



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

STANOVENÍ VÝKONU V CYKLISTICE

DETERMINATION OF PERFORMANCE IN CYCLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Papp

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Dominik Papp**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijníma zkušebníma řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Stanovení výkonu v cyklistice

1 Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Se zvyšujícím se zájmem o cyklistiku na výkonové úrovni vznikla řada koncepcí pro stanovení výkonu cyklisty. Jednotlivé varianty se liší místem, kde je umístěn snímač, a jeho typem. V rámci bakalářské práce je cílem soustředit potřebné informace a dané problematice a základě dostupných informací porovnat jednotlivé varianty, a to včetně užití numerické simulace.

2 Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši dostupné literatury.

Vytvořit přehled současně používaných koncepcí.

Vytvořit přehled používaných snímačů.

Posoudit vhodnost umístění snímače pomocí numerické simulace nebo technického experimentu.

3 Seznam doporučené literatury:

CHEN, Xiaolin a Yijun LIU. Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench. Second edition. Boca Raton: Taylor and Francis ; CRC Press, 2018, xiii, 457 stran, ISBN: 9781138486294.

LAWRENCE, Kent L. ANSYS workbench tutorial: structural & thermal analysis using the ANSYS workbench release 14 environment. Mission: SDC Publications, 2012, ISBN 978-1-58503-754-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na rozvíjející se trend měření mechanického výkonu v cyklistice. V úvodní rešeršní části jsou uvedeny různé umístění měřičů výkonu a popsána jejich funkce. Důležitou součástí pro měření výkonu jsou tenzometry. Proto zde byly důkladně popsány, rozděleny do jednotlivých kategorií a následně uvedeny jejich možné nedostatky. Teoretické znalosti byly poté ověřeny pomocí numerické simulace v programu Ansys.

KLÍČOVÁ SLOVA

Wattmetr, tenzometr, cyklistika, Ansys

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on increasing trend of measuring mechanic power in cycling. The research part shows types of power meters and shown their function. Important part in measuring power is strain gauge. Because of that, they were described, divide into category and shown their deficiencies. Theoretic knowledge has been verified by numeric simulation in Ansys.

KEYWORDS

Power meter, strain gauge, cycling, Ansys

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAPP, Dominik. Stanovení výkonu v cyklistice [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/13712>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Kamil Řehák.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Kamila Řeháka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Dominik Papp

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D, za odborné vedení mé práce, spoustu užitečných rad a postřehů v průběhu práce a také velmi lidský přístup. Následně rodině a přátelům za podporu při celé době mého bakalářského studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Cyklistika.....	11
1.1 Rekreační cyklistika.....	11
1.2 Profesionální cyklistika.....	11
1.2.1 Silniční cyklistika	11
1.2.2 Terénní cyklistika	12
1.2.3 Sálová cyklistika.....	12
2 Výkonnostní trénování	13
2.1 Tachometr	13
2.2 Sporttesty	14
3 Wattmetry	15
3.1 Historie wattmetrů	15
3.2 Wattmetry umístěné ve šlapátcích	16
3.3 Wattmetr umístěný v klíce	17
3.4 Wattmetr umístěný v unašeči.....	18
3.5 Další typy wattmetrů.....	19
4 Tenzometrie.....	21
4.1 Rozdělení Tenzometrů	21
4.1.1 Kovové Tenzometry	21
4.1.1.1 Drátkové tenzometry.....	22
4.1.1.2 Foliové tenzometry	22
4.1.1.3 Vrstvové tenzometry	23
4.1.2 Polovodičové tenzometry	23
4.2 Vliv okolních podmínek na tenzometr.....	23
4.2.1 Creep.....	24
4.2.2 Vlhkost	24
4.2.3 Teplota	24
4.2.4 Napájecí napětí	24
4.2.5 Příčná citlivost	25
5 Simulace v programu Ansys	26
Závěr.....	29
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	32

ÚVOD

S rostoucím zájmem o cyklistiku, stoupá počet závodníků ve všech věkových kategoriích. Závodníci chtějí dosahovat co nejlepších výkonů jak v závodech, tak v tréninku. Je potřeba zvolit nejlepších dostupných metod pro zlepšení výkonnosti. Pomocí pro optimální trénink jsou wattmetry. Tyto zařízení dokážou srovnávat aktivity v jakýchkoliv podmínkách a terénech. Cyklista díky nim přesně ví, kolik energie aktuálně vydává.

Wattmetrů existuje velké množství. Každý z nich funguje na jiném principu. Jsou umístěny na různých částech kola a velmi se liší také cenovou náročností. Je tedy důležité vědět, jak wattmetry fungují a jestli se vyplatí připlatit za lepší modely.

Ve wattmetrech najdeme elektronické přístroje, z nichž nejdůležitějším je tenzometr. Tenzometry určují, jakou silou působíme na kolo. Prostředí kola je ovšem ovlivňováno nepříznivými podmínkami. To má samozřejmě dopad na měření ovšem vlivy nemusí být až tak velké.

1 CYKLISTIKA

Cyklistiku můžeme rozdělit do dvou největších odvětví a to rekreační a profesionální. Zatímco u rekreační je hlavním cílem poznávání okolí a péče o své zdraví, u sportovní je cílem zdolat určitou vzdálenost v co nejkratším čase. Velké rozdíly jsou rovněž i v používané technice, zatímco u rekreační cyklistiky je kladen důraz na výdrž komponent a jednoduchou údržbu, ve sportovní se snažíme kola co nejvíce odlehčit i za cenu nižší životnosti.

1.1 REKREAČNÍ CYKLISTIKA

V letních měsících je cyklistika jedním z nejvíce provozovaných sportů. Většina dětí se na kole učí již v brzkém věku, což přispívá k rozvoji jejich motorických a fyzických dovedností. Díky velkému množství cyklostezek a lesních cest, nevyužívaných pro automobilovou dopravu, kterých v České republice máme přes 37 000 km je možností kam vyrazit velké množství. Jak již bylo zmíněno hlavním cílem je fyzická aktivita, jejíž náročnost si každý určuje podle sebe.

V roce 2014 vyrazilo aspoň jednou týdně na kolo 35,5 % obyvatel v Česku, což nás činní po Dánsku a Maďarsku 3. zemí, kde je cyklistika nejvíce rozšířená. Bohužel se jedná pouze o rekreační cyklistiku, jako dopravu do práce si kolo volí pouze 4 % lidí. Jako ve většině Evropy u nás potkáte na kole častěji muže než ženy.

1.2 PROFESIONÁLNÍ CYKLISTIKA

Z profesionální cyklistiky je nejznámější silniční cyklistika, využívá se zde silniční kolo, která má úzké pláště, pevnou kostru bez odpružení a zpravidla menší pastorky, ovšem s lehčími přechody mezi jednotlivými přechody. Závodů se mohou konat buď etapově, jezdci jedou více úseků a jejich výsledné časy se sčítají, nebo takzvané Klasiky, kde na jezdce čeká jeden dlouhý úsek.

