

Višelamelna motociklistička spojka

Varga, Erik

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:586672>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

VIŠELAMELNA MOTOCIKLISTIČKA SPOJKA

Rijeka, rujan 2023.

Erik Varga
0069090267

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

VIŠELAMELNA MOTOCIKLISTIČKA SPOJKA

Mentor: izv. prof. dr. sc. Željko Vrcan

Komentor: izv. prof. dr. sc. Kristina Marković

Rijeka, rujan 2023.

Erik Varga
0069090267

Rijeka, 9. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**
Predmet: **Konstruktivski elementi II**
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Erik Varga (0069090267)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Višelamelna motociklistička spojka / Multiplate motorcycle clutch**

Opis zadatka:

Konstruirati višelamelnu spojku motociklističkog tipa za zadane uvjete pogona. Provjeriti da li je za konstrukciju spojke mjerodavan režim najveće snage ili režim najvećeg momenta. Izraditi pregled postojećih izvedbi lamela, analizirati prednosti i nedostatke rada u suhim i mokrim uvjetima, izvesti odgovarajuće zaključke te izabrati najpovoljnije rješenje. Izraditi sklopne i radioničke nacрте odabranog rješenja spojke prema dogovoru s mentorima.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Erik Varga

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Izv. prof. dr. sc. Željko Vrcan

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic



Izv. prof. dr. sc. Kristina Marković
(komentor)

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Rijeka, rujan 2023.

Erik Varga

ZAHVALA

Ovom prilikom se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Željku Vrcanu na pruženoj prilici za izradu ovog završnog rada.

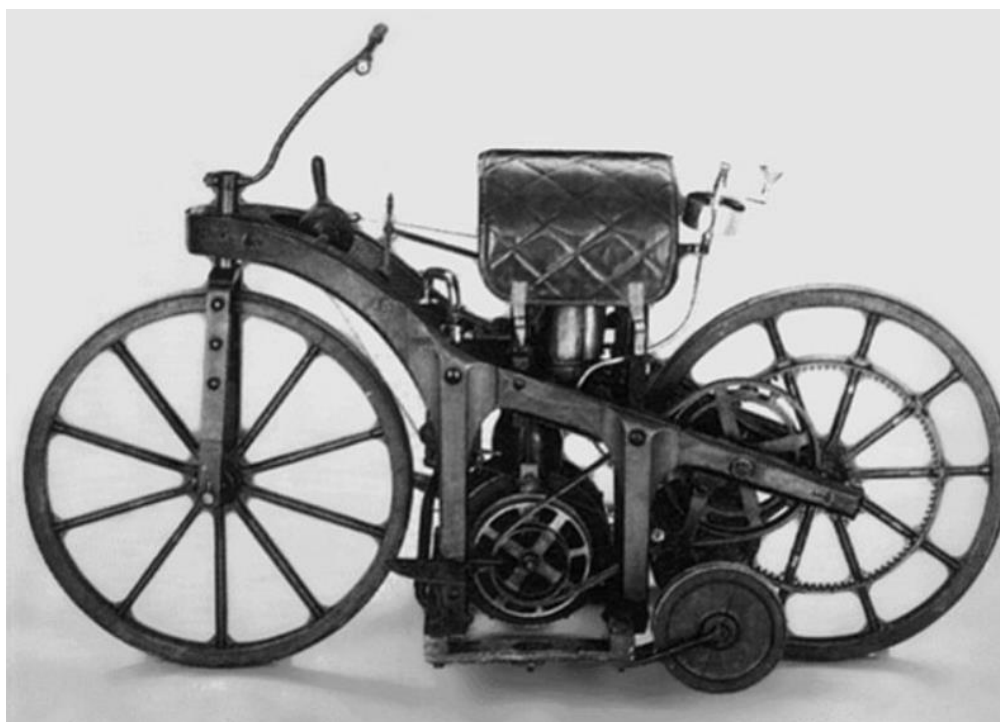
SADRŽAJ

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI RADA	I
ZAHVALA.....	II
SADRŽAJ	III
1. UVOD.....	1
1.1. Spojke.....	2
2. TARNE SPOJKE	3
2.1. Tarni parovi	3
2.2. Dinamika tarne spojke.....	4
2.2.1. Vrijeme klizanja.....	6
2.2.2. Primjena zamašnjaka	7
2.3. Bilanca energije kod jednog uključivanja	8
3. MOTOCIKLISTIČKA SPOJKA	9
3.1. Princip rada motociklističke spojke	10
3.2. Podjela motociklističkih spojki	13
3.3. Klizna spojka.....	15
3.4. Lamele kod motociklističke spojke.....	15
4. PRORAČUN MOTOCIKLISTIČKE SPOJKE.....	18
4.1. Proračun pri režimu rada maksimalne snage i maksimalnog momenta	18
4.1.1. Momenti motociklističke spojke.....	19
4.1.2. Broj tarnih parova	23
4.1.3. Ostvareni pritisak	24
4.1.4. Sila uključivanja.....	25
4.1.5. Moment inercije zamašnih masa.....	26
4.1.6. Vrijeme klizanja spojke	27
4.1.7. Rad trenja kod jednog uključivanja	28
4.1.8. Rad trenja kod višekratnog uključivanja.....	28
4.1.9. Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke	29
4.1.10. Specifično toplinsko opterećenje spojke	29
4.1.11. Specifična toplinska snaga spojke.....	30

4.2.	Proračun prilikom faze pokretanja	31
4.2.1.	Prirast temperatura lamela	34
4.3.	Proračun prilikom faze mijenjanja brzina	38
4.3.1.	Prirast temperatura lamela	40
4.4.	Odabir ulja za hlađenje.....	41
4.5.	Trajnost tarnih ploha	43
4.6.	Proračun vratila	44
5.	ZAKLJUČAK	46
	LITERATURA.....	47
	POPIS OZNAKA I KRATICA.....	49
	POPIS SLIKA	54
	POPIS TABLICA.....	55
	SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI	56
	PRILOZI.....	57

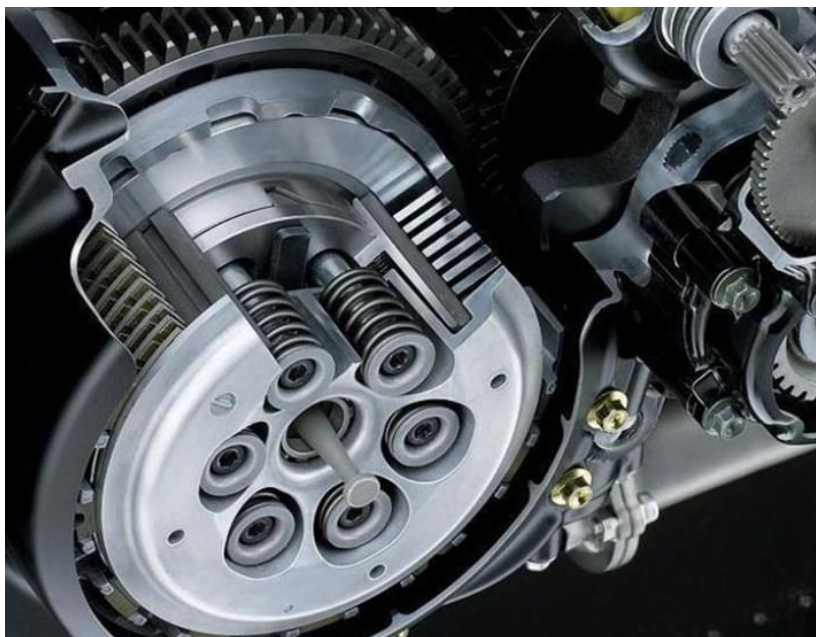
1. UVOD

Motocikl je motorno vozilo na dva kotača nastalo još davne 1885. godine kada ga je prvi put proizveo njemački inženjer G. W. Daimler. Težina prvog motocikla iznosila je svega 90 kilograma te je bio pogonjen Ottovim motorom snage 0,4 kilovata. Kotači su bili izrađeni od drva te je imao dva manja potporna kotača sa strane, a razvijao je najveću brzinu od 6 do 12 kilometara na sat. Glavni dijelovi današnjeg motocikla su: prednja i stražnja vilica s kotačima, pogonski motor koji zajedno sa spojkom i prijenosnikom snage čini cjelinu, kočni sustav, električna oprema, spremnik goriva, sjedalo te okvir motocikla. [1] Na slici 1.1. prikazan je Daimler-ov motocikl.



Slika 1.1. G.W. Daimler-ov motocikl [1]

Rad se temelji na izradi spojke motociklističkog tipa stoga je potrebno razumjeti princip rada spojke, posebice tarnih spojki. Izvršit će se detaljan opis rada motociklističke spojke zajedno sa njezinim dijelovima i funkcijama. Analizirat će se prednosti i mane rada motociklističke spojke u suhim i mokrim uvjetima te pregled postojećih izvedbi lamela. Temeljno na analizama izabrat će se najpovoljnije rješenje. Na slici 1.2. prikazan je sklop motociklističke spojke.



Slika 1.2. Prikaz sklopa motociklističke spojke [2]

1.1. Spojke

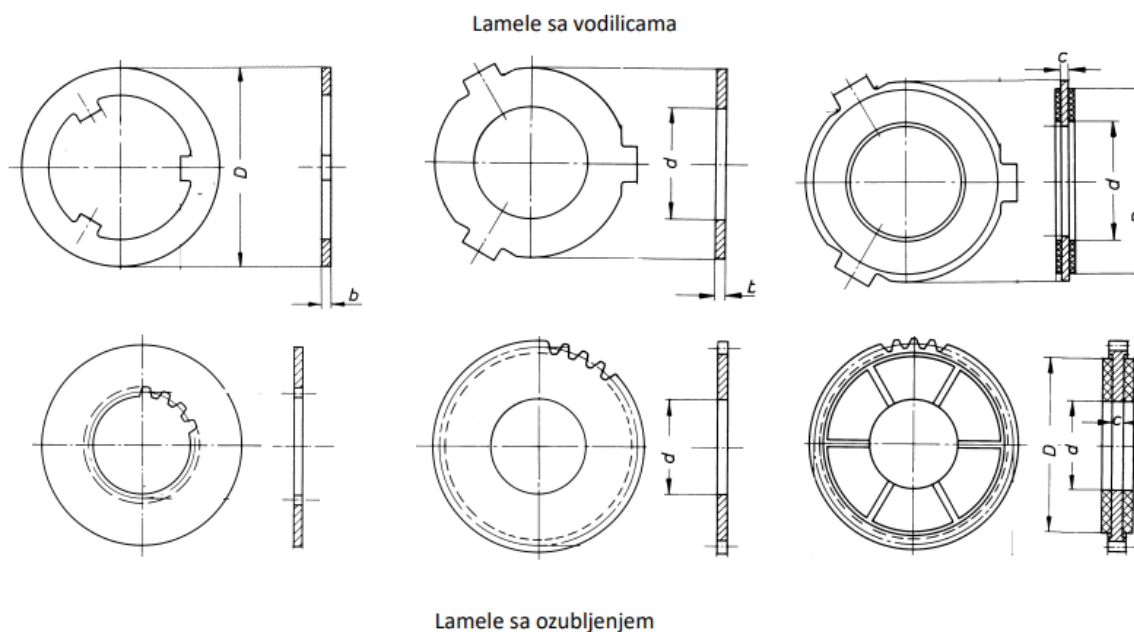
Spojke su konstrukcijski strojni elementi čija je zadaća da prenose moment torzije sa pogonskog stroja na gonjeno povremenim ili stalnim povezivanjem dvaju vratila. Neke spojke imaju i dodatnu zadaću poput prigušenja torzijskih vibracija, zaštitu od preopterećenja, uspostavljanje ili prekidanje prijenosa momenta torzije, prilagođavanje odstupanjima osi vratila koja mogu nastati netočnom izradom ili ugradnjom te smanjivanje oscilacija momenta torzije i udara pri pokretanju i u radu. Prema funkciji, spojke se dijele na krute, kompenzacijske, elastične i izvrstive od kojih se izvrstive spojke dijele na centrifugalne spojke, hidrodinamičke, elektrodinamičke, sigurnosne te tarne spojke. [3]

2. TARNE SPOJKE

Kao što je ranije navedeno u radu će se isključivo opisivati tarne lamelne spojke koje prenose moment torzije trenjem između tarnih ploha. Prema izvedbi se dijele na pločaste, stožaste, radijalne i lamelne od koji lamelne dolaze u izvedbi s jednom ili više lamela. Način uključivanja tarnih spojki može biti mehanički, elektromagnetski, pneumatski i hidraulički. Aksijalna sila kod tarnih spojki može se ostvariti polužicama, hidraulički, elektromagnetski, pneumatski, oprugama i centrifugalnim utezima. [3]

2.1. Tarni parovi

Trenjem između tarnih ploha, lamele direktno sudjeluju u prijenosu snage unutar spojke. Lamele razlikujemo prema načinu aksijalnog vođenja. Postoje lamele s vodilicama te lamele s ozubljenjem koje mogu biti smještene na vanjski ili unutarnji rub lamele. Lamele se mogu izrađivati sa ili bez obloge i od organskog materijala. Lamele bez obloga izrađene su od čelika ili sivog lijeva dok lamele s oblogom mogu biti izrađene od čelika, a obloga može biti organska, od sinter bronce ili sinter željeza. [3] Na slici 2.1. prikazana je podjela lamela.



Slika 2.1. Prikaz podjele lamela prema načinu aksijalnog vođenja [3]

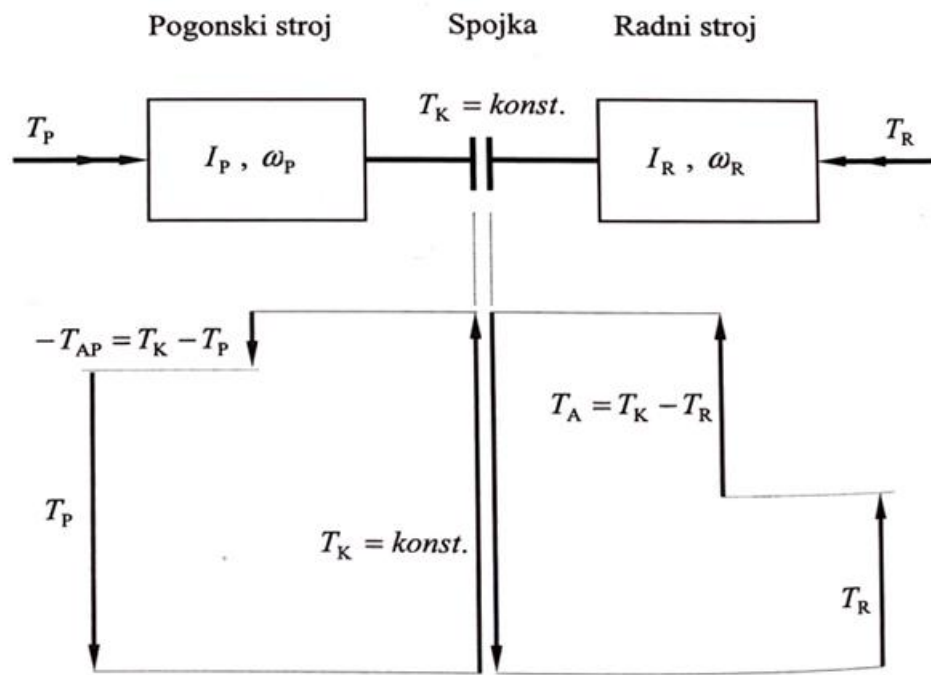
Ovisno o kombinaciji tarnih parova razlikujemo dva načina rada lamelni spojki, one koji mogu raditi nasuho te one koje moraju biti podmazane uljem. Također, postoje tarni parovi koji mogu raditi nasuho i biti podmazivani uljem. [3] U tablici 2.1. prikazane su kombinacije tarnih parova.

