

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Аутомобилско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Предмет: Основе динамике моторних возила

Број индекса: 821/2013

Стефан Б. Тарицић

Динамичке карактеристике пнеуматика

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Данијела Милорадовић, ванр. проф. -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру завршног рада, кандидат треба да обради следеће теме:

- Пнеуматици као компоненте моторних возила (улога, конструкција)
- Динамички феномени у контакту пнеуматик-тло (трење, приањање, клизање, напони у газећем слоју)
- Динамичке карактеристике пнеуматика у подужном правцу
- Динамичке карактеристике пнеуматика у бочном правцу

Препоручена литература:

- [1] Јанковић, А.: „Динамика аутомобила“, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [2] Симић, Д.: „Моторна возила“, Научна књига, Београд, 1988.
- [3] Genta, G.: “Motorvehicledynamics”, WorldScientific, 1997
- [4] Wong, J.Y.: “Theoryofgroundvehicles”, JohnWiley&Sons, Inc., 2001
- [5] Pauwelussen, J.P.: “Essentials ofvehicledynamics”, ElsevierLtd., 2015

Крагујевац, март 2018. год.

Ментор:

др Данијела Милорадовић, ванр. проф.

Садржај

Резиме	1
Abstract	1
Увод.....	2
1. Пнеуматици као компоненте моторних возила	3
1.1 Улога пнеуматика.....	3
1.2 Конструкција пнеуматика	4
2. Динамички феномени у контакту пнеуматик-тло	10
2.1 Полупречници точка	10
2.2 Трење	11
2.3 Приањање.....	12
2.2.1 Механизми приањања	13
2.2.2 Фактори који утичу на приањање	15
2.2.3 Коефицијент приањања.....	15
2.3 Клизање	16
2.4 Напони у газећем слоју.....	17
3. Динамичке карактеристике пнеуматика у подужном правцу	22
3.1 Котрљање точка.....	23
3.2 Отпор котрљању.....	25
3.3 Котрљање коченог точка	27
4. Динамичке карактеристике пнеуматика у бочном правцу	29
4.1 Утицај мокрог коловоза на бочно скретање	33
Закључак	35
Литература.....	37

Резиме

У овом завршном раду је описана проблематика везана за динамичке карактеристике пнеуматика. Први део рада се бави основним информацијама о пнеуматику као што су његова улога на возилу и конструкција. Други део рада описује разне феномене који се јављају у контакту између пнеуматика и тла приликом кретања точка. У трећем делу су приказане и детаљно објашњене динамичке карактеристике пнеуматика у подужном правцу, док су у четвртом делу објашњене динамичке карактеристике у бочном правцу.

Кључне речи: пнеуматик, газећи слој, контакт пнеуматик/тло, динамичке карактеристике

Abstract

This final paper deals with phenomena related to dynamic characteristics of tyres. The first part of the paper presents essential information on tyres like their role in the vehicle and their construction. The next part describes different phenomena that emerge in the tyre/road contact during wheel rotation. In the following chapters, dynamic characteristics of tyres in longitudinal direction, as well as in lateral direction were presented and explained in detail.

Keywords: tyre, tread, tyre/road contact, dynamic characteristics

Увод

Точак аутомобила, као крајњи елемент система преноса снаге, представља склоп наплатак и пнеуматика. Наплатак је коритасти, профилисани део точка који носи пнеуматик, док се под пнеуматиком подразумева спољашња и унутрашња гума или, код савремених конструкција које се примењују на путничким аутомобилима, само спољашња гума.

Поред аеродинамичких и гравитационих сила, све друге битне силе и моменти који утичу на кретање друмских возила преносе се на структуру возила кроз контакт пнеуматик-тло. Разумевање основних карактеристика интеракције између пнеуматика и тла је, дакле, суштински важно за проучавање перформанси возила, квалитета вожње и понашања возила на путу.

Точак на друмским возилима треба да обезбеди следеће функције [1]:

- да „носи“ целокупну тежину возила,
- да ублажи вертикалне осцилације возила при вожњи преко неравнина пута,
- да обезбеди (пренесе) потребну вучну силу за убрзавање и кочење,
- да обезбеди адекватну контролу управљања и стабилност возила.

Пнеуматици могу ефикасно да врше ове функције, па се због тога универзално користе на друмским возилима. Такође, веома често се користе и на возилима повећане проходности.

Проучавање механике пнеуматика је од основног значаја за разумевање перформанси и карактеристика друмских возила. Два основна типа проблема у механици пнеуматика су од битног значаја за инжењере који се баве дизајном аутомобила: један је механика пнеуматика на тврдим подлогама, који је од суштинске важности за студију карактеристика друмских возила, док је други механика пнеуматика на деформабилним подлогама, која је од примарне важности за истраживање перформанси возила у ванпутним условима [1].

1. Пнеуматици као компоненте моторних возила

1.1 Улога пнеуматика

Пнеуматик је еластични преносни елемент између возила и пута, на чијем се котрљању заснива механичко кретање возила. Задатак пнеуматика је:

- да носи возило и користан терет при великим брзинама,
- да преноси погонску силу и силу кочења између возила и пута,
- да добрим приањањем за подлогу осигура стабилност возила.

Осим ових задатака, пнеуматик такође треба да има и задовољавајуће функционалне карактеристике као што су:

- мало трошење газећег слоја при већем броју пређених километара (дужи век трајања),
- мали отпор котрљања(што утиче на смањење потрошње горива),
- да амортизује ударе и неравнине пута(што чини вожњу комфорнијом),
- да не изазива буку у кривинама и при кочењу,
- да има мало проклизавање при преношењу вучне силе и
- да има велику стабилност при вожњи у кривинама.

Пнеуматици се могу поделити према намени и према конструкцији.

Према стандарду ETRTO (Европска техничка организација за гуме и наплатке, енгл. *European Tyre and Rim Technical Organization*) пнеуматици се према намени деле на пнеуматике за:

- бицикле и моторцикле,
- путничка возила,
- комерцијална возила,
- пољопривредне машине (тракторе и прикључне машине),
- индустријска возила и виљушкаре,

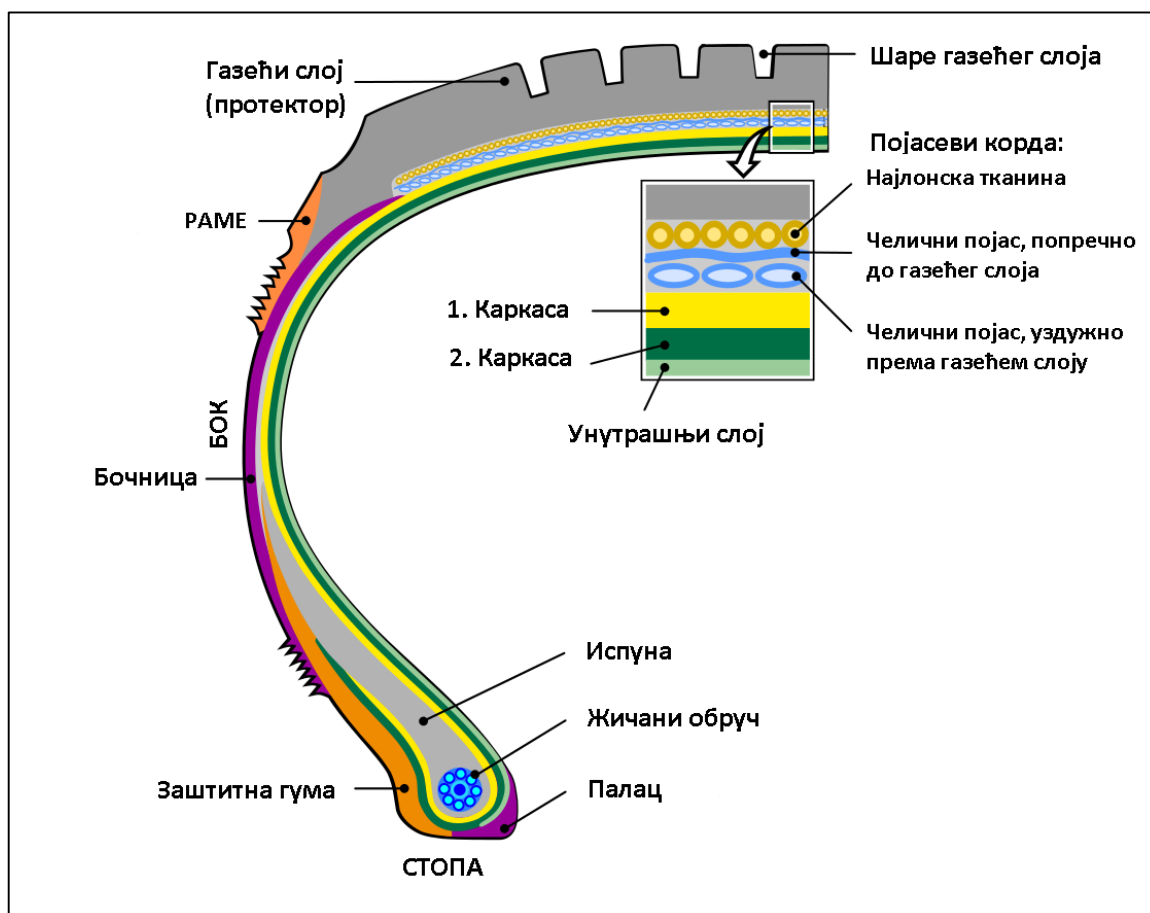
- машине за земљане радове и
- авио пнеуматике.

Према конструкцији, пнеуматици се деле на:

- радијалне пнеуматике и
- дијагоналне пнеуматике [2].

1.2 Конструкција пнеуматика

Пнеуматик је флексибилна структура облика тороиде пуњена компримованим ваздухом (или у новије време – азотом). На слици 1.1 дат је пресек пнеуматика са детаљима конструкције.