V terénní cyklistice závody nejsou tak dlouhé, ovšem o to náročnější je jejich výškový profil. Závodů se zpravidla jezdí na okruhy, které nabízí pestrý výškový profil s náročnými výjezdy a sjezdy. Kola jsou zde více přizpůsobována trati, mohou být použita kola až do velikosti 29 palců, které nesmí být vybaveny hroty. Lze použít i odlišné odpružení kola, nejvíce využívaná jsou celoodpružená kola, ovšem lze využít i odpružení pouze přední vidlice tzv. Hardtail.

Jsou zde ovšem i speciální disciplíny, jako sjezd a cyklokros. Ve sjezdu se využívají speciální celoodpružená kola, která mají tlumiče s vyšším zdvihem než na standardních celoodpružených kolech, kvůli velkému množství extrémních skoků a velkých silách při dopadech. Jedná se o jednu z nejnebezpečnějších oblastí cyklistiky, jezdci jedou ve velké rychlosti po většinou úzké cestě v lese mezi stromy, kde jejich rychlost může přesahovat 60km/h. V cyklokrosu jsou používána kola spíše podobná silničním speciálům, nemají žádné odpružení a jejich hmotnost je co nejmenší. Hlavním rozdílem jsou daleko větší pláště s velkým vzorkem, které umožňují dobrý záběr i na rozbahněné louce.

1.2.1 SILNIČNÍ CYKLISTIKA

Nejznámějším etapovým závodem je jednoznačně Tour de France. Jedná se o závod napříč Francií, ovšem každý rok jinou trasou. Závod trvá více než 3 týdny a jezdci urazí vzdálenost větší než 3000 km. Jezdci zde nejedou pouze na celkové vítězství, ale také na vítězství ve vybraných kategoriích. Nejlepší jezdec v součtu časů získává žlutý trikot (maillot

jaune). V každé etapě se rozdělují i body do bodové soutěže. Prvních 5 jezdců, kteří projedou cíle etapy, nebo vyznačenou metou dostanou sestupně od 5 bodů. Vedoucí v bodové kategorii dostává zelený trikot (maillot vert). Nejlepší vrchař v soutěži získává puntíkatý trikot (maillot à pois). Dalšími proslulými závody jsou také Giro d'Italia a Vuelta a España. společně si tyto podniky nazývají jako Grand Tour.

Klasiky obecně sice nemají takový věhlas jako Grand tour, ale nejznámější z nich se jim mohou téměř rovnat. Jednou z nejznámějších klasik je bezesporu Paříž-Roubaix, tato proslulá klasika se již od nepaměti jezdí po dlouhých úsecích tzv. kočičích hlav. Silniční kola na tento povrch nejsou zcela stavěna, a tak zde každoročně dochází k nespočtu defektů, dokonce i proražení ráfků. Sláva tohoto závodu dokonce přiměla výrobce k výrobě speciálních kol určených jen pro tento závod. Další slavné klasiky jsou například: Milán – San Remo, nejdelší jednoetapový závod, nebo Kolem Flander.

1.2.2 TERÉNNÍ CYKLISTIKA

Někdy také může být označována jako horská cyklistika, přeložením z anglického Mountainbike. Souhrnně tak můžeme označit cyklistiku, která není provozována na zpevněném asfaltovém povrchu. Dělí se do více různých kategorií, nejznámější jsou u nás hlavně závody horských kol. Velmi oblíbenou disciplínou je také sjezd, který se postupně těší většímu zájmu cyklistů, hlavně mladší generace. Poněkud v ústraní zůstává cyklokros, který řada závodníků využívá pro zvýšení povědomí o jejich výkonech a následný přesun do silniční cyklistiky.

1.2.3 SÁLOVÁ CYKLISTIKA

Dnes již téměř zaniklé odvětví cyklistiky se svému největšímu zájmu těšilo hlavně v minulém století. Můžeme jen rozdělit do dvou oblastí, známějším odvětvím je jednoznačně kolová. Méně známá je pak cyklistická krasojízda.

Kolová je velice podobná sálovému fotbalu, ovšem hráči jsou na hřišti pouze dva v každém týmu a pro přesun po ploše užívají speciálně upravené kolo s jedním stálým převodem, které umožňuje hráči pohyb vpřed i vzad. Balón se posouvá pomocí úderů předním kolem, dovolen je také zásah hlavou. Největší vlnu popularity zažila kolová v Česku v 70. a 80. letech minulého století. Legendární dvojice bratrů Pospíšilů totiž dokázala vyhrát mistrovství světa hned 20x, což nemá obdoby ani v jiných sportech.

Cyklistická krasojízda, jedná se o zjednodušeně řečeno “gymnastiku na kolech“. Jezdci za hudebního doprovodu, provádějí na kolech akrobatické triky, které jsou následně dle obtížnosti a provedení hodnoceny bodovými rozhodčím

2 VÝKONOSTNÍ TRÉNOVÁNÍ

S rostoucí úrovní cyklisty je nutné i adekvátní trénování. Každý máme jiné tělo a tak je potřeba tréninku přizpůsobovat individuálním potřebám. Do tréninku vstupuje plno okolních efektů a tak stanovit optimální trénink nedokáže úplně každý, proto zde byla snaha vytvořit ukazatel, který dokáže nejlépe zhodnotit nejen výkon sportovce, ale i tělesnou odpověď na vykonanou aktivitu. Pro stanovení optimálního tréninku byla dlouho využívána tepová frekvence. Ještě před ní byla využívána rychlost. Ovšem pro porovnání tréninků se dá rychlost použít pouze při opakované jízdě na stejné trati, nebo při jízdě po absolutní rovině, což je velice těžko dosažitelné.

2.1 TACHOMETR

Jedná se o nejpoužívanější cyklistický přístroj. Obyčejné tachometry dokáží měřit rychlost cyklisty, průměrnou rychlost a také ujetý čas. Funkce tachometru je jednoduchá technologie, cyklo počítač, který je umístěn na řídítkách kola, možné je také uchycení na představec kola, je spojen s čidlem, které je umístěno na přední vidlici. Do výpletu kola se přichytí magnet, který vysílá signál vždy při průchodu kolem čidla. Takto získáváme frekvenci otáčení kola. V cyklo počítači musíme nastavit jaký průměr kola máme, rovněž i jaký plášť na kole používáme. Duše by měla být nafouknuta na hodnotu stanovenou výrobcem, abychom se co nejvíce přiblížili obvodu kola, který je spočten pro optimální podmínky. Ze získané frekvence otáčení a obvodu našeho kola dostáváme aktuální rychlost pomocí vztahu 1.

$$v = f \cdot O \quad (1)$$

Tyto tachometry můžeme ještě rozdělit do dvou skupin podle přenosu dat z čidla do počítače. Prvním, dnes už méně využívaným, systémem je přenos pomocí kabelu taženého po vidlici a řídítkách kola. Výhody tohoto systému jsou nižší pořizovací náklady, větší výdrž baterie a vyšší stabilita připojení. Hlavní nevýhodou je kabel vedený od čidla do počítače, který je náchylný na přetržení, musí být dobře uchycen k rámu, aby nevznikalo riziko namotání do výpletu kola. Další nevýhoda je sice drobná, leč pro spoustu cyklistů podstatná a tou je estetická stránka, kdy kabel, který je k rámu přilepen lepicí páskou nevypadá úplně nejlépe.