Tablica 2.1. *Kombinacije tarnih parova [3]*

Tarni par	Nasuho	Podmazivano uljem
Kaljeni čelik / kaljeni čelik	–	DA
Nitrirani čelik / nitrirani čelik	DA	–
Sinter bronca / čelik	DA	DA
Sinter željezo / čelik	DA	–
Organska obloga / sivi lijev ili čelik	OBAVEZNO!	–
Papir / čelik*	–	OBAVEZNO!

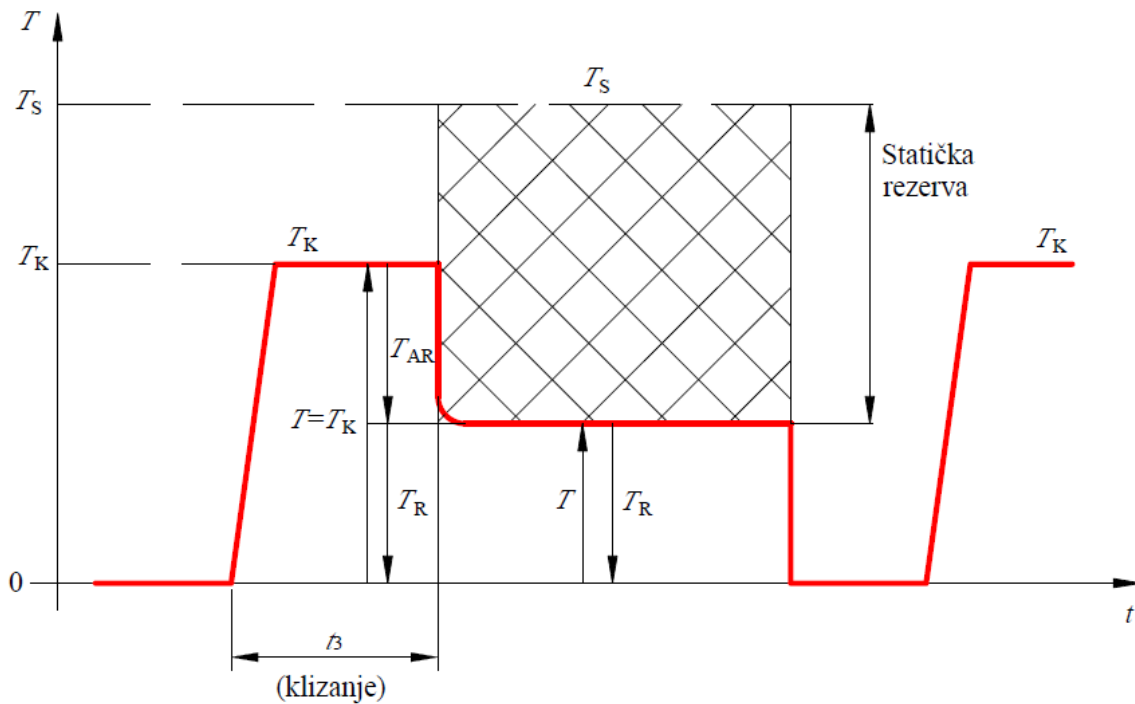
2.2. Dinamika tarne spojke

Izbjegavanje pokretanja pogonskog stroja pod punim opterećenjem ostvaruje se ugradnjom tarne spojke između pogonskog i radnog stroja. Pokretanjem bez opterećenja pogonski stroj ubrzava djelovanjem momenta T_{AP} . Prekidom ubrzanja postiže se moment torzije pogonskog stroja T_P i pritom vrijedi da je moment ubrzanja T_{AP} jednak nuli. Radni stroj se pokreće uključivanjem tarne spojke nakon što se rad pogonskog stroja stabilizira. Kako bi se radni stroj zaustavio nije potrebno isključiti pogonski stroj nego taru spojku. Uključivanjem tarne spojke započinje klizanje između tarnih površina te traje sve dok se kutne brzine pogonskog i radnog stroja ne izjednače. Pri tome spojka prenosi uključni moment T_K koji je određen pritiskom na tarnim površinama te se u pravilu smatra konstantnim kod tarnih spojki. Pogonski stroj zbog nastalog opterećenja i pod djelovanjem momenta usporava što ujedno i utječe na smanjivanje kutne brzine pogonskog stroja. [4] Na slici 2.2. prikazana je shema momenata prilikom uključivanja spojke.



Slika 2.2. Shema momenata prilikom uključivanja spojke [4]

Pri trajanju uključivanja važno je razlikovati dva slučaja. Prvi slučaj razmatra stanje kada je uključni moment spojke T_K manji od najvećeg momenta radnog stroja T_M , dok je kod drugog slučaja obrnuta situacija odnosno razmatra se kada je uključni moment veći od radnog. Kod prvog slučaja usporavanje pogonskog stroja traje kratko zbog toga što su momenti inercije pogonskog stroja relativno mali, pa tako smanjenje kutne brzine dovodi do povećanja momenta pogonskog stroja T_P sve dok se ne izjednači sa uključnim momentom T_K pa moment usporavanja T_{AP} postaje jednak nuli. Prilikom uključivanja spojke, radni stroj se istovremeno ubrzava momentom ubrzanja radnog stroja T_A te traje dok oba stroja ne postignu zajedničku kutnu brzinu. U tom trenutku pogonski i radni stroj imaju zajedničko ubrzanje djelovanjem momenta T_{Auk} koje traje sve dok se moment pogonskog stroja T_P i moment radnog stroja T_R ne izjednače. Prestankom klizanja spojka može prenositi moment jednak statičkom T_S koji je veći od uključnog momenta T_K pa neće doći do proklizavanja spojke sve dok se statički moment ne prekorači. [4] Na slici 2.3. prikazan je pojednostavljeni dijagram momenata na spojci.



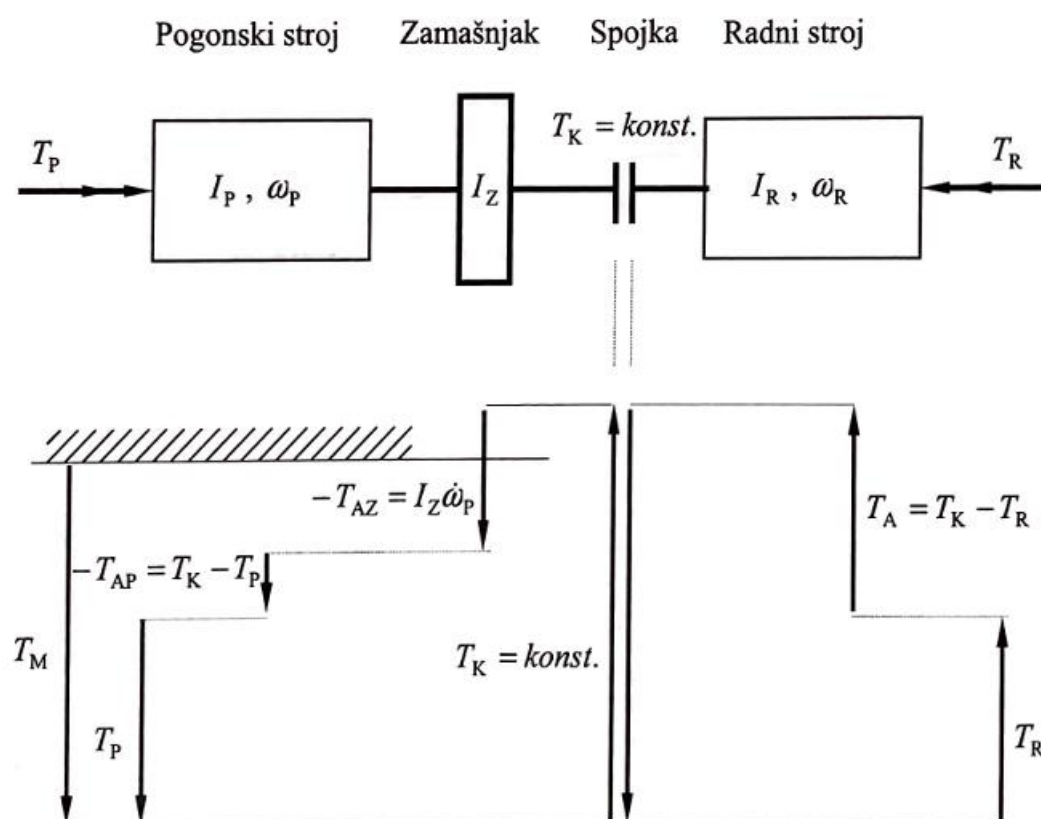
Slika 2.3. Pojednostavljeni dijagram momenata na spojci

2.2.1. Vrijeme klizanja

Uključivanjem, spojka klizi sve dok se brzina vrtnje radnog i pogonskog stroja ne izjednače, te je vrijeme potrebno za uključivanje ovisno o karakteristici momenta radnog stroja. Ovisno o vrsti radnog stroja razlikuju se tri slučaja. U prvom slučaju je moment torzije radnog stroja T_R konstantan te je karakterističan za strojeve koji se pokreću pod punim opterećenjem. Ujedno s time je i moment ubrzanja T_A konstantan. Kod drugog slučaja, u strojevima dominira viskozno trenje pa se moment torzije radnog stroja T_R linearno mijenja s kutnom brzinom radnog stroja. U trećem slučaju je moment torzije radnog stroja T_R proporcionalan kvadratu svoje kutne brzine. [3]

2.2.2. Primjena zamašnjaka

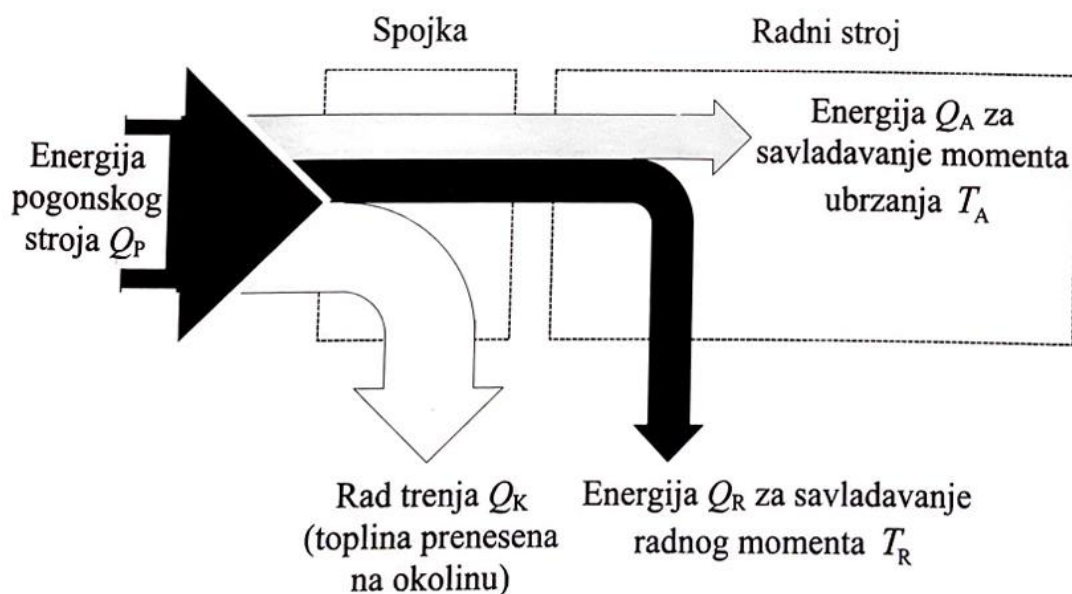
Kako je u potpoglavlju 2.2. spomenuto, razmatraju se dva slučaja kod trajanja uključivanja. U drugom slučaju kada je uključni moment T_K veći od najvećeg momenta radnog stroja T_M moment inercije pogonskog stroja je manji od momenta inercije radnog stroja zbog naglog usporavanja pogonskog stroja te dolazi do smanjenja brzine pa postoji mogućnost zaustavljanja radnog stroja. Ovakav sklop ponašao bi se kao da su pogonski i radni stroj kruto povezani što je nelogično jer bi tada pogonski stroj bio jednako opterećen kao da spojka nije niti ugrađena. Zbog takvog slučaja se na strani pogonskog stroja ugrađuje zamašnjak kako bi se povećao moment inercije pogonskog stroja. Zbog ugradnje se zamašnjaka gubi vrijeme pri pokretanju. [4] Na slici 2.4. prikazana je shema momenata spojke s ugrađenim zamašnjakom.



Slika 2.4. Shema momenata spojke s ugrađenim zamašnjakom

2.3. Bilanca energije kod jednog uključivanja

Tijekom uključivanja spojke, pogonski stroj predaje ukupnu mehaničku energiju Q_P koju spojka dijelom pretvara u toplinu, a drugim dijelom predaje radnom stroju. Toplinska energija, odnosno rad trenja Q_K nastao klizanjem spojke uzrokuje pretvorbu topline koja se prenosi na okolinu. Energiju predanu radnom stroju možemo podijeliti na energiju Q_A potrebnu da bi se savladao moment ubrzanja T_A i energiju Q_R koja je savladala radni moment T_R . [3] Cijeli princip bilance energije kod jednog uključivanja prikazan je na slici 2.5.