Слика 1.1 – Попречни пресек пнеуматика

На основу овог пресека могу се издвојити следећи спољашњи елементи од којих се пнеуматик састоји:

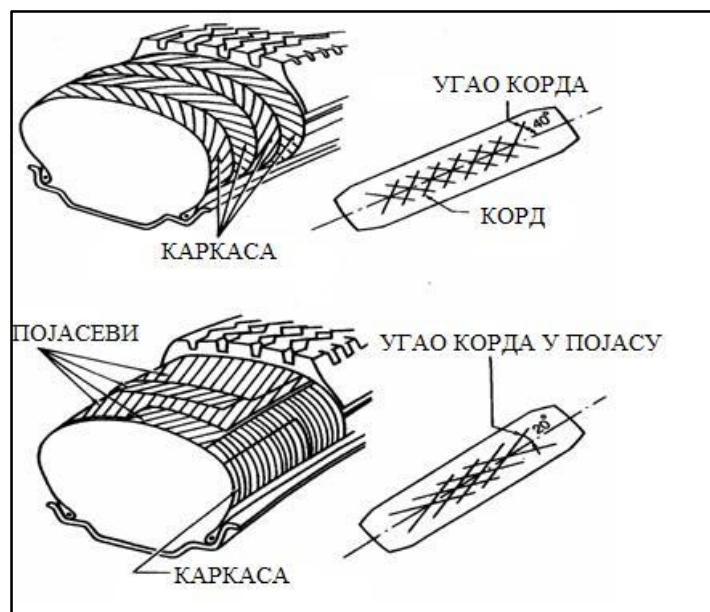
- **Газећи слој или протектор** представља профилисани спољни омотач пнеуматика, који штити носеће слојеве од спољних оштећења и атмосферског утицаја и такође омогућава добру везу са подлогом, односно, другим речима, помоћу њега се обезбеђује приањање пнеуматика и тла. Израђен је од гуме.
- **Шара газећег слоја** представља зарезе или жлебове различитих облика, величине и праваца у газећем слоју са циљем што бољег приањања пнеуматика о тло. Облик дезена протектора зависи од тога за коју брзину је пнеуматик предвиђен и за које услове експлоатације. Уздужни жлебови који су распоређени паралелно са средиштем равни точка (у подужном правцу) спречавају бочно клизање аутомобила. Попречни жлебови распоређени управно на средишњу раван точка (у попречном правцу) обезбеђују боље приањање пнеуматика при убрзавању и кочењу и обезбеђују добру проходност на лошијим путевима. Шаре газећег слоја су грубље (са оштрим ивицама и већим размацима жлебова) уколико је мекше тло по коме се креће аутомобил, а гушћа подела са плићим жлебовима се примењује на пнеуматима који су намењени за асфалтне или бетонске путеве.
- Контуре попречног пресека газећег слоја чине **профил** пнеуматика.
- **Раме** пнеуматика представља спољашњи, прелазни део пнеуматика од ивице газећег слоја до бока, док **бок** пнеуматика представља део од рамена до стопе пнеуматика.
- **Стопа** је ивични део пнеуматика у коме се налази један или више жичаних обруча. У оквиру стопе налазе се **пета** и **палац** који представљају њену спољну односно унутрашњу ивицу.
- **Заштитна гума** обавија пету и направљена је од врло тврде смеше, преко које се остварује додирна површина са наплатком без трења.
- **Бочница** (бочни зид пнеуматика) је танак гумени слој и налази се између протектора и пете пнеуматика. Изванредно је отпорна на напрезање при савијању, одлично одводи топлоту која се развија при експлоатацији пнеуматика и штити каркасу од механичких оштећења и атмосферског утицаја.

Унутрашњи елементи који чине пнеуматик су:

- **Корди** су нити од којих је састављено платно слојева каркасе. То је жичана пређа од памука, најлона, рајона, полиестера, челика или других вештачких материјала, која је поређана у виду паралелних жица или спирала које се међусобно не додирују. Те жице су обавијене гуменом смешом (да би се одстранило трење између појединих нити) и са њом заједно чине слој каркасе која је обавијена скроз око жичаног обруча.
- **Каркаса** (тело пнеуматика) је најважнији структурни елемент пнеуматика, односно његова носећа арматура. Као што је претходно речено, слој каркасе представља гумирано платно са паралелним гумираним нитима корда, високог модула еластичности. Налази се испод газећег слоја и бока пнеуматика. Каркаса преузима сва оптерећења на истезање и савијање до којих долази услед преноса тежине терета и погонског или кочног момента на путу, услед бочних сила код вожње у кривини, приликом ударања о препреке на путу и услед притиска пумпања.
- **Јастучић** је еластични гумени слој између газећег слоја и каркасе који служи за ублажавање удара.
- **Испуна** је направљена од профилисане гумене смеше, која доприноси бољем држању пута и ојачању пете.
- **Жичани обруч** се налази у пети пнеуматика и направљен је од челичне жице са високом затезном чврстоћом. Служи као основ (темељ) за каркасу и обезбеђује адекватно налагање пнеуматика на наплатак и преношења момента убрзања и кочења при кретању. Број челичних жица у обручу зависи од оптерећења које пнеуматик подноси, степена сигурности и јачине жице. За теретна возила постоје по два жичана обруча у пети [2, 3].

Дизајн и конструкција каркасе у великој мери одређују карактеристике пнеуматика. Геометријски распоред слојева корда, посебно њихов правац, игра битну улогу у понашању пнеуматика. Правац кордова је обично дефинисан углом нити каркасе, односно углом између корда и средње линије пнеуматика, слика 1.2. Када су кордови постављени под малим углом, пнеуматик има добре карактеристике при заокретању, али обезбеђује неудобну вожњу. Са друге стране, ако су кордови под правим углом у односу на средњу линију газећег слоја, пнеуматик ће бити у могућности да

пружи комфорну вожњу, али лошу управљивост возила. Компромис је постигнут код дијагоналних пнеуматика у којима су нити корда постављене дијагонално преко каркасе, од стопе до стопе, под углом од приближно 40° , као у горњем делу слике 1.2 [1].



Слика 1.2 - Дијагонални пнеуматик (горе) и радијални пнеуматик (доле) [1]

Дијагонални пнеуматици имају два слоја (код пнеуматика за мала оптерећења) или више слојева (чак 20 слојева код пнеуматика за велика оптерећења). Корди у суседним слојевима се простиру у супротним правцима. Дакле, нити корда се преклапају у облику ромбоида (по „дик-цак“ шаблону). Приликом вожње, ромбоидни слојеви се савијају и међусобно трљају, па се елементи ромбоидног облика и гумена испуна издужују. Ово савијање производи трење између газећег слоја пнеуматика и тла, које је један од главних узрока трошења пнеуматика и великог отпора котрљања [1].

Радијални пнеуматик има један или више слојева корда у каркаси који се простиру радијално од стопе до стопе, под углом од 90° у односу на средњу линију газећег слоја, слика 1.2 доле. Како радијални слојеви не пружају пнеуматику довољну крутост, да би испунио потребне функције при кочењу и заокретању, пнеуматик садржи неколико појасева корда високог модула еластичности. Ти појасеви су кључни за правилно функционисање радијалних пнеуматика. Правац у којима су постављени је приближно једнак правцу кретања возила. Корди у појасу су постављени под углом од приближно 20° [1].

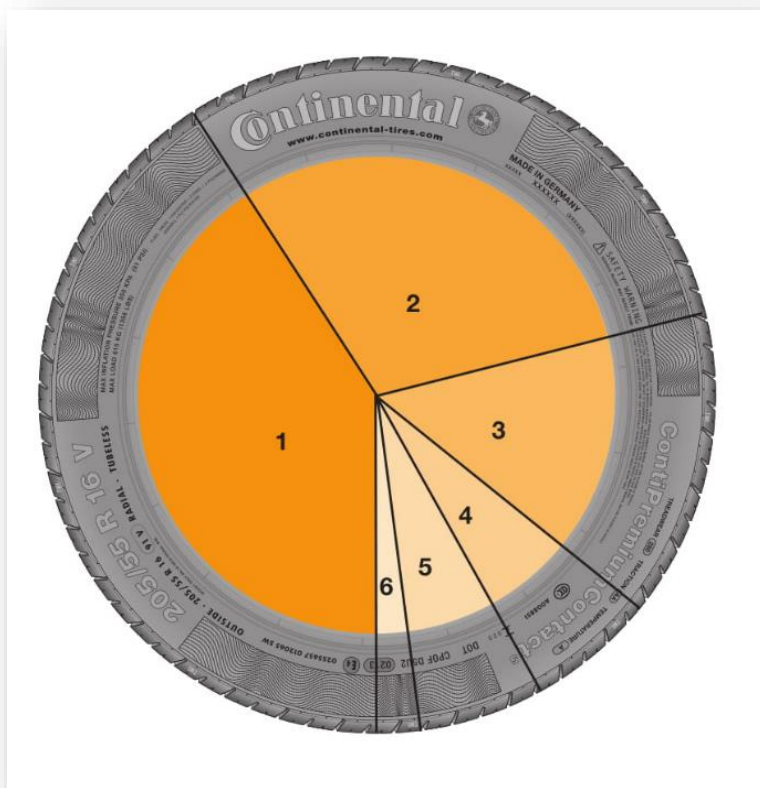
У табели 1.1 су упоредно приказане предности и недостаци радијалних и дијагоналних пнеуматика.

Табела 1.1- Предности и недостаци радијалних и дијагоналних пнеуматика [2]

Врста пнеуматика	Предности	Недостаци
Радијални	– добра униформност, – незнатан отпор котрљања (мања потрошња горива), – изванредна отпорност на хабање, – велика контактна површина (велика стабилност), – смањен пут кочења	– бок је мање отпоран на пробој, – тврђи ход на лошијим путевима, – клизање при великим брзинама у кривинама изненадно
Дијагонални	– бокови су отпорнији на пробој, – код брже вожње у кривинама клизање је постепено	– брзо се троше јер се газећа површина деформише при оптерећењу и проклизава у додиру са путем, – лоше приањање на подлогу у кривинама, – велики отпор котрљања, – ограничена брзина кретања

Састојци гумених једињења су изабрани да обезбеде специфична својства пнеуматика. Гумена једињења за бок пнеуматика треба да буду високо отпорна на замор и притисак. Једињења гуме за газећи слој варирају у зависности од типа пнеуматика. На пример, за пнеуматике за теретна возила, који су интензивно оптерећени, неопходна је употреба једињења за газећи слој са високим отпором на напрезање, кидање и раст пукотина и са ниским уделом хистерезиса, да би се смањили топлотно оптерећење и отпор котрљања. Као последица тога, једињења природне гуме су у широкој употреби за пнеуматике теретних возила, иако суштински пружају ниже вредности коефицијента трења, посебно на влажним површинама, за разлику од разних синтетичких гумених једињења која се користе за пнеуматике за путничке и тркачке аутомобиле. За пнеуматике без унутрашње гуме (енгл. *tubeless*), који су постали доминантни, за унутрашњу површину каркасе се причвршћује танак слој гуме непропусне за ваздух (као што је једињење бутил) [1].

На слици 1.3 дат је приказ процентуалног удела разних материјала у производњи пнеуматика [4].