Novějším způsobem přenosu dat z čidla do počítače je bezdrátová technologie. Čidlo i počítač jsou propojeny přes Bluetooth. Díky malé vzdálenosti obou zařízení je přenos stabilní, může ovšem občas nastat částečný výpadek. Hlavní výhodou tohoto systému je snadná montáž a možnost využití pouze jednoho cyklo počítače pro více kol. Nevýhodami mohou být občasné výpadky, nebo také vyšší spotřeba baterie, jak pro počítač, tak pro snímač. Další nevýhodou může být také vyšší pořizovací cena, ovšem bezdrátová technologie je využívána hlavně na tachometrech vyšší třídy.

Měření rychlosti přímo z kola dnes začíná konkurovat měření rychlosti pomocí GPS. Rychlost měřena pomocí GPS je přesnější než měření přímo z kola, ovšem trpí na ztráty signálu, které mohou rychlost zkreslovat. Měření pomocí GPS signálu je většinou jen v tachometrech nejvyšší třídy, jelikož k obstojné výdrži je zapotřebí kvalitní baterie, která už má vyšší pořizovací náklady, zpravidla zde už nenalezneme klasickou plochou lithiovou baterii, ale moderní baterie s možností nabíjení.

2.2 SPORTTESTRY

Jedním z nejvíce používaných měřičů výkonu jsou v dnešní době sporttesty. Na trhu je jich velké množství v různých cenových hladinách, které začínají okolo tisíce korun, ovšem mohou se vyšplhat až do desetitisíců. Sporttestr je nezbytnou pomůckou pro zjištění odezvy těla na aktuální fyzický výkon, díky měření tepové frekvence. Tepová frekvence je odpovědí těla na vykonanou aktivitu. Nástup tepové frekvence ovšem není okamžitý, tělu chvíli trvá, než začne reagovat. Tepové frekvence je také ovlivněna mnoha vnějšími faktory. Pokud jsme ve stresu budeme mít tepovou frekvenci zvýšenou a data, tak budou zkreslená. Stejně tak záleží i na kvalitním spánku, nebo klimatických podmínkách. Moderní sporttesty, které mají zabudovaný měřič tepové frekvence v zápěstí nás můžou sledovat celý den a předpovědět nejlepší dobu pro náš trénink, ovšem pokud budeme dávat důraz čistě na tepy data budou téměř vždy lehce zkreslená.

3 WATTMETRY

Wattmetry jsou zařízení, která udávají mechanický výkon cyklisty v aktuálním čase. Základem každého wattmetru je tenzometr. Tenzometr nám určuje nejzákladnější veličinu pro zjištění našeho mechanického výkonu: sílu jakou do pedálů tlačíme. Díky síle dokážeme určit, jak velkým momentem síly na kliku působíme. Další nezbytnou součástí je měřič kadence, neboli počet otáček za minutu. Výsledný výkon pak dostaneme ze vztahu:

$$P = \frac{M \cdot n \cdot 2\pi}{60} \quad (2)$$

Kde M představuje vyvolaný moment síly a n počet otáček za minutu. Konstanta 60 je zde kvůli převedení otáček za minutu na otáčky za vteřinu.

Výhodou díky, které každý profesionální cyklista wattmetr používá je stálost jeho dat. Výkon, který cyklista vynakládá na svou jízdu není ovlivněn žádným vnějším faktorem. Nezáleží nám na sklonu silnice nebo povětrnostních podmínkách, pokud máme stálý mechanický výkon, pak rovněž energie na něj vynakládaná je stále stejná. Odvodit si to můžeme z jednotky Watt.

$$P = \frac{J}{s} \quad (3)$$

Vidíme, že výkon jednoho wattu odpovídá vynaložené energii jednoho Joulu za jednu vteřinu. Nejlepší cyklisté znají mez maximální mechanické energie, kterou jsou schopni v závodě vydat. Díky tomu vědí, jakým tempem mají závod jet, aby jim ke konci „nedošlo“. Je jasné, že tohle funguje pouze za dokonalých podmínek, kterých je možné dosáhnout pouze velmi zřídka, nicméně nepřesnosti jsou zde zdaleka nejmenší, ze všech dostupných měřičů výkonosti.

V cyklistice se velmi často setkáváme také s jednotkou W/kg. Udává počet wattů na kilogram cyklistovy váhy. Cyklisté s větší svalovou hmotou jsou schopni vyvinout na pedál větší tlak, tím pádem i vyvinout větší výkon. Ovšem nemusí to nutně znamenat, že výkon silnějšího cyklisty byl v jeho měřítku vyšší než výkon lehčího cyklisty.

Můžeme jej nalézt na rozdílných součástech kola, žádoucí je dostat se co nejbližší působení síly, abychom dostali co nejpresnější výsledky. Čím dále od působení síly budeme tím nepřesnější naše měření bude. Je to dáno ztrátami, které se vyskytují v každém spoji součástí i na součástech samotných.

Důležitou vlastností každého wattmetru je stálost měření. Pro účely tréninku nás stálost měření zajímá daleko více, než zda je naměřená hodnota skutečná. Odchyłky většiny wattmetrů se pohybují v rozmezí 0,5 - 3 %. Pro stálost měření se wattmetry musejí kalibrovat. Jejich prvotní kalibrace probíhá při smontování. Následně se doporučuje provádět kalibraci, před každým delším zatížením, nebo důležitým závodem.

3.1 HISTORIE WATTMETRŮ

Tato technologie není v cyklistice novinkou. První wattmetry byly vyvíjeny již v 80. letech minulého století. Měření výkonu probíhalo pouze na stacionárním kole. Měření probíhala za pomoci velkého množství kabelů a výsledná data byla zobrazována na počítači. Až s rozvojem technologie Bluetooth a také rozvoje elektroniky bylo možné zařízení zmenšit a umístit na kolo, které bylo volně v pohybu nikoliv jen vevnitř.



Obrázek 1 První sestrojený wattmetr [2]

První wattmetr, který byl sestrojen pro použití ve venkovním provozu byl od firmy SRM (Schoberer Rad Meßtechnik). Umístění wattmetru bylo v převodníku kola, který byl spojen s klikou. Mezi nimi byl umístěný tenzometr, který měřil sílu, jakou cyklista vyvíjí. V konstrukci byl senzor, který měřil počet otáček převodníku. Vynásobením těchto hodnot dle vztahu 2 jsme dostali výsledný výkon. Patent si nechala německá firma udělat v roce 1987. V roce 1991 začali první profesionální cyklistické týmy trénovat s wattmetrem. Propojení wattmetru s displejem bylo stále ještě kabelové, ovšem displej disponoval úložným prostorem pro úschovu dat a následné vyhodnocení. Od této doby prochází měření výkonu velkým rozmachem již o 6 let později vyhrává Bjørn Riis první závod s použitím wattmetru, který dle jeho slov měl na vítězství velkou zásluhu. Postupem let se role wattmetrů stále vyvíjela. Měření výkonu poutalo pozornost nejen mezi jezdci, ale i mezi diváky. Každý chtěl vidět, jak moc právě zabírá jeho favorit a jak se jeho výkon liší v porovnání s jejich. První závod, kdy byl výkon živě promítán divákům byla Tour of Germany. Světově nejproslulejší závod – Tour de France, se živého streamování výkonu dočkal o 4 roky později. V dnešní době je výkon střeženou informací a málo který závodník dává v k dispozici svoje data ohledně výkonu.