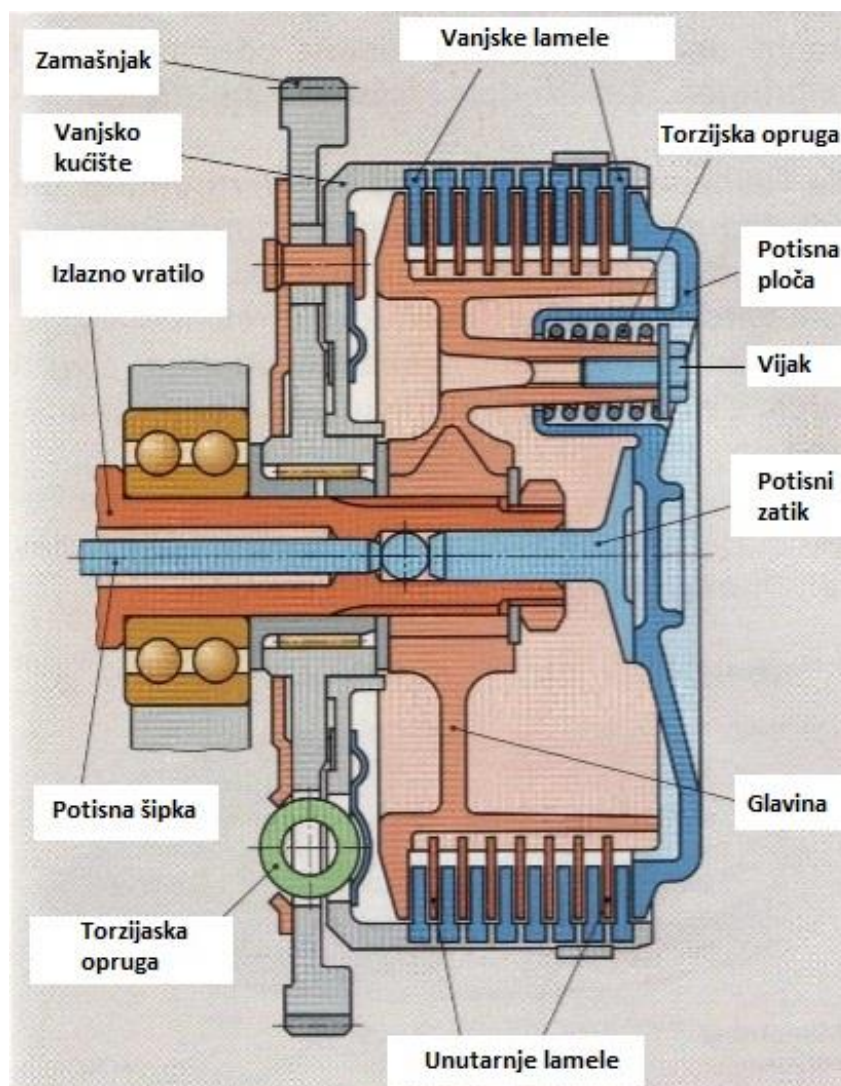


Slika 2.5. Bilanca energije kod jednog uključivanja [4]

Kako postoje izvedbe lamela s različitim debljinama, akumulacija topline je različita kod svake debljine. Prvenstveno lamele dijelimo na tanke i debele. Ranije je navedeno da rad trenja Q_K uzrokuje pretvorbu topline što se kod spojke s tankim lamelama akumulira u lamelama po čitavoj dubini, pa se stoga naglo povećava temperatura lamela. U akumuliranju topline sudjeluju metalne lamele ili lamele s metalnom oblogom, pa kod akumuliranja topline dolazi do brzog porasta temperature u kratkom vremenu nakon čega je potrebna mnogo duža faza odvođenja topline. Kod spojke s debelim lamelama je slučaj nešto drugačiji, naime najveća količina topline se akumulira do određene dubine lamela te se ostatak postepeno akumulira. Tek nakon nekog vremena zagrijavanja i vođenja, temperatura se u cijelom volumenu lamele izjednači. [3]

3. MOTOCIKLISTIČKA SPOJKA

Motociklistička spojka je konstrukcijski strojni element koji se sastoji od vanjskog kućišta sa izdancima u koje se postavljaju vanjske lamele, unutarnje ozubljene glavine na koju se postavljaju unutarnje lamele, potisne ploče, torzijskih opruga i vijaka. Glavni dijelovi motociklističke spojke označeni su na slici 3.1. Zadaća spojke kod motocikla je da uspostavi ili prekine vezu između pogonskog stroja i radnog stroja, odnosno prijenos snage s motora na stražnji kotač motocikla. Dakle, funkcija spojke je da omogući promjenu brzine motocikla ili da se motocikl zaustavi, a da pritom nije potrebno u potpunosti ugasiti motor. Omogućuje korištenje zupčanika za promjenu brzine privremenim prekidom snage na stražnjem kotaču. Postoje dvije vrste spojki kod motocikla, spojka koja radi u prisustvu ulja i spojka koja radi nasuho. [5]

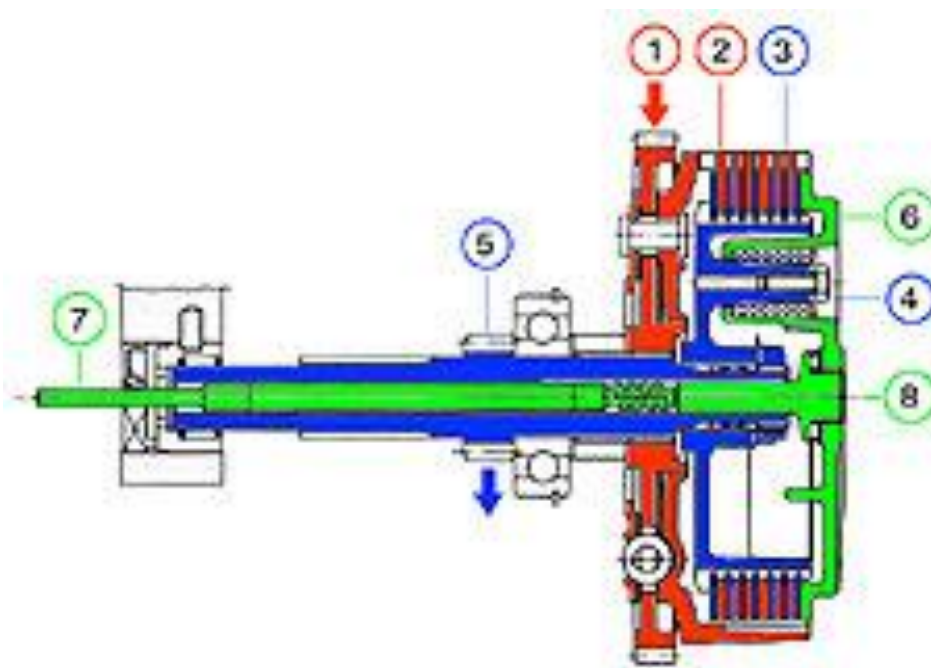


Slika 3.1. Presjek glavnih dijelova motociklističke spojke [6]

3.1. Princip rada motociklističke spojke

Motociklistička spojka je tarna spojka koja gotovo uvijek dolazi u izvedbi s više lamela za razliku od automobila. Jedini proizvođač motocikala koji koristi jednolamelnu spojku je Moto Guzzi. Kako je konstrukcija motocikla manja od automobila potrebno je konstruirati spojku u odnosu na skućeni prostor kojim raspolaže motocikl. Zbog ograničenog prostora za motor spojka se konstruira s više lamela manjih dimenzija, kompaktnijeg dizajna te manje mase same spojke. Bez obzira na manje gabarite, motociklistička spojka može prenijeti veliki okretni moment te se njome lako upravlja. [7]

Na slici 3.2. prikazan je presjek sustava motociklističke spojke. Crvenom bojom prikazani su dijelovi koji su povezani s pogonskim strojem odnosno motorom, plavom bojom su prikazani dijelovi radnog stroja dok su zelenom bojom označeni pokretni dijelovi mehanizma.

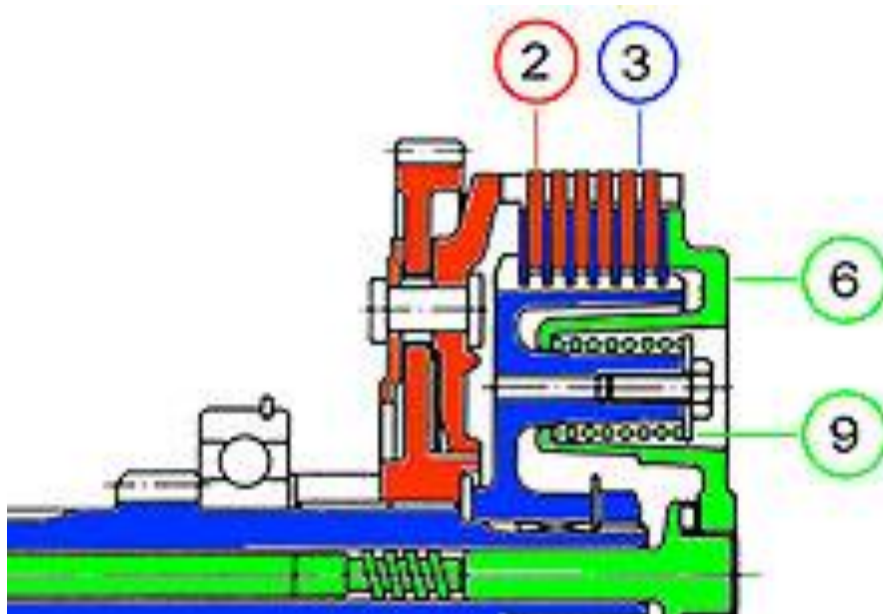


Slika 3.2. Presjek sustava motociklističke spojke [8]

Zupčanik koljenastog vratila pokreće zamašnjak (1). Na zamašnjak se često ugrađuje amortizer kako bi ublažio udar na dijelove vozila prilikom pokretanja. Osim amortizera zamašnjak je spojen s vanjskim kućištem spojke s utorima u koje se montiraju vanjske lamela s izdancima (2). Tijekom rada spojke vanjske lamela su u kontaktu sa unutarnjim lamelama (3) koje imaju ozubljenje s unutrašnje strane. Unutarnje lamela se montiraju na ozubljeni glavini (4) koja je čvrsto povezana

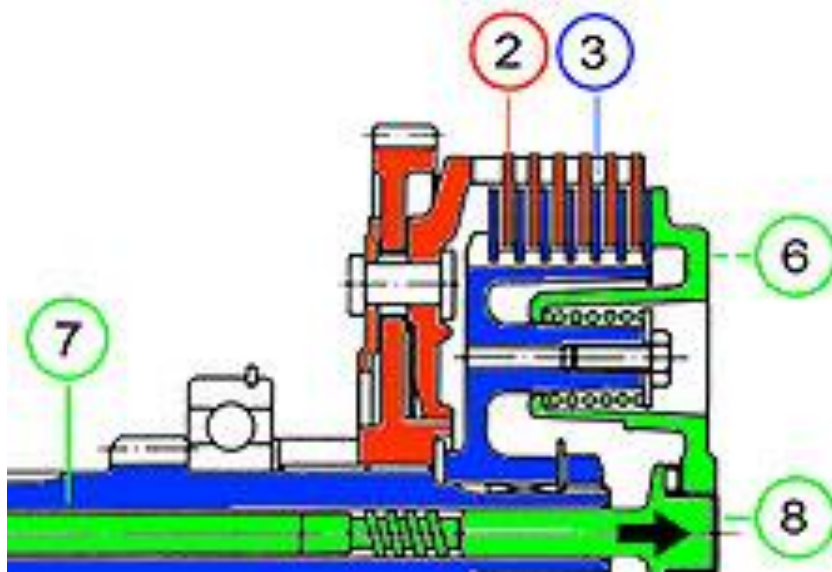
na ulazno vratilo mjenjača (5). Dakle okretni moment koljenastog vratila pokreće zamašnjak koji se preko paketa lamela prenosi do glavine. Dalje se okretni moment prenosi preko zupčanika na mjenjač (označeno s plavom strelicom). [8]

Kako bi prijenos momenta uopće bio moguć, vanjske i unutarnje lamele pritisnute su jedna na drugu preko potisne ploče (6). Potisna sila ostvaruje se torzijskim oprugama (9) koje se postavljaju na ispupčenja glavine, te se vijcima pričvrsti cijeli sklop. Opruge je potrebno provjeravati nakon nekog vremena upotrebljavanja jer ako oslabe spojka će proklizavati zbog nedovoljne sile pritiska. [8] Na slici 3.3. prikazan je presjek spojke u zahvaćenom položaju.



Slika 3.3. Presjek motociklističke spojke u zahvaćenom položaju [8]

Prekid prijenosa snage s motora na stražnji kotač ostvarujemo tako da povučemo ručicu, odnosno polugu spojke koja se nalazi na upavljaču s lijeve strane motocikla. Time poluga koja je smještena s vanjske strane bloka motora gura potisnu šipku (7) koja je smještena unutar vratila mjenjača. Potisna šipka gura potisni zatik (8) ka potisnoj ploči (6) te pomiče potisnu ploču tako da se odupre protiv sile pritiska opruga. Kada potisna ploča više ne stvara pritisak na lamele, kontakt između unutarnje i vanjske lamele se eliminira, to jest one se odvoje čime se time prekine tarva veza te nema više trenja između lamela. Prekidom tarvog kontakta između lamela dolazi do prestanka okretanja dijelova radnog stroja dok se zamašnjak zajedno sa vanjskim kućištem i vanjskim lamelama i dalje okreće. [8] Na slici 3.4. prikazan je presjek motociklističke spojke u nezahvaćenom položaju.



Slika 3.4. Presjek motociklističke spojke u nezahvaćenom položaju [8]

Puštanjem poluge spojke opruga vraća potisnu ploču nazad u zahvaćeni položaj. Potisna ploča nazad pritisne lamele te se prijenos snage može dalje nastaviti.

Uključivanje i isključivanje spojke može se odvijati na dva načina, mehanički preko sajle ili hidraulički. Kod mehaničkog uključivanja sila poluge se prenosi preko *Bowden* sajle, pomicanjem unutarnje sajle koja je sastavljena od snopa čelične žice. Mehaničko uključivanje odnosno isključivanje spojke ugrađuje se zbog svoje jednostavnosti postavljanja te je njihova izrada daleko jeftinija od hidrauličke verzije. [9] Na slici 3.5. prikazana je sajla pomoću koje se aktivira spojka.



Slika 3.5. Sajla za mehaničko uključivanje spojke [10]

Kod hidrauličkog načina aktivacija spojke se također odvija pritiskom ručice na motociklu. Prilikom pritiska ručice, ulje iz spremnika koji je pričvršćen na poluzi spojke, pod tlakom se potiskuje niz hidraulički vod pomoću klipa do potisnog cilindra gdje ulje pod tlakom gura klip koji je povezan na potisnu ploču pri čemu se spojka isključuje. [11] Na slici 3.6. prikazan je sustav sa hidrauličkom aktivacijom spojke.



Slika 3.6. Sustav sa hidrauličkom aktivacijom spojke [12]

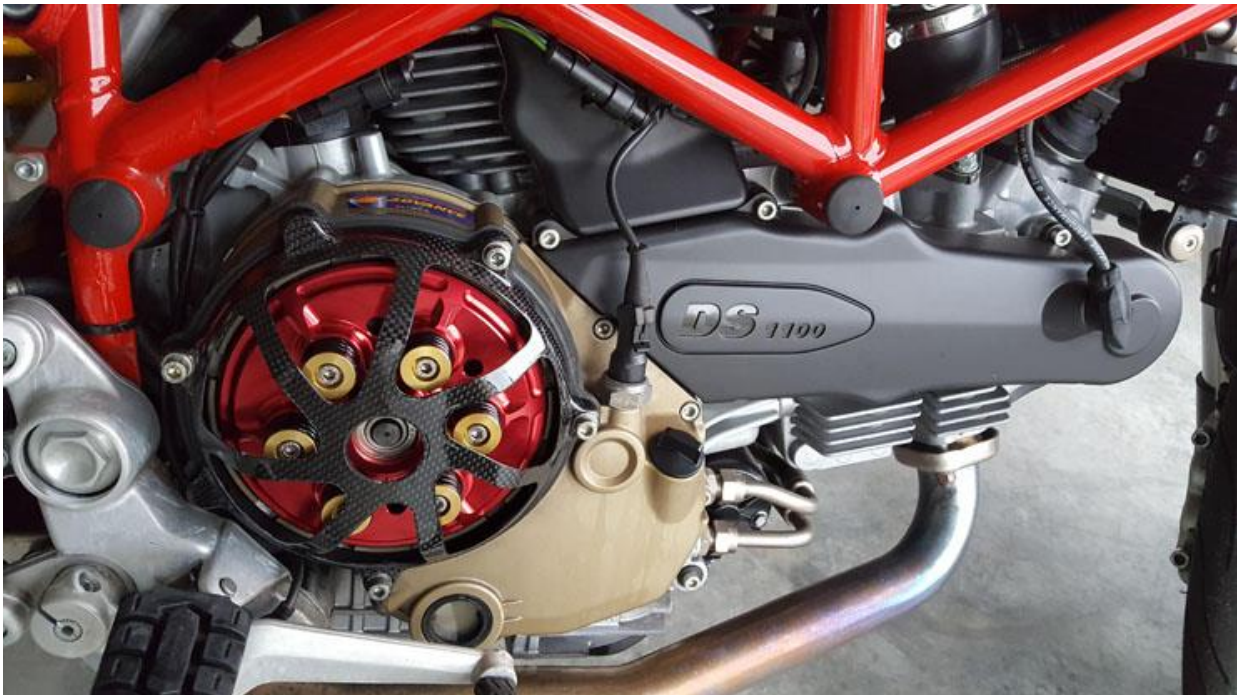
3.2. Podjela motociklističkih spojki

Motociklistička spojka se dijeli s obzirom na način rada spojke. Postoje dvije vrste spojki, takozvane mokre i suhe. Mokre spojke rade u prisustvu ulja te je zbog toga mokra spojka uvijek zatvorena u kućištu za razliku od suhe spojke koja radi bez ikakvog podmazivanja. Suhe spojke su poznate po svom legendarnom bučnom zvuku te su nekada bile uobičajene, ali u današnje vrijeme se ipak više koriste mokre spojke. [13]