Слика 1.3 - Удео разних материјала у пнеуматику [4]:

- 1 - Гума (природна и синтетичка) - 41%;
- 2 - Пунила (угљеник, силицијум, креда) - 30%;
- 3 - Материјали за ојачавање (челик, полиестер, рајон, најлон) - 15%;
- 4 - Пластификатори (уља и смоле) - 6%;
- 5- Хемикалије за вулканизацију (сумпор, цинк-оксид, разне друге хемикалије) - 6%;
- 6 - Средства против старења и друге хемикалије - 2%

2. Динамички феномени у контакту пнеуматик-тло

Да би се објаснило кретање целог возила, неопходно је објаснити процесе и релације који се јављају при котрљању точка. Релације могу бити кинематске (обухватају само брзине и померања) и динамичке (додати силе и моменти).

2.1 Полупречници точка

Точак аутомобила је еластичан у свим правцима: тангенцијалном, бочном и радијалном. Због радијалне еластичности разликују се следећи полупречници точка:

1. **Номинални или називни полупречник** (r_n), који је дефинисан на основу номиналних димензија точка. Рачуна се према формули:

$$r_n = \frac{d}{2} + h$$

где је d -пречник обода наплатка, а h -висина профила пнеуматика.

2. **Слободни полупречник** (r_o), који се дефинише на основу максималног обима точка који се не обрће, O , и на који не дејствују силе:

$$r_o = \frac{O}{2\pi}$$

3. **Статички полупречник** (r_s) је растојање од осе точка до тла, при чему је точак непокретан и оптерећен радијалном реакцијом. Одређује се према формули:

$$r_s = \frac{d}{2} + h(1 - \lambda)$$

где је λ - коефицијент радијалне деформације пнеуматика под оптерећењем у односу на номиналну висину профила пнеуматика.

4. **Динамички полупречник** (r_d) је растојање од осе точка до подлоге када се точак котрља. Тада на точак делују само неке или све силе (радијална, обимна и бочна).

5. Полупречник котрљања (r_f) је замишљени, односно теоријски полупречник оног крутог точка који има исту брзину обртања и транслаторну брзину котрљања као и стварни точак аутомобила. Одатле следи да је :

$$r_f = \frac{v}{\omega_T} \quad \text{и} \quad r_f = \frac{S}{2\pi n_T}$$

где су:

v - транслаторна брзина точка,

ω_T - угаона брзина точка,

S - пут точка у јединици времена и

n_T - број обртаја точка у јединици времена.

2.2 Трење

Према Кулоновој теорији трења, коефицијент трења је константа величина. У случају пнеуматика, који је високо-еластични материјал, његово понашање не подлеже овој теорији.

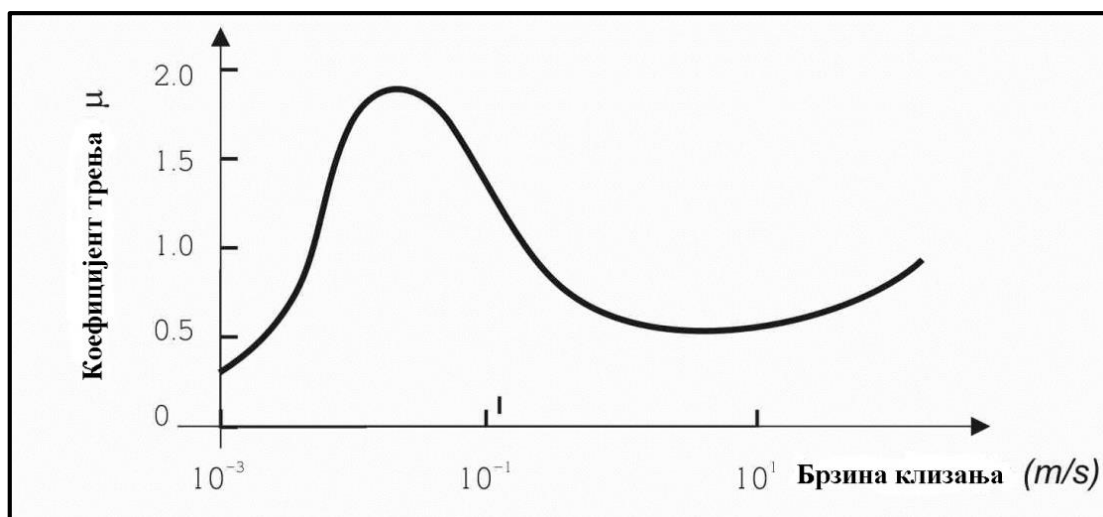
Трење садржи компоненту приањања и компоненту клизања. У случају контакта пнеуматика и тла, а зависно од релативне брзине између центра точка и тачке додира пнеуматика и тла (обимна брзина), разликују се два случаја:

- чисто приањање ($v_{rel}=0$) и
- приањање са клизањем ($v_{rel}>0$),

где је v_{rel} - релативна брзина између центра точка и тачке додира пнеуматика и тла.

Све док се точак котрља, коефицијент приањања је већи од коефицијента клизања. Учешће приањања и клизања се мења током кретања возила, тако да одатле следи да је коефицијент трења функција брзине клизања.

На слици 2.1 приказана је зависност коефицијента трења између пнеуматика и тла од брзине клизања точкова возила [5].



Слика 2.1 - Зависност коефицијента трења од брзине клизања [5]

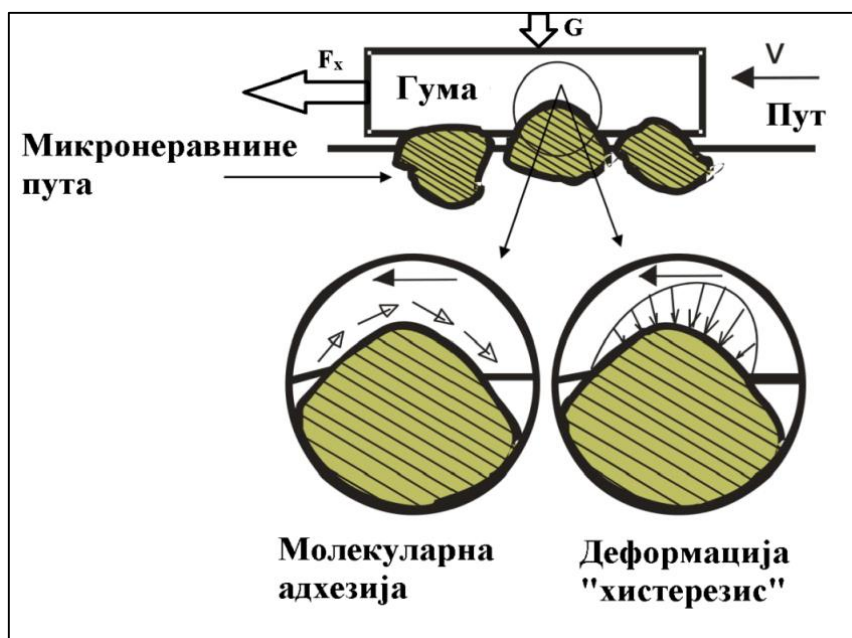
Максимум вредности коефицијента трења варира у области брзине клизања од 0,05 до 5 m/s у зависности од особина пнеуматика и температуре подлоге. Што је температура подлоге већа, максимум се помера ка већим брзинама клизања. Сама максимална вредност коефицијента трења може да буде и већа од 10, ако се ради о веома глаткој подлози. После максимума, долази до пада вредности коефицијента трења са великим градијентом. Дијаграм не почиње од нуле јер је у експерименту брзина клизања увек већа од нуле.

2.3 Приањање

Аналогно са феноменом трења, приањање између гуме и чврсте подлоге се може окарактерисати као мера „јачине“ контакта између гуме и подлоге у хоризонталном правцу, под дејством контактеног притиска изазваног силом која притиска гуму на подлогу. Другачије речено, приањање се може сматрати као мера супротстављања клизању гуменог објекта по подлози. При овим разматрањима, уопштено се мисли на гуму као материјал.

У случају аутомобилског точка, приањање представља меру могућности за реализацију тангенцијалне реакције између пнеуматика и подлоге, односно меру супротстављања проклизавању точка. С обзиром на то да је део точка који је у контакту са подлогом сачињен од гуме, од интереса је разматрање механизма приањања гуме на чврстој подлози.

На слици 2.2 је дат шематски приказ гуменог тела које се налази у контакту са подлогом под дејством вертикалног оптерећења, G [6]. Под дејством те силе, због деформабилности гуме, долази до њене деформације и заклињавања у микронеравнине. На гуму делује сила F_x , која тежи да изазове њено клизање по подлози.



Слика 2.2 - Гумено тело на тврдој подлози [6]

Приањање гуме, којим се она супротставља клизању под дејством силе F_x , заснива се на дејству два различита механизма. То су:

1. адхезија у „ужем“ физичком смислу, која представља силу привлачења молекула различитих материјала (латински: *Adhaesio* – приањање, привлачност), за коју ће у даљем тексту бити коришћен термин **молекуларна адхезија**, и
2. деформација и заклињавање гуме у микронеравнине подлоге – тзв. хистерезисна компонента адхезије или, скраћено, **хистерезис**.

2.2.1 Механизми приањања

Дејство молекуларне адхезије

Молекуларна адхезија, као што је речено, представља силу међусобног привлачења молекула различитих материјала, који се налазе у контакту под дејством

одређеног притиска. Пошто се интензитет молекуларне адхезије изражава за јединичну површину (N/m^2), резултујућа тангенцијална сила се израчунава као:

$$\text{СИЛА МОЛЕКУЛАРНЕ АДХЕЗИЈЕ} = \text{СМИЦАЈНИ НАПОН} \cdot \text{УКУПНА ПОВРШИНА КОНТАКТА}$$

Када се гума налази на сувој подлози, молекуларна адхезија представља доминантну компоненту приликом супротстављању гуме клизању. Молекуларна адхезија има важно својство које се огледа у томе да је њено дејство веће за ниже вредности контактеног притиска. Са порастом контактеног притиска, дејство молекуларне адхезије се смањује. Веома важан закључак је да дејство силе молекуларне адхезије за разлику од силе Кулоновог трења, расте са порастом контактне површине, јер:

- интензитет силе је пропорционалан укупној површини контакта и
- са повећањем контактне површине, за исто вертикално оптерећење, опада контактни притисак, што условљава пораст молекуларне адхезије.

При нарушавању равнотеже, односно појави клизања, долази до значајног смањења дејства молекуларне адхезије. Приањање је при проклизавању због тога мање него при релативном мировању и зависи од релативне брзине клизања [6].

Дејство хистерезиса

Супротстављање клизању услед хистерезиса се заснива на унутрашњем трењу материјала гуме, одакле и потиче назив. Наиме, при вертикалном притиску гуме уз неравну подлогу, услед њеног израженог деформисања, долази до заклињавања гуме у микропрофил подлоге, као што се види на слици 2.2. Силе су приликом наилаaska на неравнину, због унутрашњег трења, веће него при силаску са равнине. Ово доводи до тога да се смер резултујуће силе противи смеру клизању тела по подлози.