3.2 WATTMETRY UMÍSTĚNÉ VE ŠLAPÁTCÍCH

Jedná se o jeden z nejoblíbenějších modelů pro měření výkonu. Na první pohled je modifikované šlapátko téměř k nerozeznání od toho normálního. Zařízení je uschováno ve středové části, kde pod kovovou částí nalezneme tenzometr.

Největšími výhodou je velice rychlá montáž zařízení a také jeho snadná vyměnitelnost na další kola. Funguje s klasickými silničními náslapy, tudíž opravdu stačí jen vyměnit za stávající silniční šlapátko. Je kompatibilní s téměř všemi koly. Umístěn je na obou stranách, díky čemuž můžeme sledovat generovaný výkon od každé nohy separátně.

Baterie se zde využívají většinou knoflíkové a to typu LR44/SR44 nebo CR1/3N. Tyto baterie nám dle výrobce a typu pedálů vydrží většinou více než 100 hodin aktivní jízdy. Na trh se nicméně dostávají i modely s dobíjecími lithiovými – iontovými bateriemi. Tyto baterie jsou nabízeny zejména v novějších modelech vyšší třídy. Wattmetry podporují technologie Bluetooth a ANT+, díky kterým mohou komunikovat s většinou bezdrátových tachometrů a také mobilních telefonů. Měření kadence neboli otáček, zde probíhá pomocí akcelometru,



Obrázek 2 Wattmetr ve šlapátcích [4]

který je umístěn také ve šlapátcích. Hmotnost je pro většinu modelů srovnatelná s váhou normálního šlapátka.

3.3 WATTMETR UMÍSTĚNÝ V KLICE

Umístění na klíce je nejčastější umístění wattmetru. Jedná se o levnější řešení než umístění ve šlapátcích. Toto řešení začíná s cenou již okolo 9000 Kč. Nejlevnější řešení umísťují wattmetr pouze na levé klíce. Změřený výkon následně vynásobí dvěma, abychom dostali reálný výkon. Odchyly mezi levou a pravou nohou, dle měření dosahují standardně maximálně 5 %, tudíž toto řešení je vítané pro amatérské sportovce, kde nepotřebujeme dosahovat maximální přesnosti. Ovšem náš celkový mechanický výkon je lehce ovlivněn v závislosti na tom, kterou nohu máme dominantní.

Pokročilejší metodu je umístění wattmetrů na obě kliky. Díky tomu jsme schopni měřit každou nohu separátně a výsledný výkon již není ovlivněn nevyvážeností našich nohou. Tato metoda již dokáže konkurovat wattmetrům umístěným ve šlapátcích i wattmetru umístěnému v unašeči. Cenově zde ovšem budeme na téměř dvojnásobku původní hodnoty, což už se téměř dostáváme na cenovou hladinu pro wattmetr ve šlapátcích.

Fakt že wattmetr umístěný pouze na jedné z klik neměří náš výkon správně nemusí být až tak podstatný. Dokud budeme jezdit pouze s tímto wattmetrem stále můžeme sledovat svůj progres, neboť nerovnováha našich nohou je pořád téměř stejná, tudíž každé navýšení našeho výkonu bude odpovídat reálnému zvýšení výkonu.

Wattmetr se dá umístit na jakoukoliv kliku, výrobci většinou nabízí možnost odeslání vaší kliky na jejich adresu a následné přidělení wattmetru. Koupit se dají i kliky s již přidělaným wattmetrem, jedná se hlavně o značky klik předních výrobců, jako jsou Shimano nebo Sram. Nevýhodou koupení kliky s již přidělaným wattmetrem je, že vám jedna vaše klika zůstane nevyužitá doma. Největší využití nachází tento typ wattmetru v terénní cyklistice. Měřiče ve šlapátcích zde nejsou často využívány, kvůli menším rozměrům šlapátek.

K napájení se zde používají knoflíkové baterie, většinou jde o typ CR2032. Stejně jako u předchozího umístění i zde se začínají čím dál více objevovat lithium – iontové baterie, které není potřeba měnit. Výdrž ovšem bývá zpravidla vyšší u knoflíkových baterií. Technologie Bluetooth a ANT+ jsou samozřejmostí i klikových modelů. Měření otáček, zde může probíhat dvojím způsobem. Prvním a častějším je využití akcelometru, stejně jako u pedálů. Druhým,

dnes již méně častým, je měření pomocí magnetu. Magnetové čidlo, které je pevně uchyceno v rámu kola, komunikuje s magnetem v tenzometru a počítá kolikrát klika minula tento bod za časový úsek. Na tomto principu fungují také tachometry kola, kdy je čidlo umístěno na přední vidlici a magnet na výpletu kola. Tato technologie byla využívána hlavně ve straších wattmetrech.

Pro reálné hodnoty těchto wattmetrů jsem vybral model od společnosti Inpeak působící na českém trhu. Model používá knoflíkovou baterii CR2032. Baterie vydrží maximálně 200 hodin. Přesnost měření je $\pm 2\%$. Hmotnost oproti sériové klice naroste o 12 g. Měřitelný výkon je v rozmezí 0 – 2000 W, při frekvenci šlapání 20 – 200 ot/min. Wattmetr je možné umístit pouze pokud je mezi klikou a rámem minimálně 10 mm. [3]



Obrázek 3 Wattmetr umístěný v klice [3]

3.4 WATTMETR UMÍSTĚNÝ V UNAŠEČI

Jedná se o nejdéle vyvíjené wattmetry. Jejich umístění je v unašeči kola, kde se nám sčítají zatížení od obou našich nohou. Výsledný výkon tedy bude měřen přesně, ovšem není schopen nám určit, jak velkou silou působí jedna či druhá noha. Díky speciálně upravenému unašeči potřebuje tento typ wattmetru často speciální kliky. Ovšem u novějších modelů se pouze vymění za stávající unašeč. Velké využití nalézá hlavně na stacionárních kolech, které slouží k jízdě „namístě“. Je považován za jeden z nejpřesnějších měřičů výkonu, při měření v laboratorních podmínkách.