Primarna svrha spojki koje rade u prisustvu ulja je hlađenje lamela te se zbog tog učinka mogu puno više opteretiti. Također, imaju široku zonu trenja zbog čega su puno jednostavnije za korištenje. Zbog podmazivanja imaju dulji vijek trajanja nego suhe spojke. Najveći nedostatak

mokre spojke je manji gubitak snage sa motora na stražnji kotač zbog otpora tekućine. Trošenje spojke uzrokuje pojavu prljavštine u ulju koje ostaje u motoru zbog čega se mora češće mijenjati. [13, 14, 15]

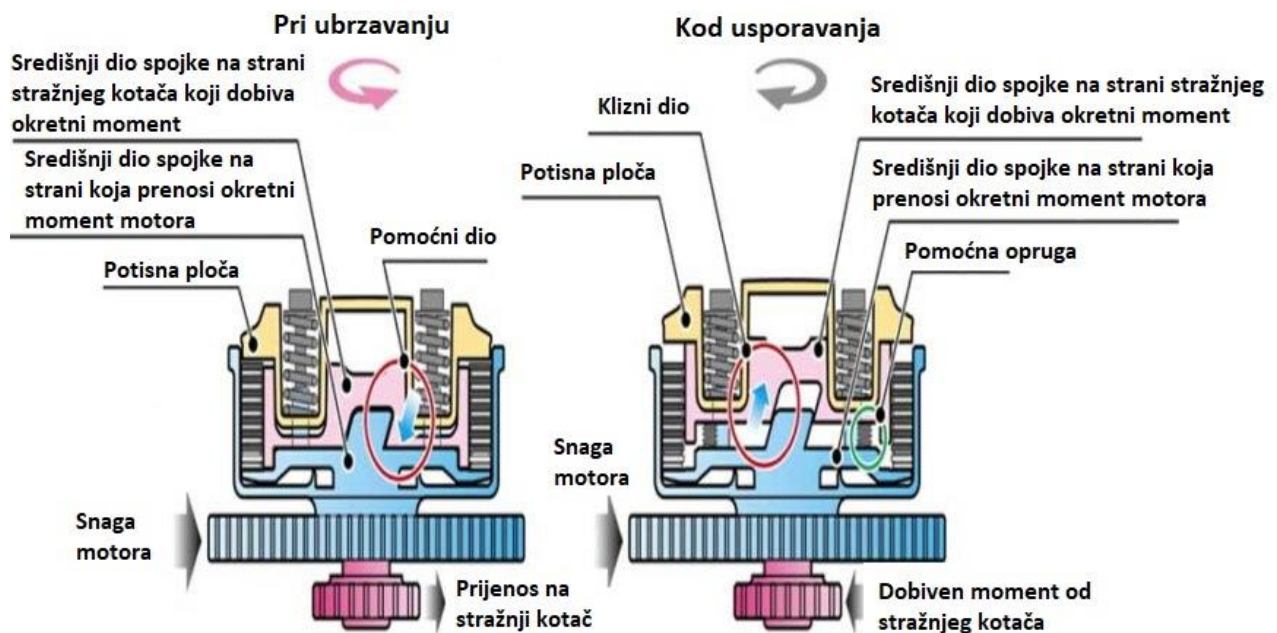
Suhe spojke smještene su izvan kućišta radilice te ne rade u prisustvu ulja što znači da svu snagu koju proizvede motor prenose na pogon stražnjeg kotača te su zbog toga više korištene kod motocikala koji se utrkuju, no neki proizvođači također koriste suhe spojke kod cestovnih motocikla. Najpoznatiji među njima su talijanski proizvođač Ducati te njemački BMW. Lamele se kod suhe spojke zbog nedostatka hlađenja pomoću ulja brže troše. Također u izvedbi suhe spojke prisutan je manji broj tarnih parova u odnosu na mokru spojku. Vijek trajanja suhих spojki zbog povećane količine trenja je puno kraći nego što je to slučaj kod mokrih spojki. [13, 14, 15] Na slici 3.7. prikazana je izvedba suhe spojke na motociklu.



Slika 3.7. Izvedba suhe spojke [15]

3.3. Klizna spojka

Klizna spojka je bila prvenstveno konstruirana i dizajnirana za potrebe trkaćih motocikla, no danas se može pronaći i kod motocikla namijenjenih za cestovnu vožnju. Služe za sprječavanje prevelikog broja okretaja te smanjuju količinu poskakivanja stražnjeg kotača prilikom snažnog kočenja. Klizna spojka se koristi za zaštitu od proklizavanja ili blokiranja pogonskog kotača motocikla. [16] Na slici 3.8. prikazana je jednosmjerna spojka koja izbacuje kad moment kojim stražnji kotač djeluje na pogonski motor postane prevelik.



Slika 3.8. Prikaz jednosmjerne klizne spojke prilikom ubrzavanja i usporavanja [16]

3.4. Lamelle kod motociklističke spojke

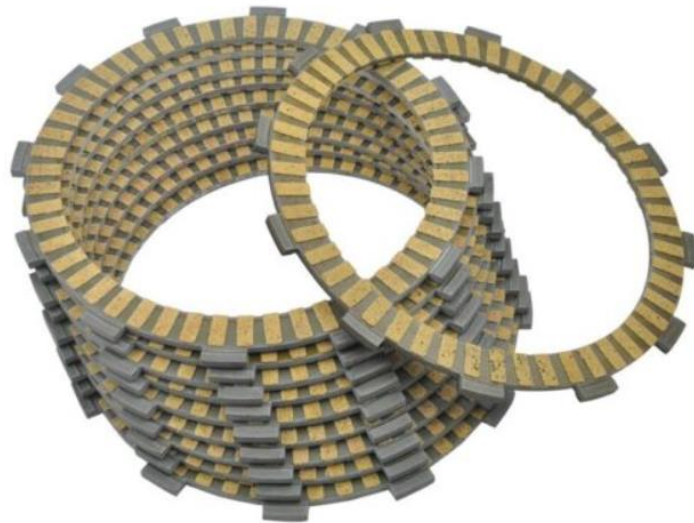
Postoje dvije vrste lamela motociklističke spojke, unutarnje lamelle koje su karakteristične po unutarnjem ozubljenju te vanjske lamelle koje s vanjske strane imaju izdanke. Vanjske lamelle najčešće dolaze u obliku s osam, deset ili dvanaest izdanaka ovisno o veličini spojke motocikla i snazi koju je potrebno prenijeti s motora na stražnji kotač. Unutarnje i vanjske lamelle u kombinaciji tvore tarne parove.

Unutarnje lamele se gotovo uvijek izrađuju od čelika za razliku od vanjskih lamela. Na slici 3.9. prikazane su unutarnje lamele s ozubljenjem za motociklističku spojku. [17]



Slika 3.9. Unutarnje lamele s ozubljenjem [17]

Vanjske lamele izrađuju se od različitih materijala ovisno o razini korištenja spojke, odnosno koristi li se motocikl za osobne potrebe gradske vožnje ili se koristi za profesionalne trkaće utrke MotoGP-a. Za potrebe cestovne vožnje najčešće se primjenjuju čelične lamele s čeličnim oblogama. Također se mogu koristiti razni sinterirani i organski materijali obloga. S obzirom na vrstu materijala ovisi da li spojka radi u prisustvu ulja ili na suho što je prikazano u tablici 2.1. u potpoglavlju 2.1. Za potrebe trkaćih motocikla lamele se izrađuju od umjetnih vlakana, najčešće karbona jer kod njih nije bitna trajnost lamele već da spojka bude što lakša i da je klizanje spojke vremenski kraće. [17, 18] Na slici 3.10. prikazane su vanjske lamele s izdancima.



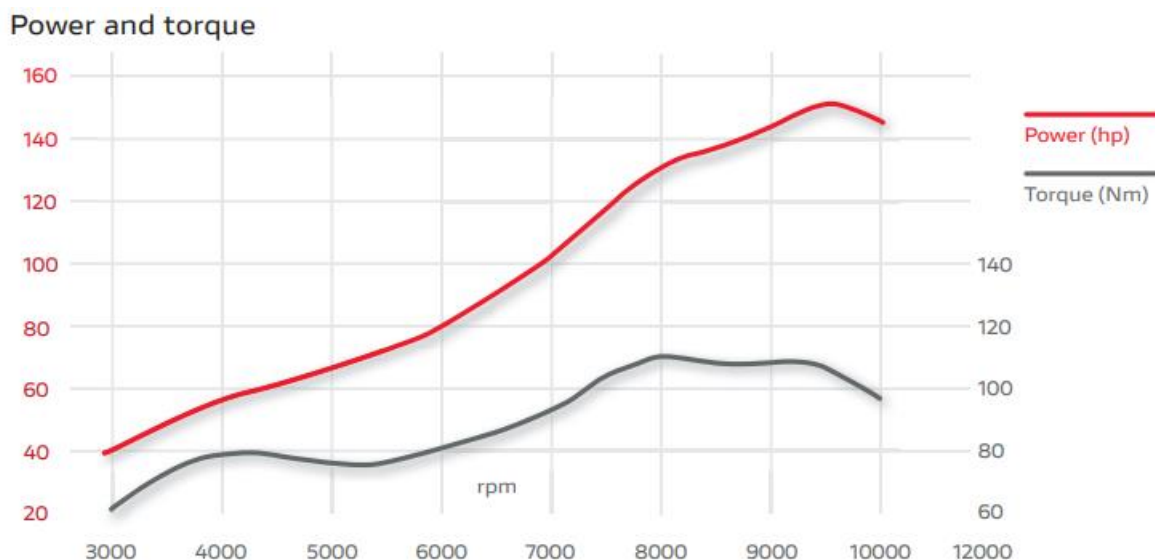
Slika 3.10. Vanjske lamele sa izdancima [19]

U nastavku rada za konstrukciju spojke odabrat će se tarni parovi čelik/sinter bronca zbog prilično dugotrajnijeg vijeka trajanja u odnosu na druge tarne parove te izrazito dobre provodljivosti topline i prijenosa snage s pogonskog motora na pogonjeni zadnji kotač.

4. PRORAČUN MOTOCIKLISTIČKE SPOJKE

4.1. Proračun pri režimu rada maksimalne snage i maksimalnog momenta

Proračun motociklističke spojke vršit će se prema pogonskim parametrima motocikla Ducati Streetfighter V2. Krivulje snage i momenta prikazana je na slici 4.1.



Slika 4.1. Krivulje snage i momenta motocikla Ducati Streetfighter V2 [20]

Potrebno je provjeriti da li se motociklistička spojka proračunava prema režimu maksimalne snage ili režimu maksimalnog okretnog momenta. Iz dijagrama prikazanog na slici 4.1. prema crvenoj krivulji koja označava ovisnost snage o broju okretaja te sivoj krivulji koja označava ovisnost momenta o broju okretaja očitavaju se kritične točke:

Režim rada pri maksimalnoj snazi:

$$n_1 = 10\,750 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$P_1 = 112,3 \text{ [kW]}$$

gdje je:

n_1 broj okretaja pri maksimalnoj snazi [min^{-1}]

P_1 maksimalna snaga [kW].

Režim rada pri maksimalnom okretnom momentu:

$$n_2 = 9000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$P_2 = 107,38 \text{ [kW]}$$

gdje je:

n_2 broj okretaja pri maksimalnom momentu [min^{-1}]

P_2 snaga pri maksimalnom momentu [kW].

4.1.1. Momenti motociklističke spojke

Radni moment pogonskog stroja računa se prema sljedećem izrazu:

$$T_{Ri} = 9550 \cdot \frac{P_i}{n_i} \text{ [Nm]}, i = 1,2 \quad (4.1)$$

gdje je:

T_{Ri} radni moment [Nm], $i = 1,2$

n_i broj okretaja [min^{-1}], $i = 1,2$

P_i snaga [kW], $i = 1,2$.

Radni moment za režim rada pri maksimalnoj snazi, prema jednadžbi (4.1) iznosi:

$$T_{R1} = 9550 \cdot \frac{112,3}{10\,750} = 99,76 \text{ [Nm]}$$

Radni moment za režim rada pri maksimalnom momentu, prema jednadžbi (4.1) iznosi:

$$T_{R2} = 9550 \cdot \frac{107,38}{9000} = 113,94 \text{ [Nm]}$$

Uključni moment koji spojka prenosi prilikom klizanja računa se prema sljedećem izrazu:

$$T_{Ki} = c' \cdot T_{Ri} \text{ [Nm]}, i = 1,2 \quad (4.2)$$

gdje je:

T_{Ki} uključni moment [Nm], $i = 1,2$

c' koeficijent uvećanja uključnog momenta

T_{Ri} radni moment [Nm], $i = 1,2$.

Koeficijent uvećanja uključnog momenta za motorna vozila iznosi $c' = 1,8$.

Uključni moment za režim rada pri maksimalnoj snazi, prema jednadžbi (4.2) iznosi:

$$T_{K1} = 1,8 \cdot 99,76 = 179,57 \text{ [Nm]}$$

Uključni moment za režim rada pri maksimalnom momentu, prema jednadžbi (4.2) iznosi:

$$T_{K2} = 1,8 \cdot 113,94 = 205,09 \text{ [Nm]}$$

Statički moment kojeg spojka prenosi bez proklizavanja između tarnih parova računa se prema sljedećoj jednadžbi, gdje je mjerodavan veći uključni moment $T_{K2} = 205,09 \text{ [Nm]}$:

$$T_S = \frac{\mu_S}{\mu} \cdot T_{K2} \text{ [Nm]} \quad (4.3)$$

gdje je:

- T_S statički moment [Nm]
- μ_S statički koeficijent trenja
- μ koeficijent trenja klizanja
- T_{K2} uključni moment pri maksimalnom momentu [Nm].

Za izbor statičkog i dinamičkog faktora trenja potrebno je prvo utvrditi kakav tarni par će se koristiti u konstrukciji višelamelne motociklističke spojke. Odabrani tarni par bit će čelik/sinter bronca te spojka radi u prisustvu ulja.

