text{ atm} = 47 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 47,611 \text{ bar}$$

$$p_3 = p_2$$

Karakteristični položaji stapa:

$$s_1 = b_s + b_0 = 139,7 + 44,704 = 184,404 \text{ mm}$$

$$s_2 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_1 = \left(\frac{12,156}{47,611} \right)^{\frac{1}{1,3}} \cdot 184,404 = 64,52 \text{ mm}$$

$$s_3 = b_0 = 44,704 \text{ mm}$$

$$s_4 = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot s_3 = \left(\frac{47,611}{12,156} \right)^{\frac{1}{1,3}} \cdot 44,704 = 127,77 \text{ mm}$$

Tlakovi:

$$s = b_0 \dots b_0 + b_s$$

Tlak kompresije:

$$p_k(s)_{1-2} = p_1 \cdot \left(\frac{s_1}{s} \right)^n \qquad p_k(s)_{2-3} = p_2$$

Tlak usisa:

$$p_u(s)_{3-4} = p_3 \cdot \left(\frac{s_3}{s} \right)^n \qquad p_u(s)_{4-1} = p_1$$

Sile

Sila na čelu stapa za vrijeme kompresije:

$$F_{k2}(s) = p_k(s) \cdot A_2$$

Sila na čelu stapa za vrijeme usisa:

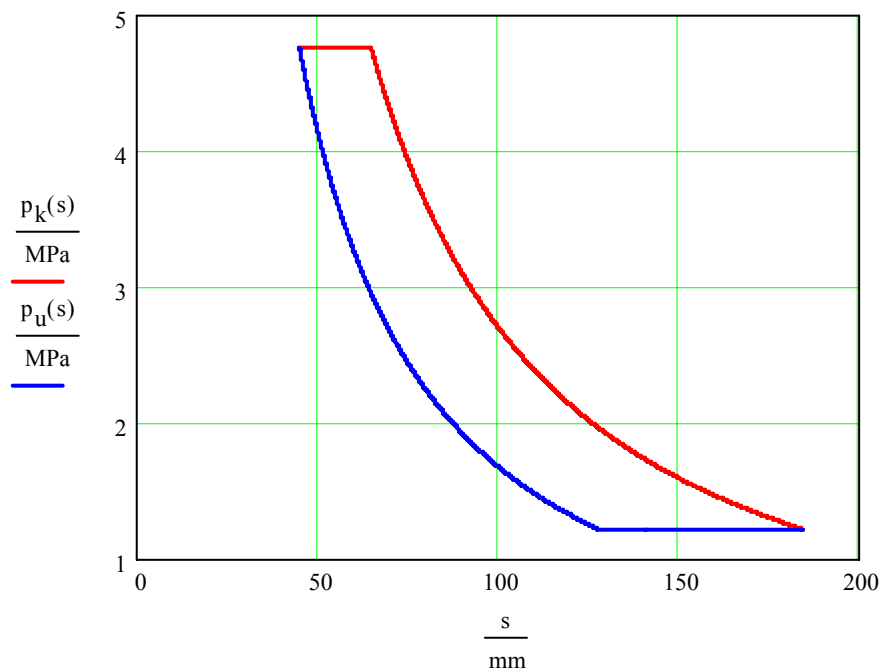
$$F_{u2}(s) = p_u(s) \cdot A_2$$

Sila na strani stapne motke za vrijeme kompresije:

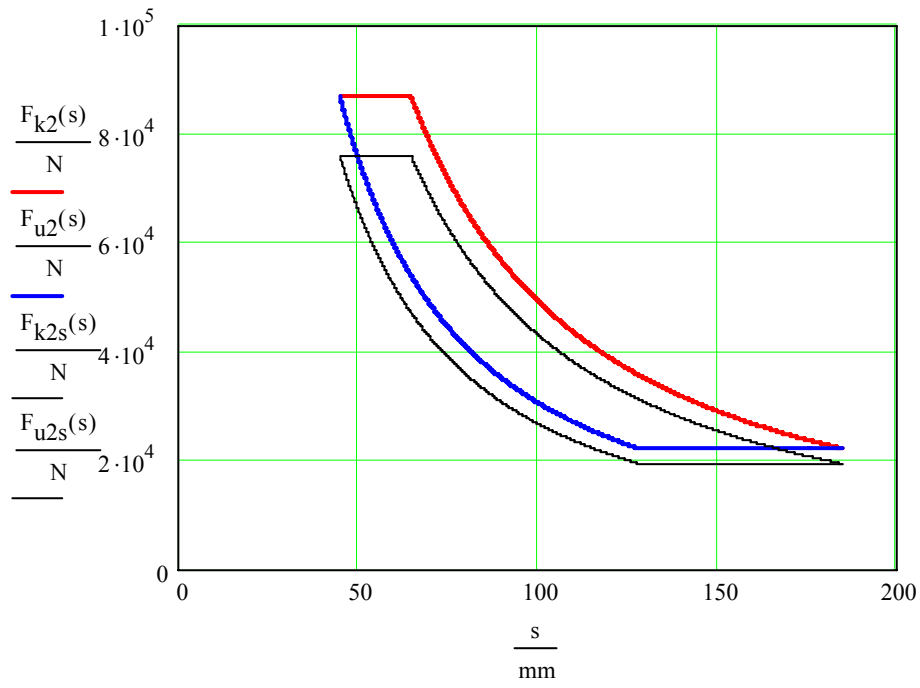
$$F_{k2s}(s) = p_k(s) \cdot A_{2s}$$

Sila na strani stapne motke za vrijeme usisa:

$$F_{u2s}(s) = p_u(s) \cdot A_{2s}$$



Slika 4. Promjena tlaka u ovisnosti o položaju stapa



Slika 5. Sila na čelo stapa (crvena i plava boja) i sila na strani stapne motke (crna boja)

PRORAČUN SILA NA VIJCIMA SPOJKE

Snaga elektromotora:

$$P = 630 \text{ kW}$$

Brzina vrtnje kompresora:

$$\omega = \frac{745 \cdot \pi}{30} = 78,016 \text{ Hz}$$

Nominalni zakretni moment elektromotora:

$$M_t = \frac{P}{\omega} = \frac{630}{78,016} = 8\,075 \text{ Nm}$$

Promjer na kojemu se nalaze vijci:

$$d_1 = 329 \text{ mm}$$

Sila na jednom vijku:

$$F = \frac{M_t}{4 \cdot r_1} = \frac{8075}{4 \cdot 0,1645} = 12270 \text{ N}$$