Tyto wattmetry mají v porovnání s ostatními nejlepší poměr mezi cenou a přesností s jakou zobrazují výkon. Rovněž díky svému umístění, je velmi nepravděpodobné jakékoliv poškození. Díky svému umístění ve středu kola není problémem ani vyšší váha. Větší rozměry wattmetru umožňují umístění větší baterie a tím pádem větší výdrž wattmetru. Konektivita je i zde ve většině případů řešena přes Bluetooth a ANC+. Větší zastoupení zde mají lithium – iontové baterie. Hlavním důvodem je složitější montáž a tím pádem i demontáž wattmetru.

Nevýhodou těchto wattmetrů je, že jsou fixovány na určitý typ unašeče. Wattmetr musí kopírovat velkou část geometrie unašeče, tudíž výměna mezi více koly je možná pouze pokud jsou osazeny stejnou sadou klik a převodníků jako původní kolo. Nevýhodou je také nemožnost osazení některých kol tímto typem wattmetru. Jedná se výrobce, kteří unašeč vůbec nepoužívají a pravá klika je pevně spojena s převodníkem. Nepřesnost většiny wattmetrů tohoto typu je

$\pm 1 \%$. Kadence je zde často měřena pomocí magnetů. nicméně i zde někteří výrobci raději používají akcelometr.



Obrázek 4 Wattmetr umístěný v unašeci [11]

3.5 DALŠÍ TYPY WATTMETRŮ

Výkon se dá měřit i na dalších součástech, ovšem další metody již nejsou tak často používané, jako 3 výše rozebrané a setkat se s nimi můžeme jen zřídka.

Měření wattů může probíhat i v ložiscích kol. K měření používá zadní kolo, kde je přenášena síla z pedálů pomocí řetězu na kolo. Právě zde nám wattmetr určuje sílu, kterou cyklista vyprodukuje. Otáčky se následně řeší pomocí magnetů. Tento wattmetr byl používán hlavně v počátcích wattmetrů. Dnes jej již téměř neseženeme. Měřený výkon zde byl ovlivněn mnoha ztrátami, hlavně v řetězu. To způsobovalo zkreslení měřených hodnot. Další nevýhodou je jeho složité umístění do kola. Téměř nulová byla také jeho schopnost využití pro více kol.



Obrázek 5 Wattmetr v ložisku [8]

Wattmetr se dá taktéž umístit do ložiska, které spojuje levou kliku s pravou klikou. Tento wattmetr je velmi podobný s měřením pomocí klik. Výpočet síly je prováděn přes krouticí moment vyvolaný pedálem. Kadence je měřena opět za pomoci magnetů. Měření je zde pouze výkon od levé nohy, jelikož síla od pravé se nám projeví až v unašeci. Jeho instalace je velmi složitá, jelikož je nutné rozebrat klikové spojení, kde budeme nahrazovat původní ložisko modifikovaným. Přesnost zde byla srovnatelná s měřením na klice, ovšem složitá montáž a velmi slabá kompatibilita s dostupnými klikami znamenala nízký zájem.

Nalézt můžeme i wattmetr, který k měření výkonu nepoužívá tenzometr. Využívá účinků 3. Newtonova zákona, zákona akce a reakce, jinými slovy sčítá síly, které působí proti jezdcí a na základě akce a reakce je jasné jakou sílu musí generovat jezdec. Umísťuje se netradičně na řídítka kola. K zařízení je nutné připojit funkční tachometr. Bere v potaz opačné síly způsobené: odporem větru, akcelerací, sklonem cesty a samozřejmě třením. Pro zjištění těchto sil zařízení obsahuje akcelometry, čidla pro měření rychlosti větru, elevační senzory a samozřejmě tachometr. Tento typ je jedním z nejnovějších wattmetrů. Jejich výhodou je především nízká cena, která se pohybuje okolo 7000Kč. Montáž je velmi jednoduchá, stačí pouze připevnit senzor na řídítka a je vystaráno. S tím souvisí i výborná kompatibilita s jakýmkoliv kolem. Nepřesnost těchto měřičů se pohybuje okolo $\pm 3 \%$



Obrázek 6 Wattmetr na řídících [9]

4 TENZOMETRIE

Využívá se pro měření sil, tlaků a momentů, která působí na pevná tělesa. Jejich základem jsou tenké kovové drátky, které při zatížení mění svůj průměr, čímž se mění i jejich odpor. Základem pro jejich přesné měření je nutné pevné uchycení k podkladu. Deformaci tělesa neodstaneme přímo, ale musíme ji vyjádřit ze změny elektrického odporu tenzometru. Pro výpočet deformace a následně napětí musíme znát odpor tenzometru v nenamáhaném stavu, který označuje R . Dále změnu elektrického odporu tenzometru značenou ΔR . Konstantu K , která nám udává součinitel deformační citlivosti, většinou se setkáváme s hodnotou $K=2$. Na základě těchto veličin jsme ve vztahu níže schopni vypočítat deformaci ve směru délky tenzometru. Toto odvození platí pouze pro odporové kovové tenzometry.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Výpočet napětí σ provedeme pomocí Hookova zákona. Zde musíme znát Youngův modul námi měřené součásti E .

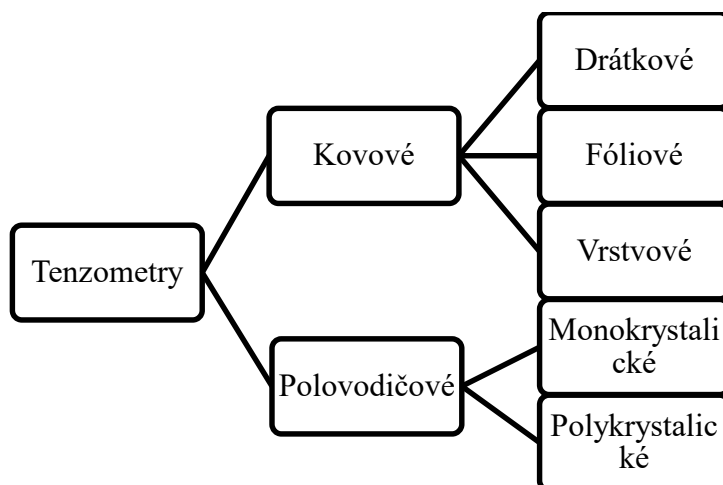
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (5)$$

Tento zjednodušený vztah využíváme pro malé napětí a deformace, což je pro naše účely pro použití ve wattmetrech dostatečné. Dosahované deformace jsou totiž velmi malé.

4.1 ROZDĚLENÍ TENZOMETRŮ

Odporové tenzometry můžeme rozdělit do dvou největších skupin kovové a polovodičové tenzometry. Tyto hlavní skupiny můžeme dále rozdělit takto:

Tab. 1 Rozdělení tenzometrů

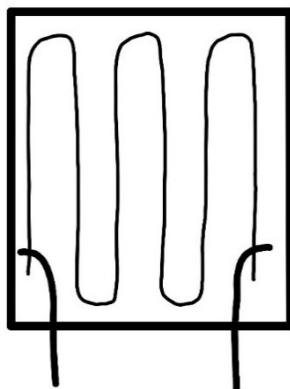


4.1.1 KOVOVÉ TENZOMETRY

Řadíme sem všechny tenzometry, které používají pro měření odporu kovové materiály. Tyto tenzometry jsou nejrozšířenějším typem tenzometrů. Je to dáno jejich historií i většinou nižší cenou než u polovodičových.