Prema tablici 4.1. očitavaju se statički faktor trenja i koeficijent trenja klizanja:

Tablica 4.1. Karakteristike tarnih parova [4]

Tarni par	Bez prisustva ulja			S prisustvom ulja			
	čelik, nitriran/ čelik, nitriran	organska obloga/ sivi lijev	sinter- bronca/ čelik	čelik, kaljen/ čelik, kaljen	sinter- bronca/ čelik	sinter- željezo/ čelik	papir/ čelik
Koeficijent trenja klizanja μ	0,3 do 0,4	0,3 do 0,4	0,15 do 0,30	0,05 do 0,08	0,05 do 0,10	0,07 do 0,10	0,10 do 0,12
Statički koeficijent trenja μ_S	0,4 do 0,6	0,3 do 0,5	0,2 do 0,4	0,08 do 0,12	0,12 do 0,14	0,10 do 0,14	0,08 do 0,10
Omjer μ_S / μ	1,2 do 1,5	1,0 do 1,3	1,25 do 1,6	1,4 do 1,6	1,4 do 2	1,2 do 1,5	0,8 do 1
Dopuštena brzina klizanja u_R [m/s]	25	40	25	20	40	20	30
Dopušteni dodirni pritisak p_R [N/mm ²]	0,5	1	2	0,5	4	4	2
Dopušteni specifični rad trenja kod jednokratnog uključivanja q_{AE} [J/mm ²]	0,5 do 1	2 do 4	1 do 1,5	0,3 do 0,5	1 do 2	0,5 do 1	0,8 do 1,5
dopušteni specifični učin trenja \dot{q}_{A0} [W/mm ²]	1 do 2	3 do 6	1,5 do 2,0	0,4 do 0,8	1,5 do 2,5	0,7 do 1,2	1 do 2
Specifična rashladna struja \dot{V}_A [mm ³ /(mm ² s)]	-	-	-	0,1 do 0,5	0,1 do 2	0,1 do 1	0,1 do 2

Odabrani koeficijent trenja klizanja za tarni par čelik/sinter bronca prema tablici 4.1. iznosi:

$$\mu = 0,08$$

Odabrani statički koeficijent trenja za tarni par čelik/čelik prema tablici 4.1. iznosi:

$$\mu_S = 0,12$$

Statički moment spojke prema jednadžbi (4.3) iznosi:

$$T_S = \frac{0,12}{0,08} \cdot 205,09 = 307,64 \text{ [Nm]}$$

Moment trenja kojeg prenosi jedna tarni ploha računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$T_1 = F_A \cdot \mu \cdot r_m = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot p_{dop} \cdot \mu \cdot \frac{D + d}{4} \cdot Y_1 \text{ [Nm]} \quad (4.4)$$

gdje je:

T_1 moment kojeg prenosi jedna tarni ploha [Nm]

F_A uključna sila [N]

μ	koeficijent trenja klizanja
r_m	polumjer lamele
D	promjer korijena izdanka vanjske lamele
d	unutarnji promjer vanjske lamele
p_{dop}	dopušteni pritisak
Y_1	faktor punoće površine.

Dopušteni pritisak za tarni par čelik/sinter bronca iznosi između 2,5 i 3 N/mm² te je odabran $p_{dop} = 3$ [N/mm²].

Faktor punoće površine lamela za tarni par čelik/sinter bronca iznosi između 0,7 i 0,85 te je odabran $Y_1 = 0,85$.

Odabran je paket lamela od proizvođača NEWFREN pod kodom F1484. Izmjere vanjske lamele su sljedeće:

Promjer korijena izdanka vanjske lamele $d_{fv} = D = 132,5$ [mm]

Unutarnji promjer vanjske lamele $d_{uv} = d = 111,5$ [mm]

Vanjski promjer vanjske lamele $d_{av} = 146,5$ [mm]

Broj izdanka vanjske lamele $z_v = 12$

Debljina vanjske lamele $t_v = 2,8$ [mm]

, dok su izmjere unutarnje lamele sljedeće:

Promjer korijena ozubljenja unutarnje lamele $d_{fu} = 103,5$ [mm]

Promjer glave ozubljenja unutarnje lamele $d_{au} = 96$ [mm]

Vanjski promjer unutarnje lamele $d_u = 132,5$ [mm]

Broj zubi unutarnje lamele $z_u = 34$

Debljina unutarnje lamele $t_u = 2$ [mm]

Izmjere potisne lamele jednake su izmjerama unutarnje lamele osim debljine koja iznosi 3 mm.

Moment trenja kojeg prenosi jedna tarna ploha prema jednadžbi (4.4) iznosi:

$$T_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (132,5^2 - 111,5^2) \cdot 3 \cdot 0,08 \cdot \frac{132,5 + 111,5}{4} \cdot 0,85 = 50\,079 \text{ [Nmm]}$$

$$T_1 = 50,08 \text{ [Nm]}$$

4.1.2. Broj tarnih parova

Broj tarnih parova računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$j \geq \frac{T_S}{T_1} \quad (4.5)$$

gdje je:

j broj tarnih parova

T_S statički moment [Nm]

T_1 moment trenja kojeg prenosi jedna tarna ploha [Nm].

Prema jednadžbi (4.5), broj tarnih parova iznosi:

$$j \geq \frac{T_S}{T_1} \geq \frac{307,64}{50,08} \geq 6,14$$

Usvojeni broj tarnih parova mora uvijek biti paran broj te on iznosi:

$$j = 10$$

Broj lamela spojke mora uvijek biti neparan broj te je za jedan veći od broja tarnih parova, odnosno $i = 11$.

4.1.3. Ostvareni pritisak

Ostvareni pritisak spojke izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$p = \frac{T_S}{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot j \cdot \mu \cdot \frac{D + d}{4} \cdot k_j \cdot Y_1} \leq p_{\text{dop}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.6)$$

gdje je:

p	ostvareni dodirni pritisak [N/mm ²]
T_S	statički moment [Nm]
D	promjer korijena izdanka vanjske lamele [mm]
d	unutarnji promjer vanjske lamele [mm]
j	broj tarnih parova
μ	koeficijent trenja klizanja
k_j	korekcijski faktor spojke
Y_1	faktor punoće površine.

Korekcijski faktor se izračunava prema sljedećoj jednadžbi:

$$k_j = 1 - 0,85 \cdot \mu' - j \cdot (0,03 + 0,65 \cdot \mu') \quad (4.7)$$

gdje je:

μ'	koeficijent trenja kada se uključivanje izvodi pod opterećenjem.
--------	--

Koeficijent trenja kada se uključivanje izvodi pod punim opterećenjem izračunava se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\mu' = \mu \cdot \mu_{\text{ax}} \quad (4.8)$$

gdje je:

μ	koeficijent trenja klizanja
μ_{ax}	aksijalni koeficijent trenja na vodilicama.

Aksijalni koeficijent trenja na vodilicama za rad u ulju iznosi:

$$\mu_{\text{ax}} = 0,05$$

Koeficijent trenja kada se uključivanje izvodi pod punim opterećenjem iznosi prema jednadžbi (4.8):

$$\mu' = 0,08 \cdot 0,05 = 0,004$$

Korekcijski faktor prema jednadžbi (4.7) iznosi:

$$k_j = 1 - 0,85 \cdot 0,004 - 10 \cdot (0,03 + 0,65 \cdot 0,004) = 0,671$$

Ostvareni dodirni pritisak prema jednadžbi (4.6) iznosi:

$$p = \frac{307,64 \cdot 10^3}{\frac{\pi}{4} \cdot (132,5^2 - 111,5^2) \cdot 10 \cdot 0,08 \cdot \frac{132,5 + 111,5}{4} \cdot 0,671 \cdot 0,85} \leq p_{\text{dop}} [\text{N/mm}^2]$$

$$p = 2,75 [\text{N/mm}^2] \leq p_{\text{dop}} = 3 [\text{N/mm}^2]$$

4.1.4. Sila uključivanja

Sila potrebna za uključivanje spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$F_A = \frac{T_{\text{Ki}}}{\frac{D+d}{4} \cdot \mu \cdot j \cdot k_j} [\text{N}] \quad (4.9)$$

gdje je:

F_A	sila uključivanja [N]
T_{Ki}	uključni moment [Nm]
D	promjer korijena izdanka vanjske lamele [mm]
d	unutarnji promjer vanjske lamele [mm]
j	broj tarnih parova
μ	koeficijent trenja klizanja
k_j	korekcijski faktor spojke

Mjerodavan uključni moment za izračun sile uključivanja je veći uključni moment T_{K2} .

Uključna sila prema jednadžbi (4.9) iznosi:

$$F_A = \frac{205,09 \cdot 10^3}{\frac{132,5 + 111,5}{4} \cdot 0,08 \cdot 10 \cdot 0,671} = 6\,263,28 \text{ [N]}$$

4.1.5. Moment inercije zamašnih masa

Kako bi se mogao odrediti moment inercije zamašnih masa potrebno je poznavati dimenzije i mase gume te felge stražnjeg pogonjenog kotača motocikla. Uz dimenzije i masu kotača potrebno je poznavati prijenosni omjer između motora i kotača. Okretni moment se s primarnog pogonskog motora preko lanca prenosi na stražnji pogonjeni kotač te je vrijednost prijenosnog omjera kod motocikla najčešće između 3 i 5. Kod ovog slučaja uzet će se prijenosni omjer $i_p = 3$ te je potrebno moment inercije stražnjeg kotača pomnožiti s prijenosnim omjerom kako bi se dobio ukupni moment inercije zamašnih masa.

Moment inercije zamašnih masa računa se prema sljedećem izrazu:

$$I_R = i_p \cdot m \cdot \frac{(r_1^2 + r_2^2)}{2} \text{ [kgm}^2\text{]} \quad (4.10)$$

Kako bi se odredio moment inercije potrebno je poznavati masu i dimenzije stražnjeg kotača. Odabran je stražnji kotač proizvođača PIRELLI oznake 180/60 ZR17 sa sljedećim podacima [21]:

Masa kotača $m = 6,5 \text{ [kg]}$

Polumjer gume $r_1 = 0,328 \text{ [m]}$

Polumjer felge $r_2 = 0,2159 \text{ [m]}$

Određenim dimenzijama kotača moment inercije prema jednadžbi (4.10) iznosi:

$$I_R = 3 \cdot 6,5 \cdot \frac{(0,328^2 + 0,2159^2)}{2} = 1,50 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

4.1.6. Vrijeme klizanja spojke

Vrijeme klizanja spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$t_{3i} = I_R \cdot \frac{\omega_{0,i}}{T_{Ki} - T_{Ri}} + \frac{t_{1,2}}{2} \cdot \frac{T_{Ki}}{T_{Ki} - T_{Ri}} \text{ [s]}, i = 1,2 \quad (4.11)$$

gdje je:

- t_{3i} vrijeme klizanja [s]
- I_R moment inercije radnog stroja [kgm²]
- $\omega_{0,i}$ sinkronizirana kutna brzina [s⁻¹]
- T_{Ri} radni moment [Nm]
- T_{Ki} uključni moment [Nm]
- $t_{1,2}$ vrijeme u kojem se moment povećava od 0 do T_K

Pretpostavljena vrijednost vremena u kojem se moment povećava od 0 do T_K iznosi 0,1 [s].

Sinkronizirana kutna brzina računa se prema sljedećem izrazu:

$$\omega_{0,i} = \frac{\pi \cdot n_i}{30} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (4.12)$$

Sinkronizirana kutna brzina pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.12) iznosi:

$$\omega_{0,1} = \frac{\pi \cdot 10\,750}{30} = 1\,125,74 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Vrijeme klizanja pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.11) iznosi:

$$t_{3,1} = 1,50 \cdot \frac{1\,125,74}{179,57 - 99,76} + \frac{0,1}{2} \cdot \frac{179,57}{179,57 - 99,76} = 21,27 \text{ [s]}$$

Sinkronizirana kutna brzina pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.12) iznosi:

$$\omega_{0,2} = \frac{\pi \cdot 9000}{30} = 942,48 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Vrijeme klizanja pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.11) iznosi:

$$t_{3,2} = 1,50 \cdot \frac{942,48}{205,09 - 113,94} + \frac{0,1}{2} \cdot \frac{205,09}{205,09 - 113,94} = 15,62 \text{ [s]}$$

4.1.7. Rad trenja kod jednog uključivanja

Rad trenja kod jednog uključivanja spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$W_i = \frac{1}{2} \cdot T_{Ki} \cdot \omega_{0i} \cdot t_{3i} \text{ [J]}, i = 1,2 \quad (4.13)$$

Rad trenja kod jednog uključivanja spojke pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.13) iznosi:

$$W_1 = \frac{1}{2} \cdot 179,57 \cdot 1\,125,74 \cdot 21,27 = 2\,149\,856 \text{ [J]}$$

Rad trenja kod jednog uključivanja spojke pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.13) iznosi:

$$W_2 = \frac{1}{2} \cdot 205,09 \cdot 942,48 \cdot 15,62 = 1\,509\,620,07 \text{ [J]}$$

4.1.8. Rad trenja kod višekratnog uključivanja

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$W_{h,i} = W_i \cdot z_h \text{ [J/h]} \quad (4.14)$$

gdje je:

z_h broj uključivanja spojke po satu

Broj uključivanja spojke uzima se iskustveno te iznosi $z_h = 100 \text{ [h}^{-1}\text{]}$

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.14) iznosi:

$$W_{h,1} = 2\,149\,856 \cdot 100 = 214\,985\,600 \text{ [J/h]}$$

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.14) iznosi:

$$W_{h,2} = 1\,509\,620,07 \cdot 100 = 150\,962\,007 \text{ [J/h]}$$

4.1.9. Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke

Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$P_{T,i} = \frac{W_{h,i}}{3600} \text{ [W]}, i = 1,2 \quad (4.15)$$

Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.15) iznosi:

$$P_{T,1} = \frac{214\,985\,600}{3600} = 59\,718,22 \text{ [W]}$$

Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.16) iznosi:

$$P_{T,2} = \frac{150\,962\,007}{3600} = 41\,933,89 \text{ [W]}$$

4.1.10. Specifično toplinsko opterećenje spojke

Specifično toplinsko opterećenje spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$q_{K,i} = \frac{W_i}{j \cdot A_1} \text{ [J/cm}^2\text{]} \quad (4.17)$$

gdje je:

A_1 kontaktna površina kojom se prenosi okretni moment [cm²]

Kontaktna površina računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot Y_1 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (4.18)$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (13,25^2 - 11,15^2) \cdot 0,85 = 34,21 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Specifično toplinsko opterećenje spojke pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.17) iznosi:

$$q_{K,1} = \frac{2\,149\,856}{10 \cdot 34,21} = 6\,284,3 \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

Specifično toplinsko opterećenje spojke pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.17) iznosi:

$$q_{K2} = \frac{1\,509\,620,07}{10 \cdot 34,21} = 4\,412,8 \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

4.1.11. Specifična toplinska snaga spojke

Specifična toplinska snaga spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$q_{K,i}^* = \frac{q_{K,i}}{t_c} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (4.19)$$

gdje je:

t_c vrijeme ciklusa rada spojke [s]

Vrijeme ciklusa rada spojke računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\begin{aligned}t_c &= \frac{3600}{z_h} \text{ [s]} \\t_c &= \frac{3600}{100} = 36 \text{ [s]}\end{aligned}\tag{4.20}$$

Specifična toplinska snaga pri maksimalnoj snazi prema jednadžbi (4.19) iznosi:

$$q_{K,1}^* = \frac{6\,284,3}{36} = 174,56 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Specifična toplinska snaga pri maksimalnom momentu prema jednadžbi (4.19) iznosi:

$$q_{K,2}^* = \frac{4\,412,8}{36} = 122,58 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Kako dopušteno toplinsko naprezanje iznosi:

$$q_{\text{dop}}^* = 0,5 \text{ [W/cm}^2\text{)],}$$

vidljivo je da se motociklistička spojka ne dimenzionira prema režimima maksimalne snage i maksimalnog momenta. Potrebno je provjeriti dimenzionira li se spojka prema režimima rada pri promjeni brzina i pokretanju vozila s mjesta.