Укупна сила хистерезиса је једнака суми отпора на свим микро-неравнинама подлоге у контакту са гумом. Број неравнина пропорционалан је величини површине контакта између гуме и подлоге. С обзиром на кумулативни ефекат, са овог аспекта повећање површине има, као и код молекуларне адхезије, ефекат повећања резултујуће силе. Закључак о повећању хистерезисне компоненте приањања са повећањем контактне површине није могуће донети, јер се дејство ове компоненте, за разлику од молекуларне адхезије, повећава при порасту контактеног притиска. Због тога, када се за исто

вертикално оптерећење површина контакта смањи, повећава се контактни притисак, а тиме и хистерезис [6].

Када се гума налази на влажној подлози, молекули воде између гуме и подлоге спречавају дејство молекуларне адхезије, тако да у тој ситуацији хистерезисна компонента, односно деформација и заклињавање гуме у микронеравнине, имају доминантну улогу у остваривању приањања, односно спречавању појаве клизања.

2.2.2 Фактори који утичу на приањање

На приањање утичу бројни фактори, пре свега:

- врста и стање подлоге, присуство влаге и примеса,
- конструктивне карактеристике пнеуматика,
- смеша – материјал и дезен („шара“) газећег слоја пнеуматика,
- вертикално оптерећење точка,
- релативна брзина клизања и брзина кретања возила,
- контактни притисак и његова расподела,
- температура пнеуматика и подлоге.

2.2.3 Коефицијент приањања

Када се точку саопшти погонски момент, M_T , или кочни момент, M_K , као реакција између точка и подлоге јавља се вучна сила, X_T , или сила кочења, X_K , респективно. Однос између стварне, реализоване тангенцијалне реакције точка, X_T или X_K , и његовог вертикалног оптерећења, G_T , назива се коефицијент приањања, φ :

$$\varphi = \frac{X_T}{G_T} - \text{за погонски точак,}$$

$$\varphi = \frac{X_K}{G_T} - \text{за кочени точак.}$$

Дакле, коефицијент приањања представља меру искоришћења расположиве вертикалне силе за реализацију сила вуче, тј. сила кочења. Реализација сила вуче односно кочења на аутомобилском точку нераздвојиво је повезана са појавом клизања точка. Коефицијент приањања, φ , мења се са клизањем, због чега је ову појаву потребно посебно размотрити [6].

2.3 Клизање

Под клизањем се подразумевају све појаве које доводе до тога да је, при котрљању точка по равној подлози, његова транслаторна брзина, v , различита од теоријске која одговара датој угаоној брзини точка, ω_T , и динамичком радијусу, r_d :

$$v = r_d \cdot \omega_T \Rightarrow \text{котрљање без клизања,}$$

$$v \neq r_d \cdot \omega_T \Rightarrow \text{постоји клизање.}$$

Када се у класичној механици разматра котрљање крутог точка по крутој подлози, тада је процес клизања при котрљању једноставан за разумевање, с обзиром на то да је у том случају једина манифестација клизања релативна брзина у тачки контакта точка и подлоге. Код реалног точка друмског возила, услед знатне радијалне и тангенцијалне еластичности пнеуматика, појава клизања има сложенији карактер [6]. Клизање тада има два узрока:

- тангенцијална деформација пнеуматика, и
- проклизавање контактне површине.

Када се пнеуматику саопшти погонски или кочни момент, тада је његово котрљање праћено угаоним клизањем, односно стварна транслаторна брзина кретања пнеуматика, v (брзина којом се креће возило), одступа у односу на теоријску транслаторну брзину коју би дати точак имао при котрљању без клизања ($v_{\text{теор}} = r_d \omega_T$). При ограниченим вредностима погонског односно кочног момента, појава одступања теоријске и стварне брзине потиче од тангенцијалне деформације, односно долази до еластичног клизања.

Код погонског точка, стварна транслаторна брзина је нешто мања од теоријске, тј. точак се обрће брже него што одговара транслаторној брзини. Ова појава се дефинише као **позитивно клизање**. У граничном случају, погонски точак се може обртати, а да возило мирује ($v=0$, $\omega_T \neq 0$), тј. долази до потпуног проклизавања точка.

У случају коченог точка, описани процес се одвија у обрнутом правцу, што за последицу има то да је стварна транслаторна брзина нешто већа од теоријске, дакле точак се креће нешто брже него што одговара обимној брзини. Овде је реч о **негативном клизању**. Гранична манифестација ове ситуације је позната као „блокирање точка“,

односно точак се креће чисто транслаторно клизајући у односу на подлогу при кретању возила ($v \neq 0$, $\omega_T=0$) [6].

Преношење тангенцијалних сила између точка и подлоге (вучне силе, односно силе кочења) је нераздвојиво од појаве угаоног клизања. Према наведеним дефиницијама, могу се извести следећи изрази за клизање, s :

➤ за погонски точак: $s = \frac{r_d \cdot \omega_T - V}{r_d \cdot \omega_T} = 1 - \frac{V}{r_d \cdot \omega_T}$,

➤ за кочени точак: $s = \frac{V - r_d \cdot \omega_T}{V} = 1 - \frac{r_d \cdot \omega_T}{V}$.

Деформационо клизање је последица еластичне деформације (упрошћено - увијања око осе точка) услед дејства погонског обртног момента на точак. Проклизавање је последица ограниченог приањања између тла и контактне површине пнеуматика или њених појединих сегмената. Клизање точка је последица кумулативног ефекта деформационог клизања и проклизавања [6].

2.4 Напони у газећем слоју

Кумер (*Kummer*) је 1966. год. дао савремене основе теорије трења, а Вилумајт (*Willumeit*) је 1969. год. први пут успоставио механички модел газећег слоја пнеуматика којим се добро репрезентују карактеристике пнеуматика и који се ослања на Кумерову теорију. Овим моделом могу да се објасне промене обимне силе, бочне силе и момента стабилизације који настају код реалних пнеуматика [5].

У газећем слоју пнеуматика постоји одређена расподела смичућег напона по површини отиска. Последице постојања неке расподеле која није униформна ни у подужној ни у попречној равни су неравномерне реакције тла, односно промена како величине реакције тла тако и њене нападне линије у различитим режимима вожње (кочење, убрзавање).

За објашњење ове појаве, претпоставиће се да је:

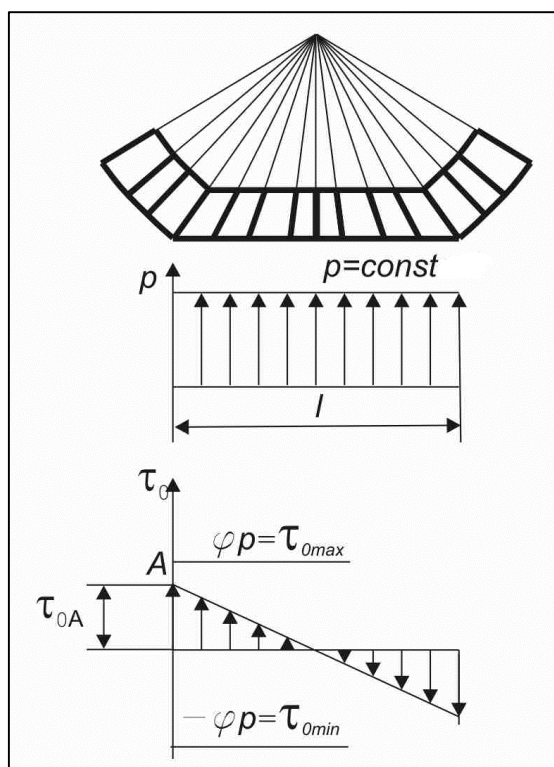
- 1) нормални притисак који делује између пнеуматика и тла константан и једнак унутрашњем притиску пнеуматика, p ,

- 2) ширина контактне површине константна, једнака ширини пнеуматика, b , и не зависи од оптерећења точка.

Под дејством смичућег напона, τ_o , долази до деформација смицања у газећем слоју пнеуматика које је проузроковано трењем на контактної површини. Услед вискоеластичних особина протектора, овај смичући напон има одређену расподелу дуж контактне површине протектора. Постоје промене смичућег напона у радијалном правцу (трансверзално смицање).

На слици 2.3 приказана је промена смичућег напона који производи обимна сила на пнеуматику, при чему је са l означена дужина контактне зоне, а са τ_{oA} је означен иницијални смичући напон у почетној тачки контакта пнеуматика и тла. Обимна сила на точку у функцији смичућег напона једнака је [5]:

$$F_o = b \int_0^l \tau_o dx$$



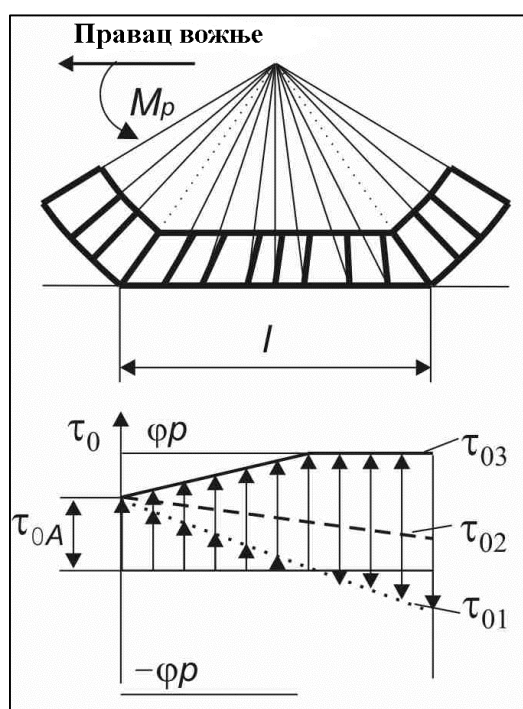
Слика 2.3 - Распоред смичућег напона у контакту пнеуматика и тла у подужном правцу ($\phi = \text{const}$) [5]

Деловање погонског момента на точак

Са променом погонског момента, M_p , мења се и нагиб праве којом је представљена расподела компоненте смичућег напона, τ_o .