4.1.1.1 DRÁTKOVÉ TENZOMETRY

Nejzákladnějším typem kovových tenzometrů jsou kovové drátkové tenzometry. Tyto tenzometry patří k nejstarším vyrobeným tenzometrům, proto se dnes již tolik nepoužívají, nicméně se s nimi můžeme stále setkat. Dělíme je na lepené a nelepené.



Obrázek 7 Drátkový tenzometr

Lepené tenzometry jsou připevněny pomocí lepidla na podložku, která je následně přichycena k povrchu. Jejich hlavní výhodou je malý rozptyl odporu, K faktoru i teploty, čímž se téměř eliminují rušivé vlivy při měření více tenzometry. Velmi příznivá je i jejich cena a velká dostupnost lepidel. Nevýhodou je, díky omezeným rozměrům mřížky a průměru drátku, omezená dosažitelná hranice odporu.

Nelepené tenzometry neboli s volnou mřížkou uchycují svoje drátky na podložku pomocí izolačních kolíčků, které umožňují deformaci drátků. Díky kolíčkům nedochází k přenosu deformace na celý povrch tenzometru, ale pouze na jeho jednotlivé části. Netrápí nás tak omezený rozměr mřížky. Tento typ tenzometrů je využíván hlavně k měření tlaků.

4.1.1.2 FOLIOVÉ TENZOMETRY



Obrázek 8 Foliový tenzometr [10]

V dnešní době nejvyužívanější kovové tenzometry. Jsou ekvivalentem drátkových tenzometrů, ovšem jako měřicí mřížka je použita fólie, která může mít tloušťku pouze 5 μm . Výroba těchto tenzometrů je vysoce kvalitní a jejich vlastnosti dokáží konkurovat téměř všem typům tenzometrů. Díky folii je lepší přenos tepla ze základního materiálu, což pozitivně ovlivňuje měřené hodnoty. Nevýhodou mohou být nepříznivé hodnoty tečení (creepu) a hystereze, které mohou nastat u malých konstrukcí.

4.1.1.3 VRSTVOVÉ TENZOMETRY

Oproti foliovým tenzometrům, zde nedochází k nepříznivým hodnotám tečení ani hystereze. Jejich princip spočívá v nanesení aktivní vrstvy kovu přímo na materiál. Docílíme toho dvěma metodami, katodovým rozprašováním a vypařováním ve vakuu neboli vakuovým napařováním.

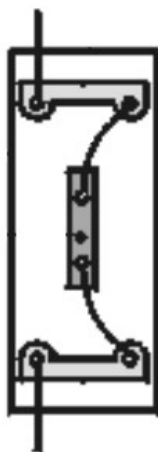
Při katodovém rozprašování používáme materiál, který chceme nanést jako katodu a následným výbojem v inertním plynu přilne k anodě, která je určena povrchem měřeného tělesa. Děj probíhá za tlaku desetin až setin torru a napětí v řádech kV. Jako inertní plyn je používán nejčastěji argon nebo xenon.

Častější metodu výroby je vakuové napařování. Pomocí zahřívání docílíme vzniku nasycených par, které následně kondenzují na chladnějším tělese, kterým je námi měřené těleso. Tento děj musí probíhat za velmi nízkého tlaku, který začíná na 10^{-5} torru. Pokud chceme co nejvíce zvýšit přesnost, musíme tlak ještě snížit, pro vysokou přesnost je používáno tlaků menších než 10^{-8} torru.

4.1.2 POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY

Jsou založeny na Piezorezistenci některých polovodičových prvků, hlavně křemíku. Piezorezistence je vlastnost polovodičových materiálů, kdy jejich elektrický odpor závisí na velikosti mechanického tlaku. Tento jev je u tenzometrů velmi žádoucí ovšem jsou zde jistá úskalí. Největším problémem je vysoká křehkost křemíku. Je obtížné dosáhnout u něj odolnosti vůči tahovým deformacím alespoň srovnatelnými s kovovými konstrukcemi na nichž chceme měřit. I přes svůj vysoký potenciál nejsou tak rozšířené jako kovové tenzometry. Dochází zde totiž k dalším problémům, které souvisejí s jejich citlivostí nebo chováním při změnách teplot.

Při ideálních podmínkách ovšem dokážou být velmi citlivé, jejich hlavní předností je měření velmi malých pretvoření. Dokážou měřit až 100x nižší pretvoření než kovové. Další velkou předností je vysoká mez únavy nebo malé rozměry ve srovnání s kovovými.



Obrázek 9 Polovodičový tenzometr [10]

4.2 VLIV OKOLNÍCH PODMÍNEK NA TENZOMETR

Tenzometr může být velmi náchylný na účinek vnějších vlivů, které mohou při měření nastat. Podmínky které nastávají při měření na kolech, nejsou vždy zcela optimální, proto je dobré vědět, jak mohou být naše hodnoty zkreslovány a jak se tomu vyhnout.

4.2.1 CREEP

Creep se projevuje při dlouhodobém statickém zatěžování, kdy po čase dochází k poklesu měřené veličiny. Způsobují ho vrstvy, přes které je přenášeno přetvoření z měřeného tělesa k měřicí mřížce. Více se projevuje u tenzometrů, které mají menší velikost měřicí mřížky. Vliv na velikost creepu nese ve velké míře druh použitého lepidla. Pokud se chceme vyvarovat nežádoucím účinkům creepu, musíme použít tenzometry, které creep nepostihuje. Využit může také elastického „after“ efektu. Tento jev má přesně opačný průběh než creep a tudíž jej dokáže anulovat. Jeho použití v praxi je ovšem velmi obtížné.

4.2.2 VLHKOST

Vlhkost ovlivňuje především hodnotu nulového bodu a deformační citlivost měření, výsledky tedy nebudou odpovídat reálným hodnotám. Vlhkost může pronikat přes izolace, kde nám bude snižovat izolační odpor mezi měřenou součástí a tenzometrem. Vlhkost může zapříčinit deformaci mřížky, nebo narušení lepidla. V krajních případech vysoké vlhkosti může dojít ke korozi mřížky, dokonce i k úplnému odlepení tenzometru. Zvláště při využití ve venkovních podmínkách je nutná dokonalá izolace.

4.2.3 TEPLOTA

Důležitým faktorem pro přesnost tenzometrů je teplota, ve které je měření prováděno. Tenzometry jsou většinou kalibrovány při pokojové teplotě, tudíž je nutné znát, jak se bude vyvíjet jejich odpor při růstu či poklesu teplot. Pro výpočet budeme potřebovat teplotní součinitel délkové roztažnosti měřeného materiálu, který označíme α_S . Dále teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu mřížky: α_G . Nakonec teplotní součinitel elektrického odporu mřížky β_G . Deformační součinitel zde označíme jako k .

