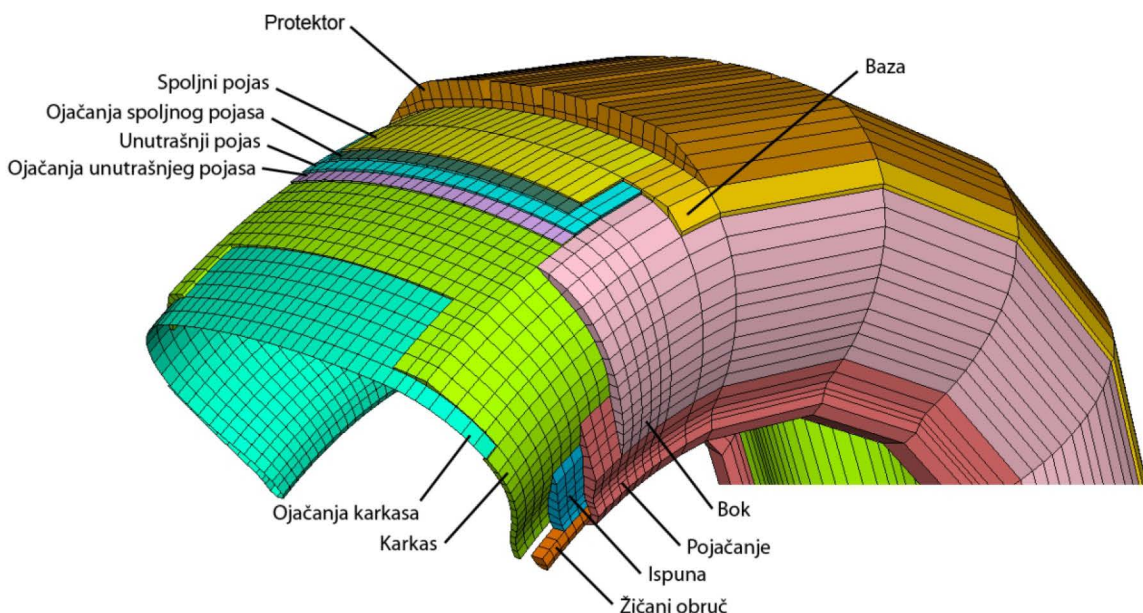


**Nikola Korunović
Miroslav Trajanović**

ANALIZA MEHANIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Monografija





UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET



LABORATORIJA ZA INTELIGENTNE
PROIZVODNE SISTEME (LIPS)



Nikola Korunović
Miroslav Trajanović

Analiza mehaničkog ponašanja pneumatika metodom konačnih elemenata

Monografija

Niš, 2024.

Naslov: **Analiza mehaničkog ponašanja pneumatika metodom konačnih elemenata**

Autori: **Dr Nikola Korunović**, vanr. prof. Mašinskog fakulteta u Nišu
Dr Miroslav Trajanović, red. prof. Mašinskog fakulteta u Nišu u penziji

Recenzenti: **Dr Nenad Filipović**, redovni profesor Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu
Dr Miroslav Živković, redovni profesor Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu
Dr Milan Banić, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu

Tehnički urednik: **Dr Nikola Korunović**, vanr. prof. Mašinskog fakulteta u Nišu

Izdavač: **Univerzitet u Nišu - Mašinski fakultet**

Za izdavača: **Dr Goran Janevski**, dekan, redovni profesor

Štampa: Štamparija Grafika Galeb, Matejevački put 13, 18106 Niš (Pantelej),
T: 018/571-222

Tiraž: 100 primeraka

Bibliografska oznaka: ISBN 978-86-6055-184-1

Odluka: Na osnovu odluke Nastavno-naučnog veća Mašinskog fakulteta u Nišu od 28.08.2024. br. 612-302-2-1/2024 odobrava se publikovanje navedene monografije za upotrebu u akademskoj nastavi i struci.

**CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд**

629.3.027.514:[539.3/.4:519.673

КОРУНОВИЋ, Никола, 1970-

**Analiza mehaničkog ponašanja pneumatika metodom konačnih elemenata :
monografija / Nikola Korunović, Miroslav Trajanović. - Niš : Univerzitet, Mašinski fakultet,
2024 (Niš : Grafika Galeb). - 232 str. : ilustr. ; 21 cm**

Tiraž 100. - Bibliografija: str. 227-232.