Сагласно слици 2.4, напону τ_{o3} одговара највећи погонски момент, тј. важи релација $M_{p3} > M_{p2} > M_{p1}$, као и констатација да не може да се пређе вредност напона $\tau_{o\max} = \varphi p$, где је φ - коефицијент приањања. Одатле следи да је обимна сила једнака [5]:

$$F_o = \varphi b \int_0^l p dx$$



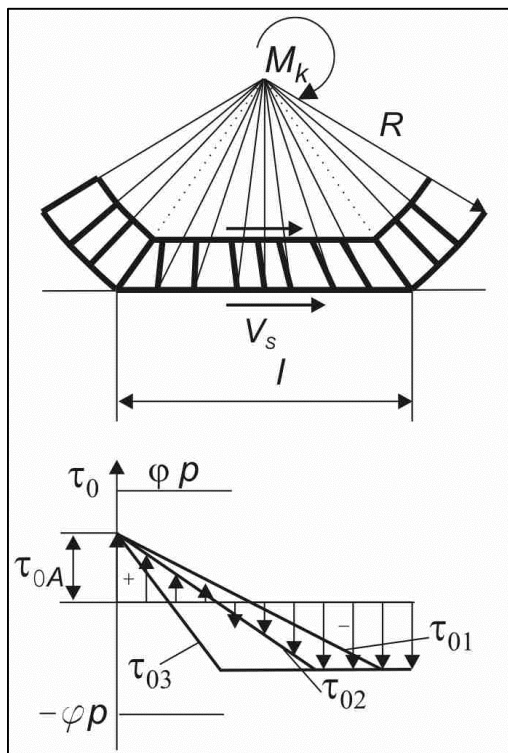
Слика 2.4 - Промена смичућег напона у контакту пнеуматика и тла у случају дејства погонског момента ($\varphi = \text{const}$) [5]

Деловање кочног момента на точак

Кочном моменту одговара расподела приказана на слици 2.5, под условом да важи релација: $M_{k3} > M_{k2} > M_{k1}$.

Јасно је да се тежиште површине отиска, а самим тим и нападна тачка резултујућих сила смицања, при оштријем - интензивнијем кочењу помера ка напред [5].

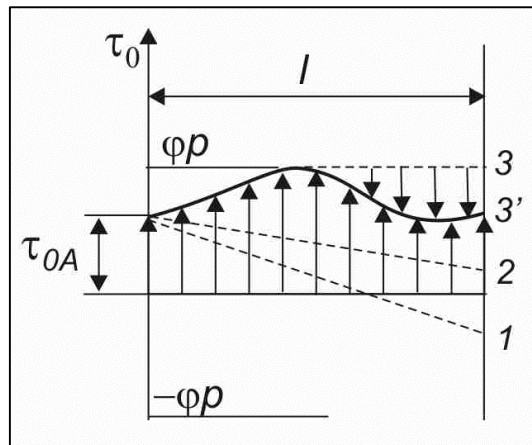
Праволинијски карактер опадања напона до достигања његове минималне вредности (хоризонтална линија) значи да се промена догађа за $\varphi = \text{const}$, а у тачки достигања саме минималне вредности настаје потпуно клизање.



Слика 2.5 - Промена смичућег напона у контакту пнеуматика и тла у случају деловања кочног момента ($\varphi = \text{const}$) [5]

У оба случаја (погон и кочење) правим линијама у координатном систему (τ_0, x) је приказана идеализована расподела напона при непроменљивом коефицијенту приањања. Пошто у стварности коефицијент приањања зависи од брзине клизања, ова расподела смичућег напона за, на пример, погонски точак који се убрзава моментом M_{p3} (слика 2.4), има облик дат на слици 2.6.

До достигања максималне вредности смичућег напона, φp , промена је линеарна, а после достигања максимума, вредност смичућег напона асимптотски опада (хоризонтална асимптота) до вредности која би одговарала обимној сили при потпуном клизању.

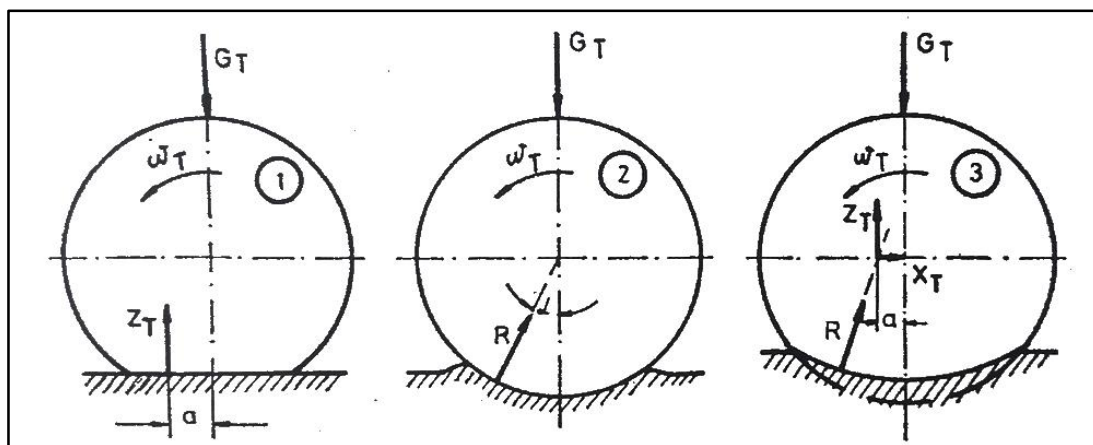


Слика 2.6 - Реална (3') и идеалне расподеле (1, 2, 3) смичућег напона у случају дејства погонског момента [5]

3. Динамичке карактеристике пнеуматика у подужном правцу

У овом поглављу се анализира случај котрљања радијално еластичног точка по хоризонталној и крутој подлози, када на њега не делују бочне силе.

Механика кретања аутомобила се заснива на котрљању точка. Постоје три случаја у зависности од подлоге по којој се точак котрља, слика 3.1:



Слика 3.1 - Три случаја котрљања точка [3]

1. Деформације тла су занемарљиво мале у односу на деформације точка - случај котрљања еластичног точка по апсолутно тврдом путу, слика 3.1 лево. У овом случају постоји одређено растојање од осе точка на коме је реакција тла усмерена управно на тло. Појављује се отпор котрљању у облику момента $M_f = Z_t \cdot a$.
2. Деформације точка су занемарљиво мале у односу на деформације пута - случај котрљања апсолутно крутог точка по меком путу, слика 3.1 у средини. Реакција тла је радијална (пролази кроз осу точка). Отпор при котрљању се појављује кроз хоризонталну силу која је део компоненте реакције тла (R). Момент отпора при котрљању једнак је нули.
3. Деформације точка и пута су величине истог реда - случај котрљања еластичног точка по меком путу, слика 3.1 десно. У трећем случају реакција тла (R) је коса, ексцентрично постављена у односу на осу точка. Отпор котрљања се појављује у облику момента нормалне компоненте $Z_t a$ и силе X_T која делује супротно од правца котрљања точка.

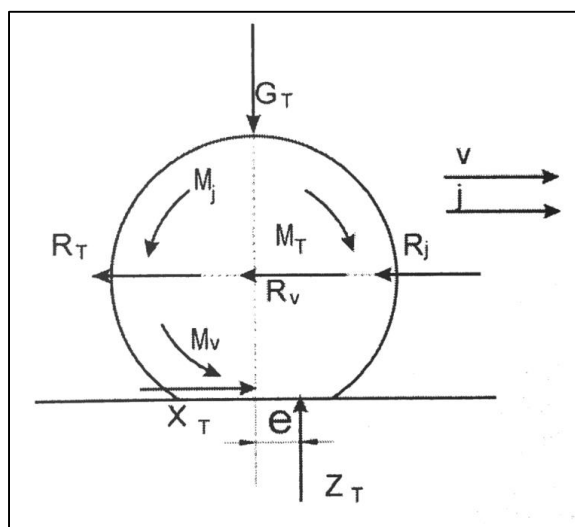
За проучавање механике кретања аутомобила највећу важност има први случај, а то је кретање еластичног точка по тврдој подлози. То је због тога што се деформације савремених путева могу занемарити у односу на деформације точкова.

3.1 Котрљање точка

Посматра се кретање радијално-еластичног точка под дејством сила и момената. Тло по којем се точак креће, као што је већ речено, је веће крутости у односу на точак.

Приликом котрљања точка, динамичка реакција тла, Z_T , је померена у правцу кретања за одређено одстојање e , с обзиром на деформације пнеуматика у радијалном и тангенцијалном правцу, слика 3.2. На точак делују следеће силе и моменти:

- G_T - радијално оптерећење точка,
- M_T - активни (погонски) момент на точку,
- X_T - хоризонтална реакција тла,
- R_T - реактивна сила услед деловања шасије на центар точка,
- $R_j = m_T \frac{dv}{dt}$ - инерцијална сила,
- R_v - отпор ваздуха,
- M_v - момент отпора ваздуха и
- $M_j = J_T \frac{d\omega_T}{dt}$ - инерцијални момент отпора убрзаном кретању точка.



Слика 3.2 - Силе и моменти који делују на погонски точак [7]

Користећи опште законе динамике, могу се извести следеће диференцијалне једначине кретања точка:

$$Z_T = G_T,$$

$$X_T = R_T + R_j + R_v,$$

$$M_T = Z_T e + X_T r_d + M_j + M_v.$$

Момент отпора ваздуха M_v , и сила отпора ваздуха R_v , могу се сматрати занемарљиво малим величинама па се претходне једначине могу написати у облику:

$$Z_T = G_T,$$

$$X_T = R_T + R_j,$$

$$M_T = Z_T e + X_T r_d + M_j.$$

У случају кретања центра точка константом брзином, претходни систем једначина постаје:

$$Z_T = G_T,$$

$$X_T = R_T,$$

$$M_T = Z_T e + X_T r_d.$$

На основу последње једначине из претходног система једначина закључује се да точак има позитивну тангенцијалну (хоризонталну) реакцију тла, X_T . Активни момент на точку, M_T , је већи од момента $Z_T e$ за износ $X_T r_d$. Уколико се активни момент смањује, смањиваће се и реакција тла. Уколико је момент $M_T = Z_T e$, хоризонтална реакција тла биће једнака нули, а уколико је вредност активног момента мања од $Z_T e$ хоризонтална реакција тла биће негативна.