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot (\alpha_S - \alpha_G) \cdot \Delta T + \beta_G \cdot \Delta T = k \cdot \varepsilon_z \quad (6)$$

Po úpravách dostáváme finální vzorec pro výpočet deformace zaviněné teplotou

$$\varepsilon_z = \left(\frac{\beta_G}{k} - \alpha_G \right) \cdot \Delta T + \alpha_S \cdot \Delta T \quad (7)$$

Čím vyšší teplota tedy bude v rozdílu od pokojové teploty tím více nám bude narůstat chyba měření. [12]

Pro odstranění problémů s výkyvy teplot můžeme použít teplotně samokompensované tenzometry. Tyto tenzometry dokážou v jistých teplotních intervalech minimalizovat deformaci způsobenou změnou teplot. Docíleno je toho upravením chemického složení materiálu mřížky také mechanickým zpracováním.

4.2.4 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ

Díky extrémně malým průřezům, které se u tenzometru vyskytují hraje velkou roli stálost napětí. Již malá změna může způsobit nemalou proudovou zátěž, která má za důsledek změnu teploty tenzometru. Přehřátí tenzometru se následně projeví zkreslení vinou ohnutí podložky, creepu a nestabilitou nulového bodu. Výrobci tenzometrů nicméně stanovují, jaké může být maximální napěťové zatížení bez kreslení hodnot. U wattmetrů je to většinou dáno předepsáním baterie, která je pro daný model doporučena.

4.2.5 PŘÍČNÁ CITLIVOST

Ideální případ, kdy je tenzometr zatěžován pouze posouvající silou nenastává v praxi často. Měření tedy může ovlivnit příčné přetvoření při kombinovaném namáhání. V případě měření na klice bude tenzometr zatížen nejen tahem, ale také ohybem. Příčnou citlivost tenzometru q dostaneme ze vztahu:

$$q = \frac{k_t}{k_l} \quad (8)$$

Kde k_l nám značí deformační součinitel ve směru aktivního prodloužení

$$k_l = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l} \quad (9)$$

a k_t deformační součinitel ve směru kolmém na směr aktivního prodloužení.

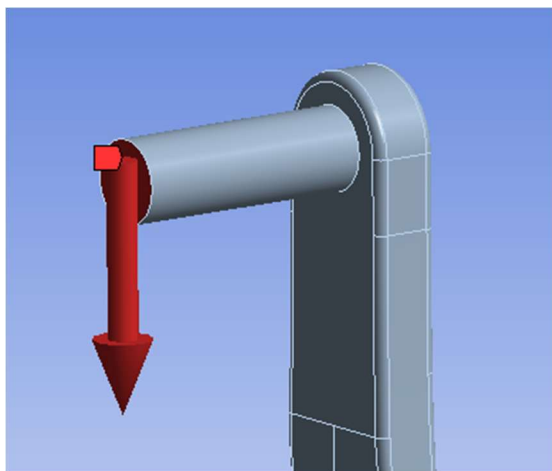
$$k_t = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_t} \quad (10)$$

Zamezit vliv příčné citlivosti nám pomůže zesílení na koncích jednotlivých smyček v měřicí mřížce. Přetvoření se zde bude koncentrovat a nebude ovlivňovat hodnoty. [12]

Hodnoty může ovlivnit i kontrakce měřeného materiálu při zatěžování. Hodnoty kontrakce jsou s ohledem na rozměry mřížek tenzometrů minimální a není tedy třeba klást na ně větší důraz.

5 SIMULACE V PROGRAMU ANSYS

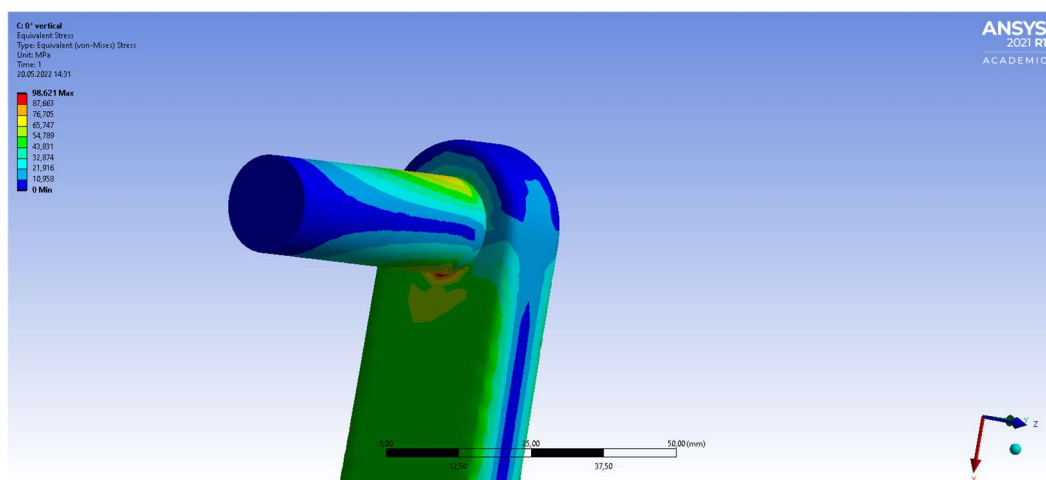
Jedním z cílů této práce, byla numerická simulace, pro jedno umístění wattmetru. Zvolil jsem umístění wattmetru na klice kola, které je nejdostupnější. Model klik s převodníkem a unašečem odpovídá reálnému, konkrétně Shimanu Deore XT[13]. Soustava byla zatížena konstantní silou umístěnou v ose jednoho pedálu.



Obrázek 10 Umístění síly

Síla byla zvolena konstantní 800 N. Tato síla odpovídá běžnému „postavení“ do pedálů. Sledováno bylo napětí, které je způsobeno zatěžující silou v místě umístění wattmetru na klice. Toto umístění je zobrazeno v obrázku 3. Síla je stála, tudíž by nám pro mělo vycházet stejné napětí při zatížení ve všech polohách.

Při zatížení ve výchozím stavu můžeme pozorovat napětí, které je po vnitřní straně kliky rozloženo téměř rovnoměrně. Napětí se dle očekávání koncentruje v bodech spojení mezi šlapátkem a klikou.