4.2. Proračun prilikom faze pokretanja

Potrebno je u dijagramu na slici 4.1. očitati broj okretaja i moment kojeg spojka prenosi prilikom pokretanja vozila sa mjesta. Očitane su sljedeće vrijednosti:

$$\text{Broj okretaja prilikom pokretanja vozila } n_p = 4000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$\text{Moment okretaja prilikom pokretanja vozila } T_p = 80 \text{ [Nm]}$$

Sinkronizirana kutna brzina se računa prema jednadžbi (4.12) te iznosi:

$$\omega_{0,p} = \frac{\pi \cdot 4000}{30} = 418,88 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Vrijeme klizanja spojke pri fazi pokretanja vozila računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$t_{3,p} = I_p \cdot \frac{\omega_{0,p}}{T_p} + \frac{t_{1,2}}{2} \text{ [s]} \quad (4.21)$$

gdje je:

$$I_p \quad \text{moment inercije prilikom pokretanja vozila [kgm}^2\text{]}$$

Kod pokretanja vozila moment inercije je iznosom puno manji u odnosu na moment inercije tijekom rada vozila te je usvojena vrijednost:

$$I_p = 0,01 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

Vrijeme klizanja spojke prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.21) iznosi:

$$t_{3p} = 0,01 \cdot \frac{418,88}{80} + \frac{0,1}{2} = 0,10 \text{ [s]}$$

Rad trenja kod jednog uključivanja spojke prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.13) iznosi:

$$W_p = \frac{1}{2} \cdot 80 \cdot 418,88 \cdot 0,10 = 1\,675,52 \text{ [J]}$$

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke prilikom pokretanja vozila računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$W_{h,p} = W_p \cdot z_{h,p} \text{ [J/h]} \quad (4.22)$$

gdje je:

$$z_{h,p} \quad \text{broj uključivanja spojke pri fazi pokretanja vozila}$$

Procijenjeni broj uključivanja spojke prilikom pokretanja vozila iznosi:

$$z_{h,p} = 15 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke pri pokretanju vozila prema jednadžbi (4.21) iznosi:

$$W_{h,p} = 1\,675,52 \cdot 15 = 25\,132,8 \text{ [J/h]}$$

Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.15) iznosi:

$$P_{T,p} = \frac{25\,132,8}{3600} = 6,98 \text{ [W]}$$

Specifično toplinsko opterećenje spojke prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.17) iznosi:

$$q_p = \frac{1\,675,52}{10 \cdot 34,21} = 4,9 \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

Specifična toplinska snaga pri pokretanju vozila s mjesta se računa prema sljedećem izrazu:

$$q_p^* = \frac{q_p}{t_{c,p}} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (4.23)$$

gdje je:

$t_{c,p}$ vrijeme rada spojke prilikom pokretanja vozila

Vrijeme rada spojke prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.20) iznosi:

$$t_{c,p} = \frac{3600}{15} = 240 \text{ [s]}$$

Specifična toplinska snaga pri pokretanju vozila s mjesta prema izrazu (4.23) iznosi:

$$q_p^* = \frac{4,9}{240} = 0,02 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Kako je $q_{dop}^* = 0,5 \text{ [W/cm}^2\text{]}$, vidljivo je da je dobivena specifična toplinska snaga pri pokretanju vozila s mjesta puno manja od dopuštene tako da je uvjet zadovoljen.

4.2.1. Prirast temperatura lamela

Potrebno je provjeriti maksimalni prirast temperature tarnih površina prema sljedećem izrazu:

$$\Delta\vartheta_{\max} = \Delta\vartheta_m \cdot \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{t_{a,p}}{T_a} + \frac{t_{b,p}}{T_b}\right)}} \quad [\text{K}] \quad (4.24)$$

gdje je:

$\Delta\vartheta_{\max}$	maksimalni prirast temperature tarnih površina [K]
$\Delta\vartheta_m$	prirast temperature lamele [K]
$t_{a,p}$	vrijeme hlađenja uključene spojke prilikom pokretanja vozila [s]
$t_{b,p}$	vrijeme hlađenja isključene spojke prilikom pokretanja vozila [s]
T_a	vrijeme hlađenja uključene spojke [s]
T_b	vrijeme hlađenja isključene spojke [s]

Vrijeme hlađenja uključene spojke prilikom pokretanja vozila se računa prema sljedećoj jednadžbi te iznosi:

$$t_{a,p} \approx t_{b,p} = \frac{t_{c,p} - t_{3,p}}{2} = \frac{240 - 0,10}{2} = 119,95 \quad [\text{s}] \quad (4.25)$$

Vrijeme hlađenja uključene i isključene spojke prilikom pokretanja je približno iste vrijednosti.

Prirast temperature unutarnje i potisne lamele prilikom pokretanja vozila računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Delta\vartheta_{m,pi} = \frac{q_p}{c_{\xi} \cdot \rho_{\xi} \cdot t_i} \quad [\text{K}] \quad (4.26)$$

gdje je:

c_{ξ}	specifični toplinski kapacitet čelika [J/kgK]
ρ_{ξ}	gustoća čelika
t_i	debljina lamele

Gustoća čelika i specifični toplinski kapacitet čelika mogu se očitati iz tablice 4.2. te vrijednosti iznose:

$$c_{\xi} = 465 \quad [\text{J/kgK}]$$

$$\rho_{\text{č}} = 7\,850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Tablica 4.2. Toplinska svojstva pojedinih materijala [4]

	Čelik	Sivi lijev	Sinter bronca ¹⁾	Sinter željezo ¹⁾	Organska obloga ²⁾	
ρ kg/m ³	7 850	7 250	≈6 000	5 400	1 280	
c J/(kgK)	465	540	465	420	1 560	
λ W/(mK)	53	58	≈30	24	≈0,34	
a m ² /s	$14,5 \cdot 10^{-6}$	$14,8 \cdot 10^{-6}$	$10,8 \cdot 10^{-6}$	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	
s_{gran} mm	$t_3 = 0,5 \text{ s}$	2,5	2,2	0,27		
	1 s	3,6	3,1	0,39		
	2 s	5,0	4,4	0,55		
β'_{AE} JW/mm ⁴	$\mathcal{G}_{\text{dop}} - \mathcal{G}_0$ 50°C	0,43	0,5	0,19	0,12	0
	65°C	0,72	0,85	0,31	0,20	0
	85°C	1,2	1,4	0,53	0,35	0
	100°C	1,7	2,0	0,74	0,48	0
	160°C	4,4	5,1	1,9	1,2	0
	250°C	10,6	8,8	4,6	3,0	0

Prirast temperature unutarnje lamele prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.26) iznosi:

$$\Delta\vartheta_{\text{mp,u}} = \frac{4,9}{465 \cdot 7\,850 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{10}} = 6,71 \text{ [K]}$$

Prirast temperature potisne lamele prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.26) iznosi:

$$\Delta\vartheta_{\text{mp,p}} = \frac{4,9}{465 \cdot 7\,850 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3}{10}} = 4,47 \text{ [K]}$$

Prirast temperature vanjske lamele prilikom pokretanja vozila se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$\Delta\vartheta_{mp,v} = \frac{q_p}{c_{\check{c}} \cdot (\rho_{\check{c}} \cdot t_{v,a} + 2 \cdot \rho_{s,b} \cdot s')} \text{ [K]} \quad (4.26)$$

gdje je:

$t_{v,a}$ debljina vanjske lamele bez obloge [mm]

$\rho_{s,b}$ gustoća sinter bronce [kg/m³]

s' debljina obloge [mm]

Gustoća sinter bronce očitava se iz tablice 4.2. te iznosi:

$$\rho_b = 6000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Debljina vanjske lamele bez obloge iznosi $t_{va} = 2$ [mm], a debljina obloge iznosi $s' = 0,4$ [mm].

Prirast temperature vanjske lamele prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.26) iznosi:

$$\Delta\vartheta_{mp,v} = \frac{4,9}{465 \cdot \left(7850 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{10} + 2 \cdot 6000 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,4}{10}\right)} = 5,14 \text{ [K]}$$

Vrijeme hlađenja uključene spojke izračunava se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$T_a = \frac{c_{\check{c}} \cdot \rho_{\check{c}} \cdot t_u}{2 \cdot \alpha_a} \text{ [s]} \quad (4.27)$$

gdje je:

α_a koeficijent prijelaza topline za tarni par čelik/sinter bronca kad je spojka uključena [W/m²K]

Koeficijent prijelaza topline za tarni par čelik/sinter bronca kod dobrog hlađenja kada je spojka uključena iznosi:

$$\alpha_a = 350 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Vrijeme hlađenja uključene spojke prema jednadžbi (4.27) iznosi:

$$T_a = \frac{465 \cdot 7850 \cdot 2}{2 \cdot 350 \cdot 1000} = 10,43 \text{ [s]}$$

Vrijeme hlađenja isključene spojke izračunava se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$T_b = \frac{c_{\check{c}} \cdot \rho_{\check{c}} \cdot t_u}{2 \cdot \alpha_b} \text{ [s]} \quad (4.28)$$

gdje je:

α_b koeficijent prijelaza topline za tarni par čelik/sinter bronca kad je spojka isključena [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Koeficijent prijelaza topline za tarni par čelik/sinter bronca kod dobrog hlađenja kada je spojka isključena iznosi:

$$\alpha_b = 650 \text{ [W}/\text{m}^2\text{K]}$$

Vrijeme hlađenja isključene spojke prema jednadžbi (4.28) iznosi:

$$T_a = \frac{465 \cdot 7850 \cdot 2}{2 \cdot 650 \cdot 1000} = 5,62 \text{ [s]}$$

Maksimalni prirast temperature tarnih parova prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.24) iznosi:

$$\Delta\vartheta_{\max,p} = \Delta\vartheta_{m,u} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{t_{a,p}}{T_a} + \frac{t_{b,p}}{T_b}\right)}} \text{ [K]}$$

$$\Delta\vartheta_{\max,p} = 6,71 \cdot \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{119,95}{10,43} + \frac{119,95}{5,62}\right)}} = 6,71 \text{ [K]}$$

Potrebno je izvršiti provjeru maksimalne temperature tarnih površina koja se računa prema sljedećem izrazu:

$$\vartheta_{\max,p} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{\max,p} \text{ [}^\circ\text{C]} \leq \vartheta_{\text{dop}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.29)$$

gdje je:

ϑ_0 temperatura okoline [$^\circ\text{C}$]

ϑ_{dop} dopuštena temperatura tarnih površina za hlađenje uljem [$^\circ\text{C}$]

Temperatura okoline iznosi $\vartheta_0 = 20$ [°C], dok je dopuštena temperatura tarnih površina kod hlađenja s uljem jednaka $\vartheta_{\text{dop}} = 120$ [°C].

Prema jednadžbi (4.29), maksimalna temperatura tarnih površina prilikom pokretanja vozila iznosi:

$$\vartheta_{\text{max,p}} = 20 + 6,71 = 26,71 \text{ [°C]} \leq \vartheta_{\text{dop}} = 120 \text{ [°C]}$$

4.3. Proračun prilikom faze mijenjanja brzina

Promjenom brzine tokom vožnje dešava se inverzija toka snage motora. Stoga je inercija zamašnih masa puno manja u odnosu na ukupnu, dok se moment prilikom promjene brzine, zbog otpora pumpanja motora može procijeniti na oko 10 posto od ukupno najvećeg okretnog momenta.

$$\text{Broj okretaja prilikom mijenjanja brzina } n_m = 6\,000 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$\text{Moment okretaja prilikom mijenjanja brzina } T_m = 31 \text{ [Nm]}$$

$$\text{Moment zamašnih masa pri promjeni brzine } I_m = 0,0075 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

Sinkronizirana kutna brzina se računa prema jednadžbi (4.12) te iznosi:

$$\omega_{0,m} = \frac{\pi \cdot 6000}{30} = 628,32 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

Vrijeme klizanja spojke pri fazi mijenjanja brzine računa se prema jednadžbi (4.21) te iznosi:

$$t_{3,m} = I_m \cdot \frac{\omega_{0,m}}{T_m} + \frac{t_{1,2}}{2} \text{ [s]}$$
$$t_{3,m} = 0,075 \cdot \frac{628,32}{31} + \frac{0,1}{2} = 0,20 \text{ [s]}$$

Rad trenja kod jednog uključivanja spojke prilikom mijenjanja brzina prema jednadžbi (4.13) iznosi:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot 31 \cdot 628,32 \cdot 0,20 = 1\,947,8 \text{ [J]}$$

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke prilikom mijenjanja brzina računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$W_{h,m} = W_m \cdot z_{h,m} \text{ [J/h]} \quad (4.30)$$

gdje je:

$z_{h,m}$ broj uključivanja spojke pri fazi mijenjanja brzina

Procijenjeni broj uključivanja spojke prilikom mijenjanja brzina iznosi:

$$z_{h,m} = 100 \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

Rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke pri mijenjanju brzina prema jednadžbi (4.30) iznosi:

$$W_{h,m} = 1\,947,8 \cdot 100 = 194\,780 \text{ [J/h]}$$

Snaga koja se troši na ugrijavanje spojke prilikom mijenjanja brzina prema jednadžbi (4.15) iznosi:

$$P_{T,m} = \frac{194\,780}{3600} = 54,11 \text{ [W]}$$

Specifično toplinsko opterećenje spojke prilikom mijenjanja brzina prema jednadžbi (4.17) iznosi:

$$q_m = \frac{1\,947,8}{10 \cdot 34,21} = 5,69 \text{ [J/cm}^2\text{]}$$

Specifična toplinska snaga pri mijenjanju brzina se računa prema sljedećem izrazu:

$$q_m^* = \frac{q_m}{t_{c,m}} \text{ [W/cm}^2\text{]} \quad (4.31)$$

gdje je:

$t_{c,m}$ vrijeme rada spojke prilikom mijenjanja brzina

Vrijeme rada spojke prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.20) iznosi:

$$t_{c,m} = \frac{3600}{z_{h,m}} = \frac{3600}{100} = 36 \text{ [s]}$$

Specifična toplinska snaga pri pokretanju vozila s mjesta prema izrazu (4.31) iznosi:

$$q_m^* = \frac{5,69}{36} = 0,16 \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

Kako je $q_{dop}^* = 0,5 \text{ [W/cm}^2\text{]}$, vidljivo je da je dobivena specifična toplinska snaga pri promijeni brzina puno manja od dopuštene tako da je uvjet zadovoljen.

4.3.1. Prirast temperatura lamela

Vrijeme hlađenja uključene spojke prilikom promijene brzine se računa prema sljedećoj jednadžbi te iznosi:

$$t_{a,m} \approx t_{b,m} = \frac{t_{c,m} - t_{3,m}}{2} = \frac{36 - 0,2}{2} = 17,9 \text{ [s]} \quad (4.32)$$

Vrijeme hlađenja uključene i isključene spojke prilikom pokretanja je približno iste vrijednosti.