ISBN 978-86-6055-184-1

1. Трајановић, Мирослав, 1954- [аутор]

а) Пнеуматици -- Механичке особине -- Анализа -- Метод коначних елемената

COBISS.SR-ID 157919241

Kompanija **Tigar Tyres** je kao dugogodišnji saradnik Mašinskog fakulteta u Nišu i partner u različitim projektima sa zadovoljstvom podržala da se ova značajna monografija pojavi pred očima stručne i opšte javnosti.

Predgovor

Ova monografija nastala je kao plod dugogodišnjeg rada autora na analizi mehaničkog ponašanja pneumatika (autogume). Sve je počelo sredinom devedesetih godina prošlog veka, nizom bilateralnih projekata Mašinskog fakulteta u Nišu i fabrike TIGAR iz Pirota^{1,2,3}. Potom je saradnja pomenutih organizacija nastavljena kroz razvojni projekat sufinansiran od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije⁴. U okviru pomenutih projekata razvijeni su inicijalni geometrijski modeli pneumatika i inicijalni modeli za analizu ponašanja pneumatika u eksploataciji primenom metoda konačnih elemenata. Promena vlasničke strukture fabrike Tigar i njena transformacija u Tigar Tyres promenila je sadržaj saradnje ove dve organizacije, ali su na Mašinskom fakultetu u Nišu nastavljena istraživanja vezana za računarski podržano projektovanje pneumatika, pre svega u cilju izrade doktorske disertacije jednog od autora. Nova saradnja Mašinskog fakulteta, ovog puta sa institutom InTyre iz Moskve, tj. fabrikom Cordiant iz Jaroslava, dovela je do intenziviranja istraživanja kroz dva bilateralna projekta^{5,6} i rezultirala transferom tehnologije računarski podržane analize mehaničkog ponašanja pneumatika sa Mašinskog fakulteta u fabriku Cordiant. Rezultat svih pomenutih istraživanja su tri magistarske teze, jedna doktorska disertacija, veliki broj radova u naučnim časopisima i na konferencijama, kao i procedure primenljive u svakodnevnom radu na projektovanju i konstruisanju pneumatika. Prema našim saznanjima, stečeno znanje i iskustvo jedinstveni su na teritoriji Balkana a u nekim aspektima i šire, a ovde se svakako radi o prvoj knjizi na srpskom jeziku koja se bavi ovom tematikom.

Mnogo je ljudi kojima autori duguju zahvalnost jer su pomogli da se pomenuta istraživanja i projekti realizuju. Najpre su tu inženjeri fabrike Tigar Tyres, a pre svih Dejan Manić, Siniša Panić i Petar Nikolić, koji su omogućili da se prebrode poteškoće vezane za inicijalni razvoj modela pneumatika. Na naše zadovoljstvo, rukovodstvo kompanije Tigar Tyres takođe je donelo odluku da pomenuta kompanija učestvuje u finansiranju izdavanja ovog teksta. Veliku zahvalnost dugujemo i prof. Gradimiru Danonu, koji je godinama bio pokretač srpske nauke u oblasti pneumatika i organizovao naučne skupove koji su uspevali da okupe sve one koji su za ovu temu bili zainteresovani. Veći broj istraživača sa Mašinskog fakulteta u Nišu je bio uključen u istraživanja čiji su rezultati objavljeni u monografiji, pri čemu najveću zahvalnost dugujemo prof. Milošu Stojkoviću, prof. Draganu Mišiću i prof. Milošu Madiću, koji su svojim idejama doprineli da neki od