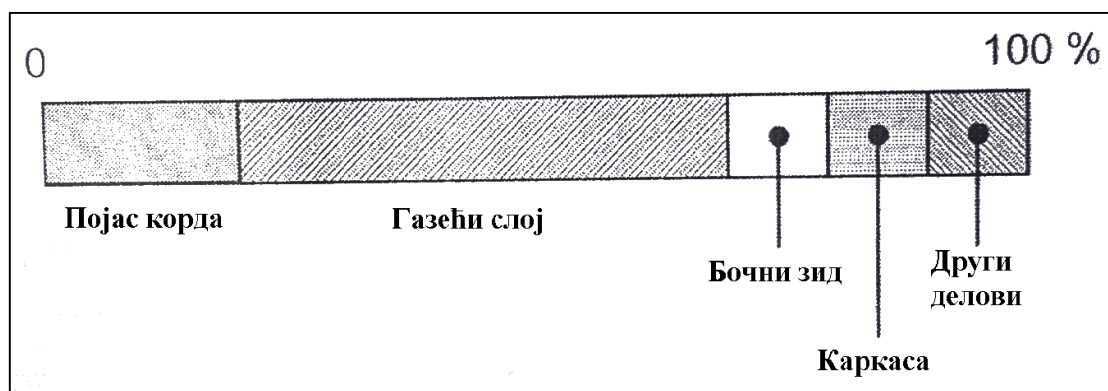
У зависности од величине активног момента, M_T , и хоризонталне реакције тла, X_T , уводе се појмови о стању точка, односно карактеристични режими кретања точка који могу бити:

- $M_T > Z_T e$ и $X_T > 0$ - точак је **погонски**. Вектор погонског момента M_T се поклапа са смером угаоне брзине точка, а реактивна сила услед деловања шасије, R_T , има смер супротан смеру брзине центра точка;

- $M_T = Z_T e$ и $X_T > 0$ - точка је **слободан**. На точка делује обртни момент M_T , док је сила у центру точка једнака нули;
- $0 > X_T > -fZ_T$ и $eZ_T > M_T > 0$ - точка је **неутралан**. Код овог режима на точка истовремено делују и обртни момент M_T и вучна сила, која делује у смеру кретања возила;
- $X_T = -fZ_T$ и $M_T = 0$ - точка је **гоњени**. Сила R_T која делује у центру точка има супротан смер од смера брзине кретања возила. У пракси M_T никад није једнак нули због постојања отпора котрљања у лежиштима;
- $M_T < 0$ - точка је **кочени**. Погонски момент, M_T , има смер супротан смеру угаоне брзине точка, тј. једнак је кочионом моменту, M_k , а реактивна сила, R_T , има смер кретања возила [7].

3.2 Отпор котрљању

За пнеуматик који се котрља, деформација материјала пнеуматика се одвија при уласку у зону контакта. Деформисани делови се поново враћају у првобитно стање када газећи слој напусти зону контакта. Овај процес укључује губитак енергије, највише услед хистерезиса. Губици се јављају у газећем слоју, појасевима корда, каркаси и бочним зидовима. Преглед ових губитака приказан је на слици 3.3. Сви ови губици заједно одговарају сили отпора котрљања.



Слика 3.3 - Удео трошења делова пнеуматика приликом котрљања точка [8]

Ова разматрања се односе на апсолутно крут пут. За мек пут (као што је земља) отпор је појачан услед додатне силе трења између точка и земље и нееластичне деформације земље.

Коефицијент отпора котрљања, који је реда 0,01-0,05 за крут пут или тврђу земљу, може се повећати и до 0,35 за мокру земљу или чак и више на неким блатњавим површинама. Другим речима, точак на мекој површини тежи да савлада неравнине. За бетонске и асфалтне путеве коефицијент отпора котрљању варира од 0,01 до 0,02.

Отпор котрљању је променљива величина. Динамички услови увелико мењају отпор котрљања, а неки од тих услова су:

- услови вожње и кочења,
- температура,
- притисак у пнеуматику,
- оптерећење пнеуматика,
- брзина кретања,
- услови на путу,
- структура, величина и геометријски дизајн пнеуматика и
- истрошеност пнеуматика.

Како се динамичка реакција тла редукује у центар точка, у зависности од крака котрљања, e , добија се момент отпора котрљања, M_f :

$$M_f = Z_T e .$$

Уколико се претходна једначина подели са r_d , добија се израз за отпор котрљања:

$$R_f = \frac{M_f}{r_d} = Z_T \frac{e}{r_d} = Z_T f ,$$

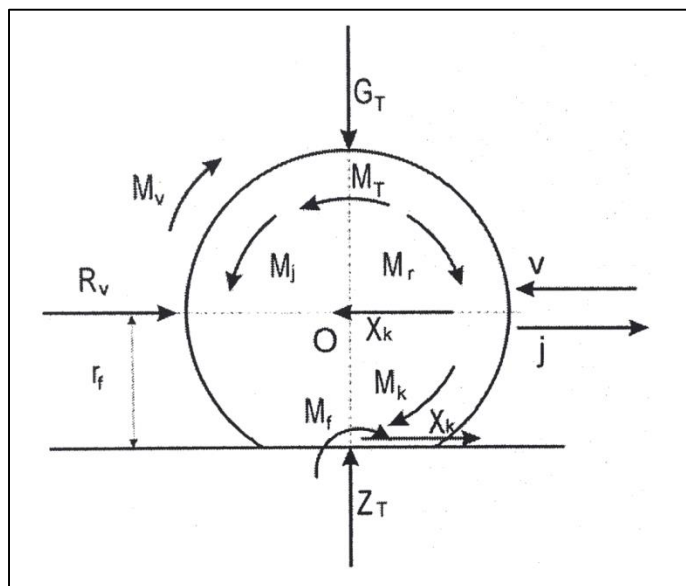
где су:

- Z_T - динамичка реакција тла,
- R_f - отпор котрљања и
- f - коефицијент отпора котрљања точка који зависи од полупречника точка.

У пракси се отпор котрљања одређује експериментално. Доказано је да највећи утицај на вредност отпора котрљања има брзина кретања возила. Зато коефицијент отпора котрљања нагло расте при брзинама већим од 60 km/h.

3.3 Котрљање коченог точка

Слика 3.4 приказује силе и моменте који делују на кочени точак.



Слика 3.4 - Силе и моменти који делују на кочени точак [7]

На кочени точак делују следеће силе и моменти:

- M_v - момент отпора ваздуха,
- M_f - момент отпора котрљања,
- M_k - кочни момент,
- M_T - момент услед отпора у трансмисији, редукован на погонски точак,
- $M_j = \sum J_i \frac{d\omega_T}{dt}$ - инерцијални момент (обухвата све елементе трансмисије, предњи и задњи погонски точак),
- X_k - сила кочења у равни тла и
- R_v - отпор ваздуха на точку.

На основу слике 3.4 може се извести следећа једначина силе кочења, X_k :

$$X_k r_d = M_k + M_f - \left(\sum J_i \frac{d\omega_T}{dt} - M_r \right) + M_v - M_T.$$

У случају интензивног кочења, спојница се искључује и тада је сила кочења једнака:

$$X_k \approx \frac{M_k + M_f}{r_f}.$$

Максимална вредност силе кочења је ограничена условима приањања:

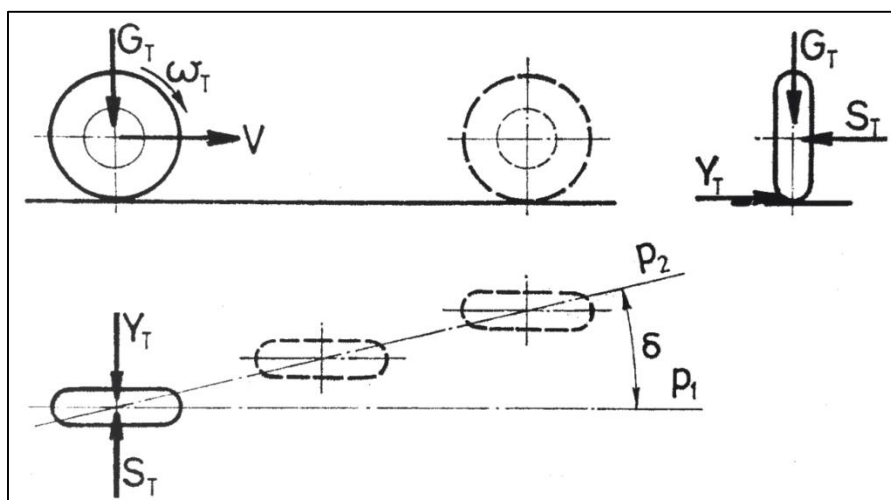
$$X_{kmax} = K_{max} = \varphi Z_T,$$

где су:

- φ - коефицијент приањања и
- Z_T - динамичка реакција тла коченог точка.

4. Динамичке карактеристике пнеуматика у бочном правцу

Скретање точка под дејством бочне силе први пут је уочено 1925 године. Дејство бочне силе на бочно еластични точкак проузроковаће његово бочно скретање и ово ће се десити без обзира на то колико је мала бочна сила. Крут точкак под дејством бочне компоненте котрља се у својој равни без скретања, све док та бочна компонента не достигне вредност $G_T \phi$ и тек тада ће почети бочно клизање точка. На слици 4.1 је приказана појава скретања при котрљању точка под дејством бочне силе.

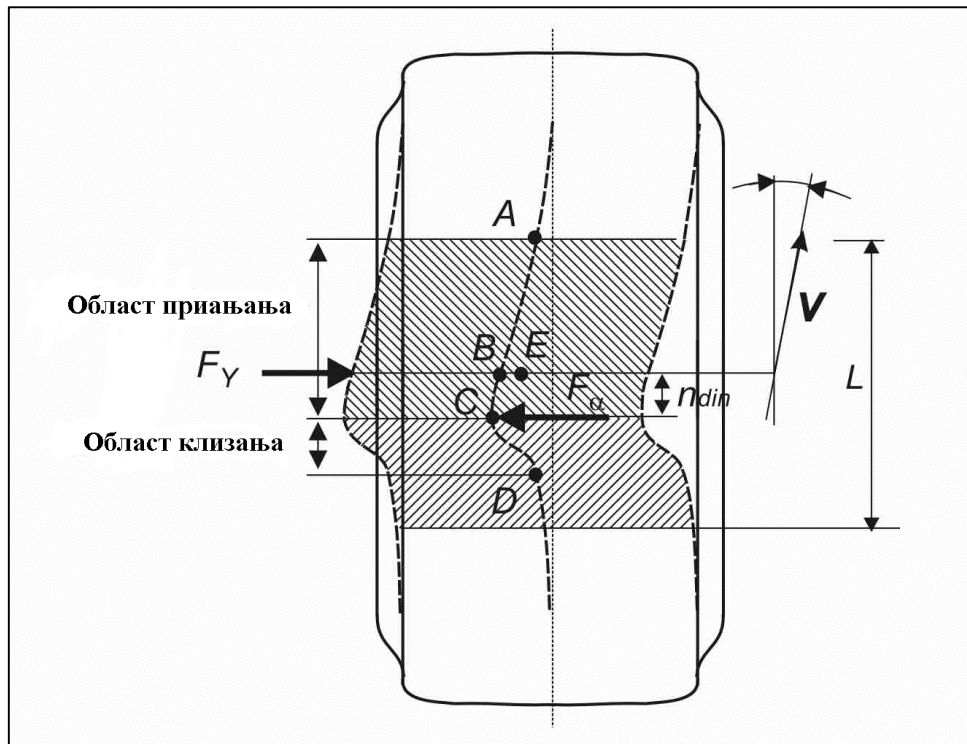


Слика 4.1 - Котрљање точка под дејством бочне силе [3]

Најважнији фактори који делују на скретање бочно еластичног точка су: величина нормалног оптерећења точка, величина бочне силе, притисак ваздуха у пнеуматику и конструктивно извођење пнеуматика.