Prirast temperature unutarnje lamele prilikom promijene brzine računa se prema jednadžbi (4.26) te iznosi:

$$\Delta\vartheta_{mm,u} = \frac{q_m}{c_{\check{c}} \cdot \rho_{\check{c}} \cdot t_u} = \frac{5,69}{465 \cdot 7850 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{10}} = 7,79 \text{ [K]}$$

Prirast temperature potisne lamele prilikom promijene brzine računa se prema jednadžbi (4.26) te iznosi:

$$\Delta\vartheta_{\text{mm,p}} = \frac{q_m}{c_{\check{c}} \cdot \rho_{\check{c}} \cdot t_p} = \frac{5,69}{465 \cdot 7850 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3}{10}} = 5,2 \text{ [K]}$$

Prirast temperature vanjske lamele prilikom promijene brzine prema jednadžbi (4.26) iznosi:

$$\Delta\vartheta_{\text{mm,v}} = \frac{q_m}{c_{\check{c}} \cdot (\rho_{\check{c}} \cdot t_{\text{va}} + 2 \cdot \rho_b \cdot s')} \text{ [K]}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{mm,v}} = \frac{5,69}{465 \cdot \left(7850 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{2}{10} + 2 \cdot 6000 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,4}{10}\right)} = 5,97 \text{ [K]}$$

Maksimalni prirast temperature tarnih parova prilikom promijene brzine prema jednadžbi (4.24) iznosi:

$$\Delta\vartheta_{\text{max,m}} = \Delta\vartheta_{\text{mu}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{t_{\text{am}}}{T_a} + \frac{t_{\text{bm}}}{T_b}\right)}} \text{ [K]}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{max,m}} = 7,79 \cdot \frac{1}{1 - e^{-\left(\frac{17,9}{10,43} + \frac{17,9}{5,62}\right)}} = 7,79 \text{ [K]}$$

Prema jednadžbi (4.29), maksimalna temperatura tarnih površina prilikom promijene brzine iznosi:

$$\vartheta_{\text{max,m}} = 20 + 7,79 = 27,79 \text{ [}^\circ\text{C]} \leq \vartheta_{\text{dop}} = 120 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

4.4. Odabir ulja za hlađenje

Protok ulja za hlađenje lamela računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$V = v^* \cdot j \cdot A_1 \text{ [cm}^3\text{/min]} \quad (4.33)$$

gdje je:

v^* specifični protok ulja kod dobrog hlađenja [cm/min]

Specifični protok ulja iznosi $v^* = 6$ [cm/min]

Potreban protok ulja prema jednadžbi (4.33) iznosi:

$$V = 6 \cdot 16 \cdot 34,21 = 3\,284,16 \text{ [cm}^3\text{/min]}$$

Prema srednjoj obodnoj brzini će se odrediti viskozitet ulja, koja se računa prema sljedećoj jednadžbi:

$$v_m = \frac{d_m \cdot \pi \cdot n_i}{60} \text{ [m/s]} \quad (4.34)$$

gdje je:

d_m srednji promjer lamela [mm]

Srednji promjer lamela računa se prema sljedećem izrazu:

$$d_m = \frac{D + d}{2} = \frac{132,5 + 111,5}{2} = 122 \text{ [mm]} \quad (4.35)$$

Srednja obodna brzina prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.34) iznosi:

$$v_{m,p} = \frac{\frac{122}{1000} \cdot \pi \cdot 4000}{60} = 25,55 \text{ [m/s]}$$

Srednja obodna brzina prilikom promijene brzine prema jednadžbi (4.34) iznosi:

$$v_{m,m} = \frac{\frac{122}{1000} \cdot \pi \cdot 6000}{60} = 38,33 \text{ [m/s]}$$

Ako je srednja obodna brzina manja od 12 [m/s] potrebno je izabrati viskozitet ulja ISO VG 46 ili gušći, a ako je srednja obodna brzina veća od 12 [m/s] onda se odabire viskozitet ulja ISO VG 32

ili rjeđi. Kako je gore srednja obodna brzina za zadane režime rada došla veća od 12 [m/s] odabire se viskozitet ulja ISO VG 22.

4.5. Trajnost tarnih ploha

Trajnost tarnih ploha usklađuje se s volumenom obloge koji se smije istrošiti do te mjere da spojka i dalje obavlja svoju funkciju. Trajnost tarnih ploha se računa prema sljedećem izrazu:

$$L_h = \frac{V_O}{f \cdot P_T} \text{ [h]} \quad (4.36)$$

gdje je:

- V_O volumen obloge koji se smije istrošiti [mm³]
 f faktor istrošenja [mm³/kWh]

Volumen obloge koji se smije istrošiti računa se prema sljedećem izrazu:

$$V_O = A_1 \cdot j \cdot Y_1 \cdot \Delta s \text{ [mm}^3\text{]} \quad (4.37)$$

gdje je:

- Δs maksimalna dopuštena debljina potrošene obloge [mm]

Maksimalna dopuštena debljina potrošene obloge računa se prema sljedećem izrazu:

$$\Delta s = \frac{2}{3} \cdot s' = \frac{2}{3} \cdot 0,4 = 0,27 \text{ [mm]} \quad (4.38)$$

Volumen obloge koji se smije istrošiti prema jednadžbi (4.37) iznosi:

$$V_O = 34,21 \cdot 10^2 \cdot 16 \cdot 0,85 \cdot 0,27 = 12\,561,91 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Faktor istrošenja se može uzeti između 0,35 i 1,5 te je odabran $f = 1,5$ [mm³/kWh].

Trajnost tarnih ploha prilikom pokretanja vozila prema jednadžbi (4.36) iznosi:

$$L_{h,p} = \frac{12\,561,91}{1,5 \cdot 6,98 \cdot 10^{-3}} = 1\,199\,800,38 \text{ [h]}$$

Trajnost tarnih ploha prilikom promijene brzine prema jednadžbi (4.36) iznosi:

$$L_{h,m} = \frac{12\,561,91}{1,5 \cdot 90,76 \cdot 10^{-3}} = 92\,272 \text{ [h]}$$

I kod jednog i kod drugog režima rada trajnost tarnih ploha je veća od 1500 [h] te je uvjet zadovoljen.

Broj uključivanja spojke do istrošenja prilikom pokretanja vozila prema sljedećem izrazu iznosi:

$$N_p = L_{h,p} \cdot z_{h,p} = 1\,199\,800,38 \cdot 15 = 17\,997\,006 \quad (4.39)$$

Broj uključivanja spojke do istrošenja prilikom promjene brzine prema sljedećem izrazu iznosi:

$$N_m = L_{h,m} \cdot z_{h,m} = 92\,272 \cdot 100 = 9\,227\,200 \quad (4.40)$$

4.6. Proračun vratila

Promjer vratila računa se prema sljedećem izrazu:

$$\tau_t = \frac{T_i}{W_p} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \leq \tau_{tdop} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$d_v \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T_i}{\pi \cdot \tau_{tdop}}} \text{ [mm]} \quad (4.41)$$

gdje je:

τ_t tangencijalno naprezanje [N/mm^2]

τ_{tdop} dopušteno tangencijalno naprezanje [N/mm^2]

Iz tablice 4.3. odabran je materijal vratila 42CrMo4 sa dinamičkom čvrstoćom koja iznosi $R_{d0N} = 560 \text{ [N}/\text{mm}^2]$.

Tablica 4.3. Karakteristike materijala [22]

Namjena	OZNAKA ČELIKA				Karakteristike materijala pri statičkom opterećenju N/mm ² (min.)				Dinamička čvrstoća N/mm ²					
					Vlačna čvrstoća	Granica plastičnosti (tečenja)			Vlak - tlak		Savijanje		Torzija	
	ISO	DIN	HRN	W. Nr.		R _m	R _{0.2} R _{p0.2}	R _{0.01}	R _{0.05}	R _{0.1N}	R _{0.2N}	R _{0.5N}	R _{1N}	R _{2N}
Konstr. čelik, toplo valjan, DIN EN 10025	S235JR	St 37-2	Č1370	1.0037	360	235	280	160	140	225	180	270	105	160
	S275JR	St 44-2	Č1451	1.0044	430	275	330	190	170	270	215	320	125	190
	S355JR	St 52-2	Č1661	1.0045	510	355	425	245	205	325	255	380	150	245
	E295	St 50-2	Č1545	1.0050	490	295	355	205	195	295	245	355	145	205
	E335	St 60-2	Č1645	1.0060	590	335	400	230	235	335	290	400	180	230
	E360	St 70-2	Č1745	1.0070	690	360	430	250	275	360	345	430	205	250
	S275N	StE 285	~RO280	1.0490	370	275	330	190	150	240	185	275	110	185
	S355N	StE 355	~RO355	1.0545	470	355	425	245	190	305	235	350	140	240
	S420N	StE 420	~RO420	1.8902	520	420	505	290	210	335	260	390	155	265
	S460N	StE 460	~RO460	1.8901	550	460	550	320	220	350	275	410	165	280
Čelik za poboljšanje, u pob. stanju (+QT), DIN EN 10083-1	C22E	Čk 22	Č1331	1.1151	500	340	410	235	200	320	250	375	150	235
	C35E	Čk 35	Č1431	1.1181	630	430	515	300	250	400	315	470	190	300
	C45E	Čk 45	Č1531	1.1191	760	490	590	340	280	450	350	525	210	340
	C60E	Čk 60	Č1731	1.1221	850	580	695	400	340	545	425	635	250	400
	34Cr4	41Cr4	Č1130	1.7033	900	700	840	485	360	575	450	675	270	460
	41Cr4	41Cr4	Č1131	1.7035	1000	800	960	550	400	640	500	750	300	510
	25CrMo4	25CrMo4	Č1730	1.7218	900	700	840	485	360	575	450	675	270	460
	34CrMo4	34CrMo4	Č1731	1.7220	1000	800	960	555	400	640	500	750	300	510
	42CrMo4	42CrMo4	Č1732	1.7225	1100	900	1080	625	440	705	550	825	330	560
	30CrNiMo8	30CrNiMo8	Č5432	1.6580	1250	1050	1260	720	500	800	625	935	375	635
51CrV4	51CrV4	-	1.8159	1100	900	1080	625	440	705	550	825	330	560	
Čelik za cem. DIN EN 10084	C10	C10	Č1120	1.0301	650	380	455	265	260	330	325	455	195	265
	C15	C15	Č1220	1.0401	750	430	515	300	300	430	375	515	225	300
	17Cr3	17Cr3	Č1120	1.7016	1050	730	900	520	420	670	525	785	315	520
	16MnCr5	16MnCr5	Č4320	1.7131	900	630	755	435	360	575	450	675	270	435
	15CrNi6	15CrNi6	Č5420	1.5919	1000	680	815	470	400	640	500	750	300	470

Dopušteno naprezanje izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$\tau_{tdop} = \frac{R_{dt0N}}{S} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4.42)$$

gdje je:

S faktor sigurnosti koji je u ovom slučaju jednak 10

Dopušteno naprezanje prema jednadžbi (4.42) iznosi:

$$\tau_{tdop} = \frac{560}{10} = 56 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Promjer vratila prema jednadžbi (4.41), gdje se kao mjerodavni moment uzima veći uključni moment umjesto statičkog zbog većeg faktora sigurnosti, iznosi:

$$d_v \geq \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 205,09 \cdot 10^3}{\pi \cdot 56}} \geq 26,52 \text{ [mm]}$$

Usvojeni promjer vratila iznosi $d_v = 27 \text{ [mm]}$

5. ZAKLJUČAK

Motociklistička spojka je ključna mehanička komponenta svakog motocikla koja omogućuje učinkovit prijenos snage između motora s unutarnjim izgaranjem i prijenosnog sustava. Za razliku od automobila, gotovo uvijek dolazi u izvedbi s više lamela. Razlog izvedbe s više lamela je u tome da motocikl ima manje gabarite, odnosno mjesta u svojoj konstrukciji za sve mehaničke komponente te da bi se prenijela povećana snaga osmišljena je višelamelna spojka koja se sastoji od više lamela manjih dimenzija koje preko svojih tarnih ploha prenose snagu, tj. okretni moment. Pouzdanost i funkcionalnost motociklističke spojke neophodni su faktori za pokretanje vozila, upravljanje njegovom snagom te glatko mijenjanje brzina.

Lamele motocikla su izrađene od različitih materijala te se odabiru ovisno o upotrebi motocikla, koristi li se za potrebe vožnje ili za utrke. Najčešće korišteni materijali za izradu lamela su čelik, organski materijali, bakar, karbon te su u novije vrijeme na scenu stupile aluminijske lamele koje zbog svoje manje mase u odnosu na ostale materijale omogućuje još brži i glađi prijenos snage te se za sada najviše koriste kod profesionalnih motociklističkih utrka gdje svaki gram ukupne mase ima odlučujuću ulogu. Postoje dvije vrste motociklističkih spojki, one koje rade u prisustvu ulja te one koje rade na suho. Kod izvedbe koja radi u prisustvu ulja potrebno je pripaziti da ulje ne iscure van mjesta gdje je spojka ugrađena.

Proračunom je dokazano da se motociklistička spojka ne dimenzionira prema najvećoj snazi ili najvećem momentu već se dimenzionira i konstruira prema načinu pokretanja vozila i tijekom promjene brzine, jer bi se kod prvobitne situacije prilikom takvog opterećenja pojavila velika mogućnost pregaranja spojke. Kod proračuna je potrebno pripaziti na broj lamela jer ako bi se lamelni paket sastojao od previše lamela određeni broj lamela uopće ne bi prenosio moment zbog izostanka aksijalne sile uzrokovanog otporima klizanja u lamelnom paketu. U ovom radu za tarni materijal korištena je kombinacija čelika i sinter bronce te se može primijetiti da je potrebno jedanaest lamela kako bi se prenijela podosta veća količina snage i okretnog momenta odabranog na početku samog proračuna.

LITERATURA

- [1] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Jecić, S., i dr.: „Motocikl“, s Interneta, <https://tehnika.lzmk.hr/motocikl/>, 14. travnja 2023.
- [2] Abdullah, W. O.: „How does a Motorcycle Manual Clutch Work“, s Interneta, <https://www.bikesrepublic.com/featured/motorcycle-manual-clutch-work/>, 14. travnja 2023.
- [3] Vrcan, Ž.: „Spojke“, podloge uz predavanja, Tehnički fakultet Rijeka, 2022.
- [4] Obsieger, B.: „SPOJKE“, Rijeka: Tehnički fakultet Rijeka, Vukovarska 58, Rijeka, 2016.
- [5] S Interneta, <https://www.sportsbike.com.au/buying/buying-guides/about-motorcycle-clutches/>, 14. travnja 2023.
- [6] Grosse, P.: „Die Kupplung“, s Interneta, <https://docplayer.org/50774011-Aufgaben-der-kupplung.html>, 16. travnja 2023.
- [7] S Interneta, <https://powersportsguide.com/motorcycle-clutch/>, 17. travnja 2023.
- [8] Michael: „Technik: Kupplung“, s Interneta, https://www.gs-classic.de/technik/tech_kuppl01.htm, 19. travnja 2023.
- [9] Henning, A.: „Cable vs. Hydraulic Clutch – What's the Difference?“, s Interneta, <https://www.motorcyclistonline.com/cable-vs-hydraulic-clutch-whats-difference/>, 20. travnja 2023.
- [10] S Interneta, https://www.amazon.com/Motorcycle-Control-Clutch-Compatible-1WS-26335-00/dp/B09ZRXH36N/ref=sr_1_1_sspa?crid=EY30KOLU3EOK&keywords=clutch+cable+motorcycle+yamaha&qid=1680292134&sprefix=clutch+cable+motorcycle+yamaha%2Caps%2C253&sr=8-1-spons&psc=1&spLa=ZW5jcnlwdGVkUXVhbGlmaWVyPUFVUjdaSzU4SjRWRDEmZW5jcnlwdGVkSWQ9QTA3NzMzQzVUVKS1ZERzdaOEdTJmVuY3J5cHRlZEFkSWQ9QTA1OTY1NDkxWDBUTThHWjEwQkxWJndpZGldE5hbWU9c3BfYXRmJmFjdGlvb11jbGlja1JlZGlYZWNOJmRvTm90TG9nQ2xpY2s9dHJ1ZQ==, 20. travnja 2023.
- [11] S Interneta, <https://adbmag.com.au/editorial/hydraulic-clutch-everything-you-need-to-know/>, 20. travnja 2023.