1 Razvoj konstrukcije i alata automobilske pneumatika TG621, 1997-1998.

2 Projektovanje, ispitivanje i analiza ponašanja auto gume, 1997-2001.

3 Razvoj konstrukcije i alata automobilske pneumatika za visoke brzine TG635, 1999.

4 Računarski podržan razvoj pneumatika, 2002 - 2004.

5 Simulacija ponašanja i optimizacija konstrukcije pneumatika za putnička vozila primenom MKE, 2012.

6 Istraživanje mogućih poboljšanja MKE modela pneumatika i metodologije simulacije ponašanja pneumatika, 2013-2014.

ovde opisanih rezultata budu kvalitetniji. Zahvaljujemo se inženjerima fabrike Cordiant, Valentinu Anreeviču Žoginu i Aleksandru Aleksandroviču Kapustinu, koji su najviše pomogli da se uspostavi naša dugogodišnja saradnja. Zahvaljujemo se recenzentima, prof. Nenadu Filipoviću, prof. Miroslavu Živkoviću i prof. Milanu Baniću, na podršci i savetima koje su nam dali u toku pripreme rukopisa. Malo je prostora da se pomeni svi oni koji su pomogli da ova knjiga ugleda svetlost dana i žao nam je ako smo nekoga nepravedno izostavili, a svima njima dugujemo neizmernu zahvalnost.

Sadržaj

1	UVOD	1
1.1	POJAM I KRATKA ISTORIJA PNEUMATIKA	2
1.2	OSNOVNE FUNKCIJE PNEUMATIKA.....	2
1.3	KONSTRUKCIJA PNEUMATIKA	3
1.4	OSNOVNE DIMENZIJE PNEUMATIKA.....	5
1.5	PROJEKTOVANJE I KONSTRUISANJE PNEUMATIKA	5
1.6	IZDRŽLJIVOST PNEUMATIKA	7
1.7	POTREBA ZA ANALIZOM MEHANIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA PRIMENOM METODA KONAČNIH ELEMENATA (MKE)	8
1.8	TIPOVI ANALIZE AUTOMOBILSKOG PNEUMATIKA PRIMENOM MKE	9
1.9	MEHANIČKO PONAŠANJE PNEUMATIKA	10
1.9.1	<i>Mehanizam nošenja vertikalnog opterećenja</i>	<i>10</i>
1.9.2	<i>Kotrljanje pneumatika</i>	<i>12</i>
1.9.3	<i>Svojstva pneumatika</i>	<i>12</i>
1.9.3.1	Sile i momenti pneumatika.....	12
1.9.3.1.1	SAE koordinatni sistem	13
1.9.3.1.2	Definicija sila i momenata pneumatika	14
1.9.3.2	Eksplotacione promenljive pneumatika.....	14
1.9.3.3	Dimenzije koje se koriste pri definisanju mehaničkih svojstava pneumatika 15	
1.9.3.4	Klizanje u kontaktu	16
1.9.3.5	Nosivost i radjalna krutost	17
2	MODELIRANJE MATERIJALA ZA POTREBE ANALIZE PNEUMATIKA PRIMENOM MKE	18
2.1	UVODNE NAPOMENE	18
2.2	MODELIRANJE GUME ZA MKE I ANALIZA GUMENIH PROIZVODA PRIMENOM MKE	18
2.2.1	<i>Projektovanje i konstruisanje proizvoda na bazi gume i primena MKE</i> <i>18</i>	
2.2.2	<i>Modeliranje mehaničkog ponašanja proizvoda od gume</i>	<i>19</i>
2.2.3	<i>Proces strukturne analize proizvoda od gume</i>	<i>20</i>
2.2.3.1	Izbor modela materijala	20
2.2.3.2	Prikupljanje eksperimentalnih podataka o materijalu	22
2.2.3.3	Određivanje koeficijenata modela materijala	23
2.3	PRIMER: MODELIRANJE ČISTO GUMENIH MATERIJALA KOJI ULAZE U SASTAV PNEUMATIKA I ANALIZA MEHANIČKOG PONAŠANJA GUMENIH UZORAKA PRIMENOM MKE	24
2.3.1	<i>Postavljanje zadatka</i>	<i>25</i>
2.3.1.1	Specificiranje problema.....	25
2.3.1.2	Asimilacija podataka	25
2.3.1.3	Specificiranje analize	26
2.3.2	<i>Priprema analize (pretprocesiranje).....</i>	<i>26</i>
2.3.2.1	Modeliranje materijala	26