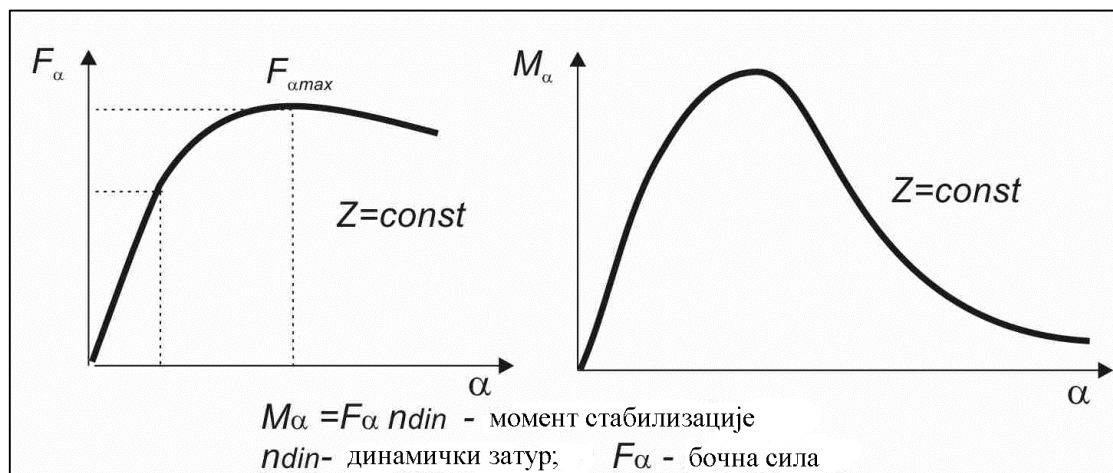
Приликом котрљања точка, у контакт са тлом улазе увек нови газећи слојеви пнеуматика који нису деформисани. Како делује бочна сила, они се тако померају (у односу на раван обртања точка) у правцу дејства бочне реакције тла. Угао δ између два правца p_1 и p_2 назива се **угао бочног скретања** или **угао бочног повођења**.

На пнеуматику који је подвргнут дејству бочне силе F_y , слика 4.2, јавиће се смичући напон τ_s , а његовим интеграљењем по површини отиска добија се бочна реакција F_s . Како смичући напон није симетричан дуж целог отиска, резултујућа бочна сила делује на растојању n_{din} од геометријске равни симетрије точка.



Слика 4.2 - Деформација пнеуматика под утицајем бочног скретања [5]

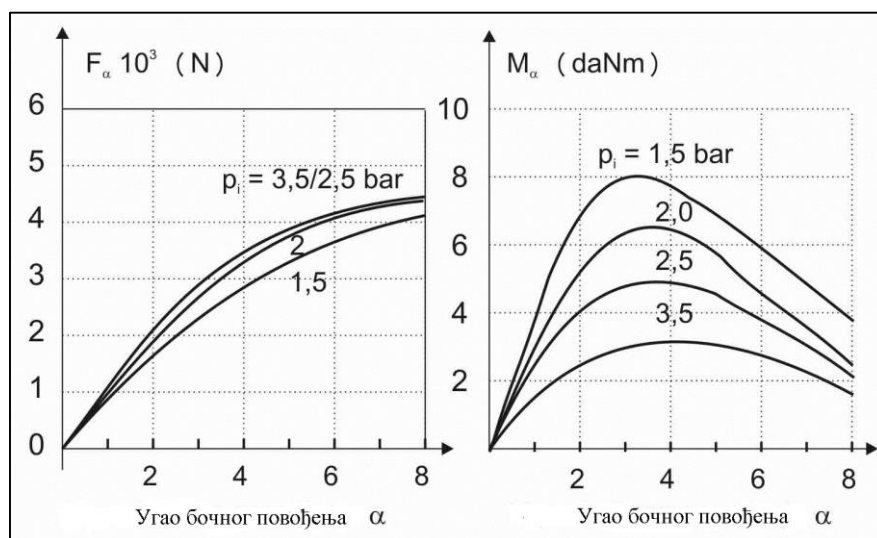
Реакција бочне силе изазива **момент стабилизације**, M_s , који тежи да заокрене возило око вертикалне осе z . На слици 4.3 је приказан ток бочне силе, F_y , и момента стабилизације, M_s , у зависности од угла бочног скретања возила.



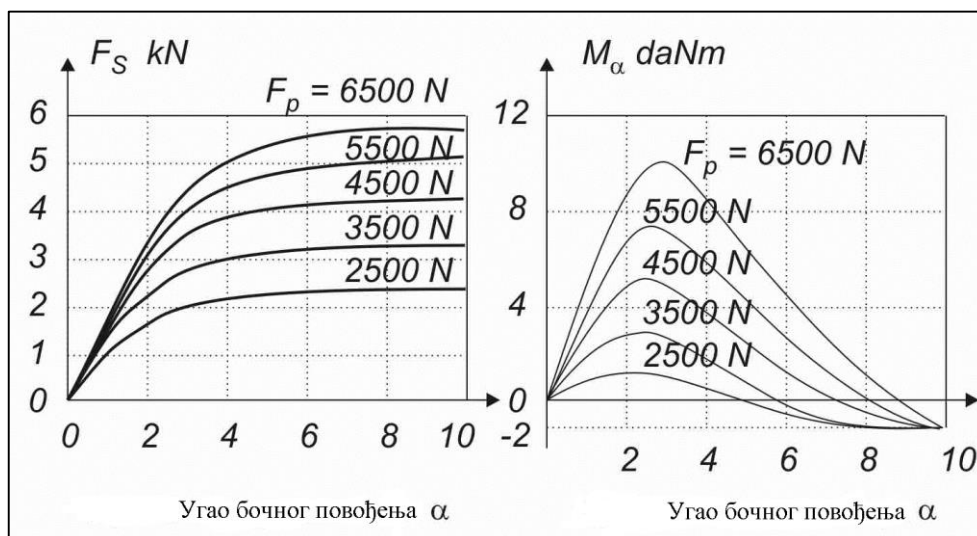
Слика 4.3 - Зависност бочне силе (лево) и момента стабилизације (десно) од угла бочног скретања [5]

На сликама 4.4 до 4.7 је дата зависност између угла бочног скретања и бочне силе (лево) и угла бочног скретања и момента стабилизације (десно) за различите параметре који имају утицај, као што су:

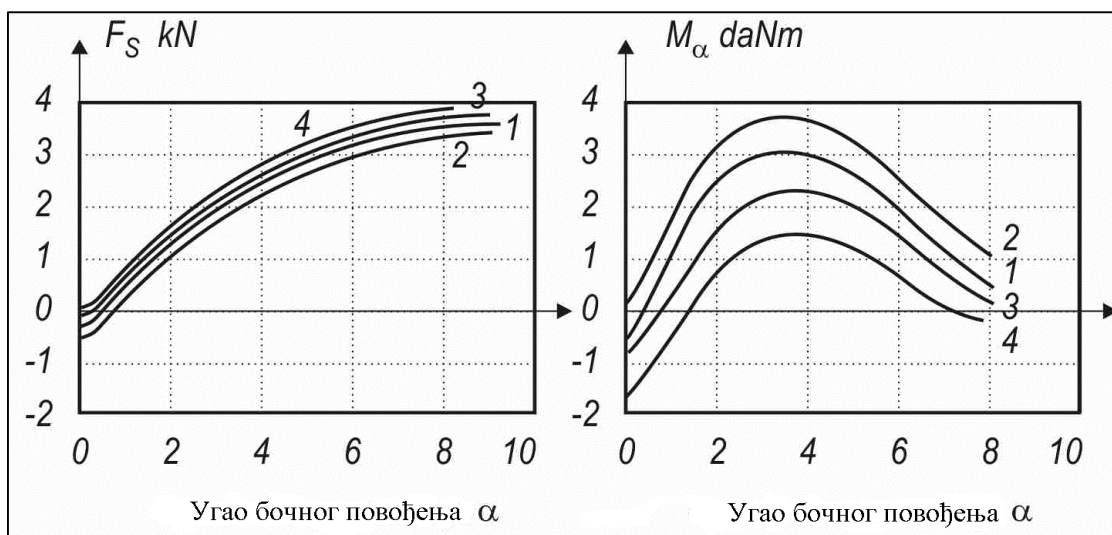
- притисак у пнеуматику, слика 4.4,
- радијално оптерећење точка, слика 4.5,
- угао нагиба точка, 4.6
- произвођач, слика 4.7.