- [12] S Interneta, <https://www.amazon.com/GOOFIT-Motorcycle-Hydraulic-Cylinder-Motocross/dp/B01M5CCKS4?th=1>, 20. travnja 2023.
- [13] S Interneta, <https://www.partzilla.com/blog/wet-clutch-vs-dry-clutch>, 22. travnja 2023.
- [14] S Interneta, <https://www.motorcyclistonline.com/mc-garage-video-wet-clutch-vs-dry-clutch/>, 22. travnja 2023.
- [15] S Interneta, <https://www.c-magazine.com/features/extra-time/motorcycle-clutches-dry-vs-wet>, 22. travnja 2023.
- [16] S Interneta, <https://genxrider.com/how-does-a-motorcycle-slipper-clutch-work/>, 22. travnja 2023.
- [17] S Interneta, <https://www.trwaftermarket.com/en/motorcycle/moto-clutch-systems/steel-o-rings/>, 23. travnja 2023.
- [18] NEWFREN, s Interneta, <https://www.newfren.com/en/Products/Clutches.html>, 24. travnja 2023.
- [19] S Interneta, <https://www.ebay.com/itm/254614089542>, 24. travnja 2023.
- [20] DUCATI, s Interneta, https://assets.ctfassets.net/x7j9qwpvr5s/1TQk4bEZ1mVnIpYIIQryZF/46f3b3385e366733b355cb88eae150fb/Streetfighter_V2_MY_2023_Brochure_ENG.pdf, 25. travnja 2023.
- [21] PIRELLI, s Interneta, https://www.motorrad-testbericht.at/magazin/pirelli/pirelli_diablo_test2013/pirelli_road_race_reifendrucktabelle.pdf, 25. travnja 2023.
- [22] Križan, B.; Franulović, M.; Zelenika, S.: „Konstrukcijski elementi – Zbirka zadataka: Osnove, elementi za spajanje, osovine i vratila“, Rijeka: Tehnički fakultet sveučilišta u Rijeci, Vukovarska 58, Rijeka 2012.

POPIS OZNAKA I KRATICA

OZNAKA	MJERNA JEDINICA	OPIS
c'	-	koeficijent uvećanja uključnog momenta
c_{ξ}	J/kgK	specifični toplinski kapacitet čelika
d	mm	unutarnji promjer vanjske lamele
d_{au}	mm	promjer glave ozubljenja unutarnje lamele
d_{av}	mm	vanjski promjer vanjske lamele
d_m	mm	srednji promjer lamele
d_u	mm	vanjski promjer unutarnje lamele
d_{fu}	mm	promjer korijena ozubljenja unutarnje lamele
d_v	mm	promjer vratila
f	mm ³ /kWh	faktor istrošenja
i	-	broj lamela
i_p	-	prijenosni omjer
j	-	broj tarnih parova
k_j	-	korekcijski faktor spojke
m	kg	masa kotača
n_1	min ⁻¹	broj okretaja pri maksimalnoj snazi
n_2	min ⁻¹	broj okretaja pri maksimalnom momentu
n_m	min ⁻¹	broj okretaja prilikom promjene brzine
n_p	min ⁻¹	broj okretaja prilikom pokretanja vozila
p	N/mm ²	ostvareni dodirni pritisak
p_{dop}	N/mm ²	dopušteni pritisak
$q_{K,1}$	J/cm ²	specifično toplinsko opterećenje spojke pri maksimalnoj snazi
$q_{K,2}$	J/cm ²	specifično toplinsko opterećenje spojke pri maksimalnom momentu
q_m	J/cm ²	specifično toplinsko opterećenje spojke prilikom promjene brzine
q_p	J/cm ²	specifično toplinsko opterećenje spojke prilikom pokretanja vozila
q_{dop}^*	W/cm ²	dopušteno toplinsko naprezanje

$q_{K,1}^*$	W/cm ²	specifična toplinska snaga pri maksimalnoj snazi
$q_{K,2}^*$	W/cm ²	specifična toplinska snaga pri maksimalnom momentu
q_m^*	W/cm ²	specifična toplinska snaga prilikom promjene brzine
q_p^*	W/cm ²	specifična toplinska snaga prilikom pokretanja vozila
r_1	mm	polumjer gume
r_2	mm	polumjer felge
r_m	mm	polumjer lamele
s'	mm	debljina obloge vanjske lamele
Δs	mm	maksimalna dopuštena debljina potrošene obloge
$t_{1,2}$	s	vrijeme u kojem se moment povećava od 0 do T_K
$t_{3,1}$	s	vrijeme klizanja spojke pri maksimalnoj snazi
$t_{3,2}$	s	vrijeme klizanja spojke pri maksimalnom momentu
$t_{3,m}$	s	vrijeme klizanja spojke prilikom promjene brzine
$t_{3,p}$	s	vrijeme klizanja spojke prilikom pokretanja vozila
$t_{a,m}$	s	vrijeme hlađenja uključene spojke prilikom promjene brzine
$t_{a,p}$	s	vrijeme hlađenja uključene spojke prilikom pokretanja vozila
$t_{b,m}$	s	vrijeme hlađenja isključene spojke prilikom promjene brzine
$t_{b,p}$	s	vrijeme hlađenja isključene spojke prilikom pokretanja vozila
t_c	s	vrijeme ciklusa rada spojke
$t_{c,m}$	s	vrijeme ciklusa rada spojke prilikom promjene brzine
$t_{c,p}$	s	vrijeme ciklusa rada spojke prilikom pokretanja vozila
t_u	mm	debljina unutarnje lamele
t_v	mm	debljina vanjske lamele
$t_{v,a}$	mm	debljina vanjske lamele bez obloge
v^*	cm/min	specifični protok ulja kod dobrog hlađenja
v_m	m/s	srednja obodna brzina
$v_{m,m}$	m/s	srednja obodna brzina prilikom promjene brzine
$v_{m,p}$	m/s	srednja obodna brzina prilikom pokretanja vozila
z_h	h ⁻¹	broj uključivanja spojke po satu
$z_{h,m}$	h ⁻¹	broj uključivanja spojke po satu prilikom promjene brzine
$z_{h,p}$	h ⁻¹	broj uključivanja spojke po satu prilikom pokretanja vozila

z_u	-	broj zubi unutarnje lamele
z_v	-	broj izdanka vanjske lamele
A_1	cm ²	kontaktna površina
D	mm	promjer korijena izdanka vanjske lamele
F_A	N	uključna sila
I_R	kgm ²	moment inercije zamašnih masa
I_m	kgm ²	moment inercije prilikom promjene brzine
I_p	kgm ²	moment inercije prilikom pokretanja vozila
L_n	-	trajnost tarnih ploha
$L_{n,m}$	-	trajnost tarnih ploha prilikom promjene brzine
$L_{n,p}$	-	trajnost tarnih ploha prilikom pokretanja vozila
N_m	-	broj uključivanja spojke do istrošenja prilikom promjene brzine
N_p	-	broj uključivanja spojke do istrošenja prilikom pokretanja vozila
P_1	kW	maksimalna snaga
P_2	kW	snaga pri maksimalnom momentu
$P_{T,1}$	W	snaga koja se troši na ugrijavanje spojke pri maksimalnoj snazi
$P_{T,2}$	W	snaga koja se troši na ugrijavanje spojke pri maksimalnom momentu
$P_{T,m}$	W	snaga koja se troši na ugrijavanje spojke prilikom promjene brzine
$P_{T,p}$	W	snaga koja se troši na ugrijavanje spojke prilikom pokretanja vozila
R_{dt0N}	N/mm ²	trajna dinamička čvrstoća
S	-	faktor sigurnosti
T_1	Nm	moment kojeg prenosi jedna tarna ploha
T_a	s	vrijeme hlađenja uključene spojke
T_b	s	vrijeme hlađenja isključene spojke
$T_{K,1}$	Nm	uključni moment pri maksimalnoj snazi
$T_{K,2}$	Nm	uključni moment pri maksimalnom momentu
T_m	Nm	okretni moment prilikom promjene brzine
T_p	Nm	okretni moment prilikom pokretanja vozila
$T_{R,1}$	Nm	radni moment za režim rada pri maksimalnoj snazi

$T_{R,2}$	Nm	radni moment za režim rada pri maksimalnom momentu
T_S	Nm	statički moment
V	cm ³ /min	protok ulja za hlađenje lamela
V_O	mm ³	volumen obloge koji se smije istrošiti
W_1	J	rad trenja kod uključivanja spojke pri maksimalnoj snazi
W_2	J	rad trenja kod uključivanja spojke pri maksimalnom momentu
$W_{h,1}$	J/h	rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke pri maksimalnoj snazi
$W_{h,2}$	J/h	rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke pri maksimalnom momentu
$W_{h,m}$	J/h	rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke prilikom promjene brzine
$W_{h,p}$	J/h	rad trenja kod višekratnog uključivanja spojke prilikom pokretanja vozila
W_m	J	rad trenja kod uključivanja spojke prilikom promjene brzine
W_p	J	rad trenja kod uključivanja spojke prilikom pokretanja vozila
W_P	mm ³	moment otpora
Y_1	-	faktor punoće površine
α_a	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline za tarni par čelik/sinter bronca kada je spojka uključena
α_b	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline za tarni par čelik/sinter bronca kada je spojka isključena
μ	-	koeficijent trenja klizanja
μ'	-	koeficijent trenja kada se uključivanje izvodi pod punim opterećenjem
μ_{ax}	-	aksijalni koeficijent trenja na vodilicama
μ_s	-	statički koeficijent trenja
ϑ_0	°C	temperatura okoline
ϑ_{dop}	°C	dopuštena temperatura tarnih parova za hlađenje uljem
$\vartheta_{max,m}$	°C	maksimalna temperatura tarnih površina za režim rada pri promjeni brzine
$\vartheta_{max,p}$	°C	maksimalna temperatura tarnih površina za režim rada pri pokretanju vozila
$\Delta\vartheta_{max,m}$	K	maksimalni prirast temperature tarnih površina za režim rada pri promjeni brzine

$\Delta\vartheta_{\max,p}$	K	maksimalni prirast temperature tarnih površina za režim rada pri pokretanju vozila
$\Delta\vartheta_{\text{mm},p}$	K	prirast temperature potisne lamele za režim rada pri promjeni brzine
$\Delta\vartheta_{\text{mm},u}$	K	prirast temperature unutarnje lamele za režim rada pri promjeni brzine
$\Delta\vartheta_{\text{mm},v}$	K	prirast temperature vanjske lamele za režim rada pri promjeni brzine
$\Delta\vartheta_{\text{mp},p}$	K	prirast temperature potisne lamele za režim rada pri pokretanju vozila
$\Delta\vartheta_{\text{mp},u}$	K	prirast temperature unutarnje lamele za režim rada pri pokretanju vozila
$\Delta\vartheta_{\text{mp},v}$	K	prirast temperature vanjske lamele za režim rada pri pokretanju vozila
$\rho_{\text{č}}$	kg/m ³	gustoća čelika
$\rho_{\text{s,b}}$	kg/m ³	gustoća sinter bronce
τ_t	N/mm ²	tangencijalno naprezanje
$\tau_{t,\text{dop}}$	N/mm ²	dopušteno tangencijalno naprezanje
$\omega_{0,1}$	s ⁻¹	sinkronizirana kutna brzina pri maksimalnoj snazi
$\omega_{0,2}$	s ⁻¹	sinkronizirana kutna brzina pri maksimalnom momentu
$\omega_{0,m}$	s ⁻¹	sinkronizirana kutna brzina prilikom promjene brzine
$\omega_{0,p}$	s ⁻¹	sinkronizirana kutna brzina prilikom pokretanja vozila

POPIS SLIKA

Slika 1.1. G.W. Daimler-ov motocikl [1]	1
Slika 1.2. Prikaz sklopa motociklističke spojke [2].....	2
Slika 2.1. Prikaz podjele lamela prema načinu aksijalnog vođenja [3]	3
Slika 2.2. Shema momenata prilikom uključivanja spojke [4]	5
Slika 2.3. Pojednostavljeni dijagram momenata na spojci	6
Slika 2.4. Shema momenata spojke s ugrađenim zamašnjakom.....	7
Slika 2.5. Bilanca energije kod jednog uključivanja [4].....	8
Slika 3.1. Presjek glavnih dijelova motociklističke spojke [6].....	9
Slika 3.2. Presjek sustava motociklističke spojke [8].....	10
Slika 3.3. Presjek motociklističke spojke u zahvaćenom položaju [8]	11
Slika 3.4. Presjek motociklističke spojke u nezahvaćenom položaju [8]	12
Slika 3.5. Sajla za mehaničko uključivanje spojke [10]	12
Slika 3.6. Sustav s hidrauličkom aktivacijom spojke [12].....	13
Slika 3.7. Izvedba suhe spojke [15]	14
Slika 3.8. Prikaz jednosmjerne klizne spojke prilikom ubrzavanja i usporavanja [16].....	15
Slika 3.9. Unutarnje lamele s ozubljenjem [17].....	16
Slika 3.10. Vanjske lamele s izdancima [19].....	17
Slika 4.1. Krivulje snage i momenta motocikla Ducati Streetfighter V2 [20].....	18

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Kombinacije tarnih parova [3]	4
Tablica 4.1. Karakteristike tarnih parova [4]	21
Tablica 4.2. Toplinska svojstva pojedinih materijala [4]	35
Tablica 4.3. Karakteristike materijala [22].....	45

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U završnom radu opisana je višelamelna motociklistička spojka za pogon motocikla. U uvodnom dijelu opisana je dinamika tarne spojke u koju spada motociklistička spojka te osnove tarnih spojki. Nadalje je opisan princip rada višelamelne spojke motocikala zajedno sa njihovom podjelom te osnovnim dijelovima. Proračun je izvršen po karakteristikama motocikla Ducati Streetfighter V2, dok su lamele odabrane od strane proizvođača Newfren te su se prema njihovim dimenzijama konstruirali svi ostale dijelovi motociklističke spojke. Konstrukcija spojke izrađena je u programu Autodesk Inventor dok su radionički i sklopni nacrti dorađeni u AutoCad-u.

Ključne riječi: višelamelna motociklistička spojka, lamele, tarni parovi, tarne spojke, proračun.

SUMMARY AND KEYWORDS

In the final paper, we are describing a multiplate motorcycle clutch for motorcycle. The introductory part describes the dynamics of the friction clutch, which includes the motorcycle clutch, and the basics of friction clutches. Furthermore, the principle of operation of the multiplate clutch of motorcycles is described together with their division and basic parts. The calculation was made according to the characteristics of the Ducati Streetfighter V2 motorcycle, while the clutch plates were selected by the manufacturer Newfren, and all other parts of the motorcycle clutch were constructed according to their dimensions. The construction of the clutch was made in the Autodesk Inventor program, while the workshop and assembly drawings were refined in AutoCad.

Keywords: multiplate motorcycle clutch, clutch plates, friction pairs, friction clutch, calculation

PRILOZI

U prilogama je priložena tehnička dokumentacija višelamelne motociklističke spojke.

1. Motociklistička spojka
2. Vanjsko kućište
3. Potisna lamela
4. Unutarnja lamela
5. Unutarnje kućište
6. Potisna ploča
7. Glavina
8. Odstojnik
9. Vanjska lamela
10. Spider opruga
11. Matica M27
12. Čep