2.3.2.1.1	Izbor modela materijala	26
2.3.2.1.2	Prikupljanje eksperimentalnih podataka o materijalu	27
2.3.2.1.3	Određivanje koeficijenata modela materijala	33
2.3.2.1.4	Provera kvaliteta modela materijala	36
2.3.2.1.5	Provera mogućnosti programa da realno reprodukuje eksperimentalne podatke – test jednog elementa	37
2.3.2.2	Idealizacija i diskretizacija modela	42
2.3.2.2.1	Jednoosno istezanje	42
2.3.2.2.2	Jednako-dvoosno istezanje	44
2.3.2.2.3	Ravansko istezanje	45
2.3.3	<i>Rezultati analiza MKE modela laboratorijskih uzoraka materijala</i>	45
2.3.3.1	Jednoosno zatezanje	45
2.3.3.2	Jednako-dvoosno zatezanje	48
2.3.3.3	Ravansko zatezanje	49
2.3.4	<i>Zaključak</i>	51
2.4	MODELIRANJE KOMPOZITA NA BAZI GUME	52
2.4.1	<i>Struktura kompozitnih komponenti pneumatika</i>	52
2.4.2	<i>Karakteristike kompozita koji ulaze u sastav pneumatika</i>	52
2.4.3	<i>Pristupi modeliranju kompozitnih strukturnih komponenti pneumatika</i>	54
2.4.3.1	Modeliranje kompozitnih strukturnih komponenti pneumatika pomoću “Rebar” (REinforcement BAR) elemenata	54
2.4.3.2	Modeliranje korda	55
2.4.3.2.1	Linearni modeli materijala	57
2.4.3.2.2	Nelinearni modeli materijala	57
2.5	PRIMER: IDENTIFIKACIJA PARAMETARA MODELA MATERIJALA KORIŠĆENIH ZA OPISIVANJE MEHANIČKOG PONAŠANJA KORDA	59
3	ANALIZA MEHANIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA PRIMENOM MKE.....	66
3.1	UVODNE NAPOMENE	66
3.2	MKE MODELI PNEUMATIKA	66
3.3	MINIMALNI MKE MODELI PNEUMATIKA NAMENJENI ANALIZI DEJSTVA STATIČKOG OPTEREĆENJA	67
3.4	ANALIZA MEHANIČKOG PONAŠANJA STATIČKI OPTEREĆENOG PNEUMATIKA	70
3.4.1	<i>Postavljanje zadatka</i>	70
3.4.1.1	Specificiranje problema	70
3.4.1.2	Asimilacija podataka	70
3.4.1.3	Specificiranje analize	72
3.4.2	<i>Priprema analize (pretprocesiranje)</i>	72
3.4.2.1	Modeliranje materijala	72
3.4.2.2	Idealizacija i diskretizacija	73
3.4.2.2.1	2D osnosimetrični MKE model	73
3.4.2.2.2	3D MKE model	76
3.4.2.3	Modeliranje korda	76
3.4.3	<i>Rezultati</i>	79
3.4.3.1	Osnosimetrični model	79
3.4.3.2	3D model	87