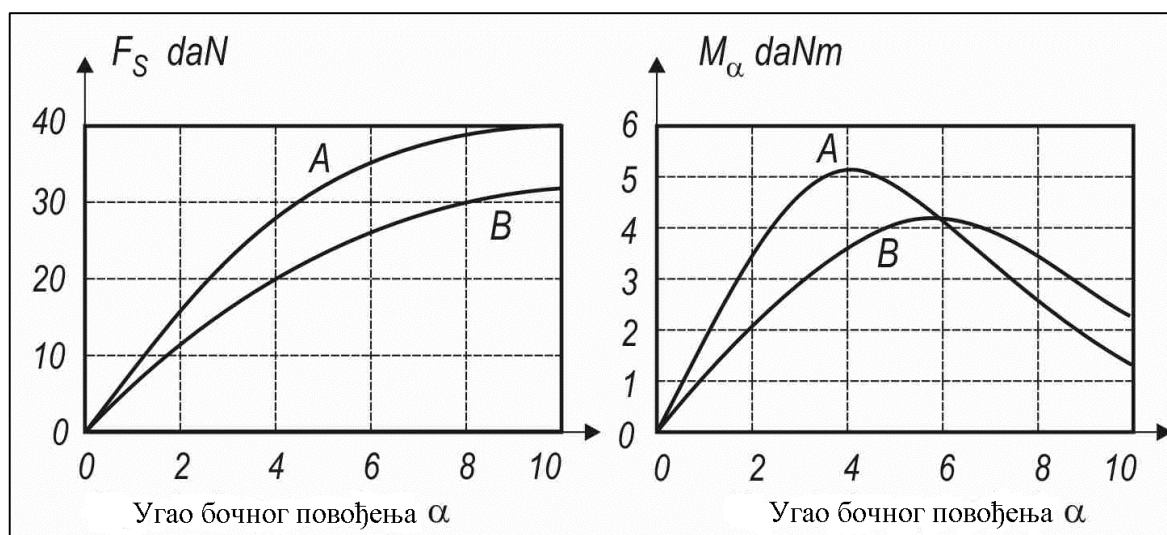
Слика 4.4 - Зависност бочне силе (лево) и момента стабилизације (десно) од угла бочног скретања за различите вредности притиска у пнеуматику[5]



Слика 4.5 - Зависност бочне силе (лево) и момента стабилизације (десно) од угла бочног скретања и радијалног оптерећења пнеуматика [5]

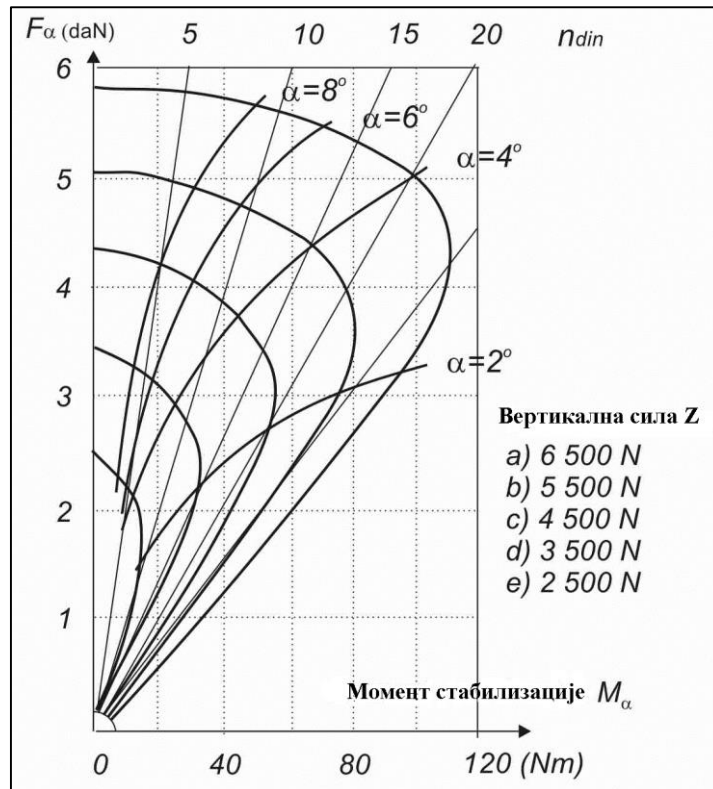


Слика 4.6 - Зависност бочне силе (лево) и момента стабилизације (десно) од угла бочног скретања за различите углове нагиба точка: 1 – 0°, 2 – 3°, 3 – 4°, 4 – 6°[5]



Слика 4.7 - Зависност промене бочне силе (лево) и момента стабилизације (десно) од угла бочног скретања за два различита произвођача пнеуматика[5]

Гофов дијаграм (*Gough*), слика 4.8, приказује међусобну зависност момента стабилизације и бочне силе за различите параметре, као што су: оптерећење точка, угао бочног скретања, динамички затур и други. Другачије се зове и **бочна карактеристика пнеуматика**.

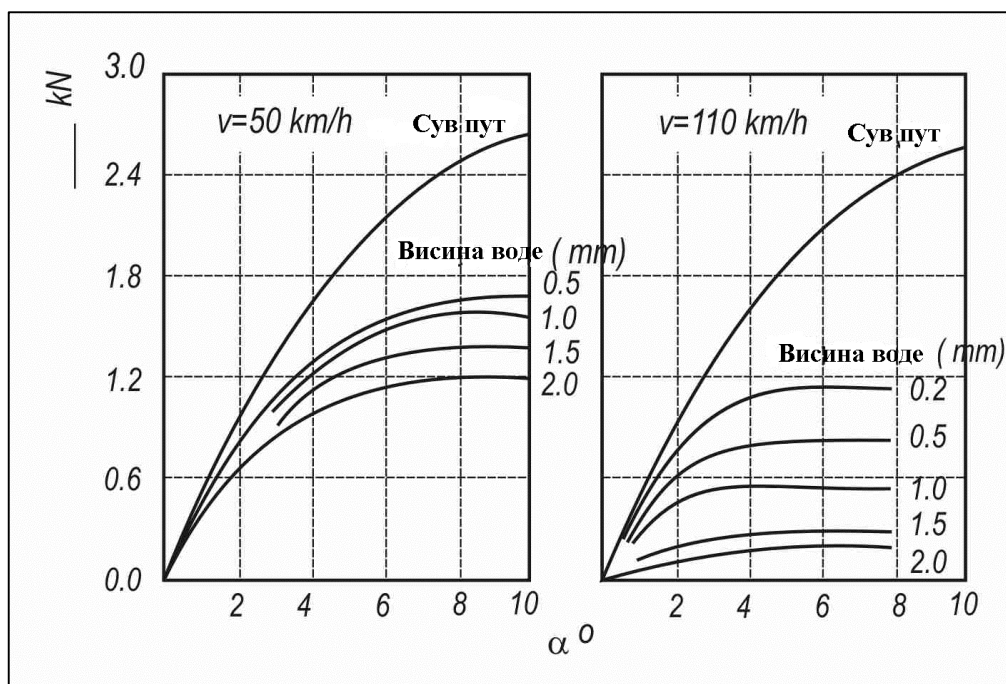


Слика 4.8 - Гофов дијаграм [5]

4.1 Утицај мокрог коловоза на бочно скретање

Услед погоршаног стања на путу, као што се дешава услед појаве кише, снега и других нечистоћа, приањање између пнеуматика и тла се смањује. Како у контакту између пнеуматика и тла делује вертикални притисак, при кретању возила водена површина „улази“ у канале газећег слоја. Контакт између газећег слоја и тла постоји уколико је вертикални притисак пнеуматика већи од динамичке компоненте притиска настале услед релативне брзине.

Што је брзина кретања возила већа, то је већа могућност да се контакт између пнеуматика и тла изгуби због водене површине која се налази између. Ово настаје тако што вертикални притисак постаје мањи од динамичког притиска. Појава која доводи до ове ситуације се назива **аквапланинг** (енг. *aquaplaning*). На слици 4.9 приказан је утицај мокрог коловоза на бочно скретање пнеуматика.



Слика 4.9 - Утицај мокрог коловоза (висине слоја воде) на бочно скретање [5]

Стање у којем се возило нађе услед велике количине воде на путу има негативан утицај на силе које точак треба да пренесе у бочном правцу, на момент стабилизације и на динамички затур.

Закључак

Пнеуматик је један од најважнијих делова на сваком моторном возилу. Захваљујући пнеуматичима, ублажавају се ефекти сила у додиру пнеуматик-тло. Пнеуматици треба да буду израђени у складу са прописаним условима, јер једино адекватни пнеуматици имају праву ефикасност. За сваки пнеуматик прописани су одговарајући коефицијент оптерећења (максимална носивост) и највећа дозвољена брзина којој пнеуматик сме да буде изложен. Индекси брзине и оптерећења су стандардизовани.

Пнеуматик је, такође, значајан елемент безбедности возила који повезује возило са подлогом. Пред пнеуматик се, такође, постављају захтеви у вези: преузимања статичких и динамичких оптерећења возила, доброг приањања, смањења буке и вибрација и економичности.

Пнеуматици имају вишеструку намену. Они не само што носе сву тежину возила, већ га и штите од испупчења, рупа, као и од других неравнина на путу. Још важније је то што пнеуматици омогућавају одржавање правца при различитим условима на путу и трење које је неопходно за убрзање возила, управљање и кочење.

Пнеуматици имају велики утицај и на проходност возила. Повећана додирна површина повећава проходност. То се постиже увођењем пнеуматика већег пречника и ширине. Смањење притиска ваздуха у пнеуматику доводи до повећања додирне површине и мањег притиска, односно мањег утањања точкова у тло. Тиме се смањују отпори кретања, односно повећава проходност возила.

Радијални пнеуматици су један од проналазака који су у последњих сто година имали највећи значај за развој возила. Данас је радијални пнеуматик постао доминантан за путничке аутомобиле и камионе. Међутим, дијагонални пнеуматици су још увек у употреби за одређена возила као што су: бицикли, мотоцикли, пољопривредна механизација и нека војна опрема.

Проучавање механике пнеуматика је од основног значаја за разумевање перформанси и карактеристика друмских возила. Како се деформација пута може занемарити у односу на деформацију пнеуматика, за студију проучавања кретања

аутомобила, користи се случај кретања еластичног пнеуматика по тврдој подлози, јер су скоро сви путеви по којима се крећу возила апсолутно крути.

На основу деловања различитих сила, момената и реакција тла разликује се неколико режима котрљања точка и у том случају точак може бити: погонски, гоњени, кочени, слободан и неутралан.

Приликом котрљања точка долази до његове деформације и то највише у пределу газећег слоја, а мање у појасу корда, бочног зида и каркасе.

Повећање пречника пнеуматика доводи до смањења вредности коефицијента отпора котрљања, а кочење повећава утицај на хабање пнеуматика.

На динамичко понашање пнеуматика, поред утицаја бочне силе и оптерећења точка, као главних фактора који утичу на скретање точка, делују и притисак ваздуха у пнеуматику и његова конструкција.

Још једна појава која има великог утицаја на бочно скретање точка је аквапланинг, која може да доведе до губитка контакта између пнеуматика и тла, док при великим брзинама може узроковати и саобраћајне незгоде, иако возило поседује адекватне пнеуматике за ове услове.

Литература

- [1] Wong, J.Y.: “Theory of ground vehicles”, John Wiley & Sons, Inc., 2001
- [2] Индустрија „Милоје Закић“: Каталог гума Трајал, Маркетинг индустрије „Милоје Закић“ Крушевац
- [3] Симић, Д.: „Моторна возила“, Научна књига, Београд, 1988
- [4] Continental: “Tyre Basics - Passenger Car Tyres”, Continental Reifen Deutschland GmbH, 2013.
- [5] Јанковић, А.: „Динамика аутомобила“, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [6] Стојић, Б.: „Теорија кретања друмских возила – Скрипта“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2012.
- [7] Демић М., Лукић Ј.: „Теорија кретања моторних возила“, Машински факултет Универзитета у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [8] Pauwelussen, J.P.: “Essentials of vehicle dynamics”, Elsevier Ltd., 2015.