3.5	STACIONARNO KOTRLJANJE PNEUMATIKA – PRINCIP, MODELI, ANALIZE PRIMENOM MKE	99
3.5.1	<i>Uvodne napomene</i>	99
3.5.2	<i>Mešovita Ojler-Lagranžova formulacija stacionarnog kotrljanja</i>	99
3.5.3	<i>Zahtevi koji se postavljaju u pripremi analize pneumatika primenom MKE</i>	101
3.5.4	<i>CAD model pneumatika namenjen izradi MKE modela i vršenju parametarskih studija primenom MKE</i>	103
3.5.4.1	Sistem upisanih modela radijalnog preseka	103
3.5.4.2	Modeliranje gazećeg sloja	105
3.5.5	<i>MKE modeli pneumatika namenjeni analizi stacionarnog kotrljanja</i>	107
3.5.5.1	Od CAD modela do osnosimetričnog MKE modela pneumatika	107
3.5.5.2	3D MKE model pneumatika bez detaljnog gazećeg sloja	111
3.5.5.3	3D MKE model pneumatika sa detaljnim gazećim slojem	113
3.5.6	<i>Analize vršene primenom modela bez detaljnog gazećeg sloja</i>	119
3.5.6.1	Analiza pumpanja pneumatika	119
3.5.6.2	Analiza vertikalno opterećenog pneumatika	122
3.5.6.3	Analiza stacionarnog kotrljanja	123
3.5.6.3.1	Kočenje i ubrzavanje pri pravolinijskom kotrljanju	125
3.5.6.3.2	Skretanje pri slobodnom kotrljanju	127
3.5.7	<i>Analize vršene primenom modela sa detaljnim gazećim slojem</i> ...	132
3.5.7.1	Analiza vertikalno opterećenog pneumatika	133
3.5.7.2	Kočenje i ubrzavanje pri pravolinijskom kotrljanju	134
3.5.7.3	Skretanje pri slobodnom kotrljanju	137
3.5.7.4	Napomene	140
4	PRIMENA RAZVIJENIH MODELA I METODOLOGIJA	142
4.1	STUDIJA 1: ANALIZA KOTRLJANJA PNEUMATIKA NA DOBOŠU I EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA	142
4.1.1	<i>Uvodne napomene</i>	142
4.1.2	<i>MKE model za analizu kotrljanja pneumatika na dobošu</i>	143
4.1.3	<i>Eksperimentalno određivanje sila i momenata pneumatika na mašini sa dobošem</i>	145
4.1.4	<i>Eksperimentalno određivanje koeficijenta trenja gazeće podloge pneumatika</i>	154
4.1.5	<i>Poređenje eksperimentalnih i numeričkih rezultata</i>	158
4.1.6	<i>Simulacija eksperimentalnog određivanja koeficijenta trenja, kalibracija koeficijenta trenja</i>	168
4.1.6.1	Simulacija eksperimentalnog određivanja trenja gazeće površine pneumatika klizanjem gumenih uzoraka po ravnoj podlozi	168
4.1.6.2	Kalibracija koeficijenta trenja	172
4.1.7	<i>Rezultati analize skretanja pneumatika uz upotrebu kalibrisanog modela trenja</i>	172
4.2	STUDIJA 2: UTICAJ OBLIKA PROFILA I ŠIRINE POJASEVA NA MEHANIČKE KARAKTERISTIKE PNEUMATIKA	173

4.3	STUDIJA 3: VIŠECILJNA OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJE PNEUMATIKA	184
4.3.1	<i>Strukturna optimizacija</i>	184
4.3.2	<i>Strukturna optimizacija i pneumatik</i>	186
4.3.3	<i>Postavka zadataka optimizacije</i>	188
4.3.4	<i>Procedura za višeciljnu optimizaciju</i>	190
4.3.5	<i>Plan eksperimenta i rezultati MKE analiza</i>	191
4.3.6	<i>Matematički modeli za aproksimaciju površina odziva</i>	192
4.3.6.1	Razvoj MRA modela	194
4.3.6.2	Uticaj konstrukcionih parametara na specifični deformacioni rad	195
4.3.7	<i>Pareto optimizacija i rezultati</i>	196
4.3.7.1	Formulacija problema višeciljne optimizacije	196
4.3.7.2	Pristup rešavanju problema	197
4.3.8	<i>Rešenja višeciljne optimizacije</i>	198
4.3.9	<i>Zaključne napomene</i>	200
4.4	STUDIJA 4: UPOTREBA VISKOELASTIČNIH / VISKOPLASTIČNIH MODELA GUME U ANALIZI PNEUMATIKA	201
4.4.1	<i>Uvodne napomene</i>	201
4.4.2	<i>Uklapanje krivih</i>	203
4.4.3	<i>Probne simulacije u Abaqus-u upotrebom viskoelastičnih / viskoplastičnih modela gume</i>	205
4.4.4	<i>Zaključne napomene</i>	214
4.5	STUDIJA 5: UPOTREBA RAZLIČITIH MODELA KORDA U ANALIZI MEHANIČKOG PONAŠANJA PNEUMATIKA PRIMENOM MKE.....	214
4.5.1	<i>MKE modeli pneumatika i postavke analiza</i>	214
4.5.2	<i>Rezultati</i>	216
4.5.2.1	Osnosimetrični modeli – analiza pumpanja	216
4.5.2.2	3D modeli – analiza dejstva vertikalnog opterećenja	219
4.5.3	<i>Zaključne napomene</i>	223
5	ZAKLJUČAK	225
5.1	NAJVAŽNIJI REZULTATI.....	225
5.2	NAUČNI DOPRINOSI	226
6	LITERATURA	227