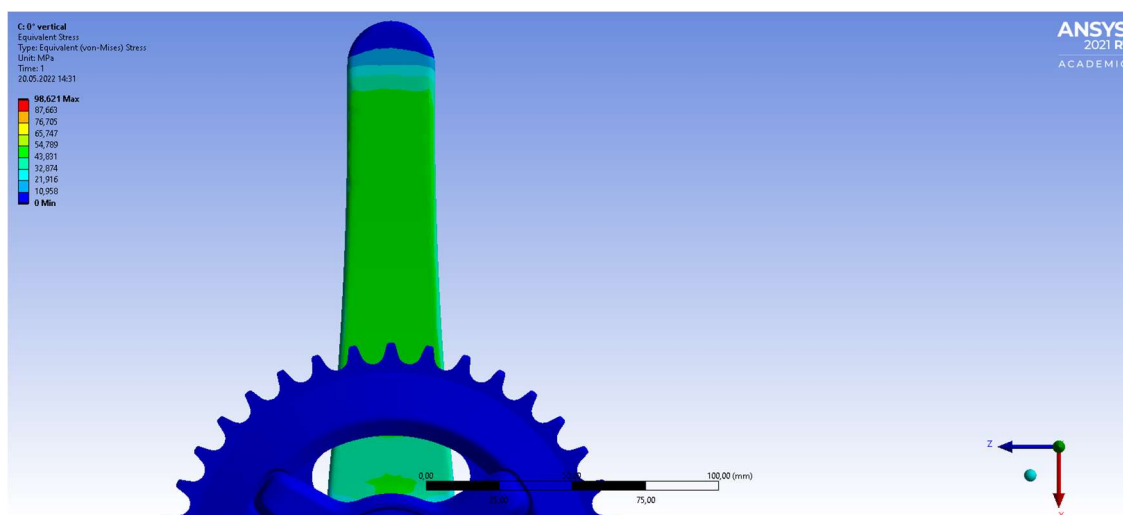
Obrázek 11 koncentrace napětí

Napětí bylo změřeno pro natočení dle tabulky 2. Největší napětí bylo dosaženo, když síla směřovala stejným směrem jako kliky. Síla se v těchto pozicích nejlépe přenáší na kliku.

Tab. 2 naměřené hodnoty při natočení

Natočení [°]	Napětí [MPa]
0	46,1
30	44,8
60	43,6
90	42,8
120	43,4
150	44,3
180	45,8

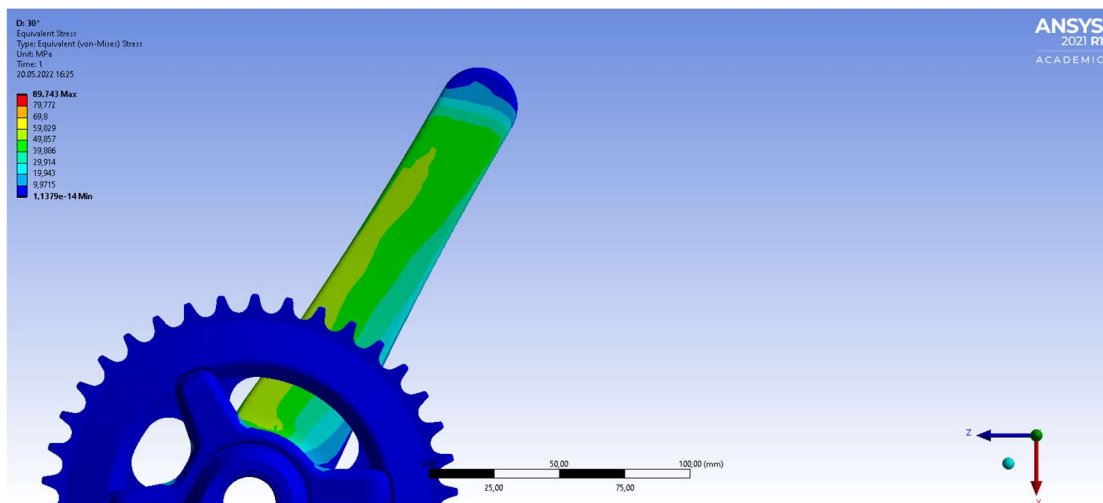
Hodnoty se liší kvůli nerovnoměrnému šíření napětí po klice kola. Při souhlasných směrech kliky a síly je napětí rozmístěno po klice téměř konstantně.



Obrázek 12 Rozložení napětí ve výchozí pozici

Při natáčení začne výrazněji působit i ohybový moment. Rozložení napětí se začíná koncentrovat u levého kraje kliky, který je vinou ohybového momentu prodlužován. Výsledné napětí, zde díky nerovnoměrnému rozložení lehce poklesne. Je to stanoveno extrémními hodnotami na krajích.

Pro zachování nejvíce reálné hodnoty napětí musíme tenzometr umístit na úplný střed kliky, kde je napětí nejméně ovlivněno ohybem. Hodnoty zde budou nejvíce odpovídat reálnému zatížení.



Obrázek 13 Rozložení napětí při natočení

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala možnostmi, jak může být určen mechanický výkon cyklisty a následně bylo jedno konstrukční řešení podrobeno numerické simulaci pro potvrzení správnosti měření.

V první kapitole jsou rozebrány největší odvětví cyklistik. Následně byla rozebrána náročnost těchto závodů, díky nimž je nutné co nejlepší rozdělení sil.

Ve druhé části jsou popsány možné způsoby pro sledování výkonu cyklisty. Tyto způsoby byly rozebrány, popsány potřebné komponenty pro jejich správnou funkci a následně zhodnoceny. U všech byly upozorovány nedokonalosti, kvůli kterým nebyly jejich data vypovídající.

Třetí kapitola představila wattmetr a ukázala jeho funkci. Je uveden jeho obrovský přínos pro cyklistiku, kdy jsme schopni na základě mechanického výkonu porovnat dva výkony naprosto přesně. Jsou ukázány přístroje, které mechanický výkon určují. Každý přístroj byl rozebrán a popsána jeho funkce, včetně komponentů, které k tomu využívá.

Ve čtvrté kapitole je rozebrán tenzometr, který je stěžejní součástí téměř všech wattmetrů. Ukázány jsou jednotlivé typy tenzometrů a také způsob jejich měření. Jsou zde rozebrány i vnější vlivy, které mají dopad na naměřené hodnoty.

V závěru práce byla provedena numerická simulace pomocí programu Ansys. Zde je rozebráno umístění wattmetru na klice kola a doporučeno umístění pro měření výkonu co nejpřesněji.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Odporové tenzometry – princip, provedení, použití, historie* [online]. 2017 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [2] *SRM* [online]. [cit. 2022-05-13]. Dostupné z: <http://www.srm.de/company/history/>
- [3] Wattmetr Inpeak. *Inpeak Store* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.inpeakstore.cz/powercrank-inpeak-shimano-xt-m8100/>
- [4] *Garmin* [online]. 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.garmin.com/cs-CZ/p/658593>
- [5] VON BROMLEY, Simon. *Best power meters in 2022* [online]. April 14, 2022 at 4:00 pm [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.bikeradar.com/advice/buyers-guides/best-power-meters/>
- [6] RUTTEOVÁ, Lenka. Tachometry na kolo a jejich nastavení. *Geek life* [online]. 8.2.2021 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.geeklife.cz/tachometry-na-kolo-a-jejich-nastaveni/>
- [7] MATTHEW, Josh. DIRECT VS. OPPOSING FORCE POWER METER. *Power meter city* [online]. February 23, 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://powermetercity.com/2016/04/04/direct-vs-opposing-force-power-meter/>
- [8] 2022 Power Meter Buyer's Guide. *Power meter city* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://powermetercity.com/power-meter-buyers-guide/>
- [9] VELOCOMP POWERPOD V5 POWER METER. In: *Power meter city* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://powermetercity.com/product/powerpod-power-meter/>
- [10] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *MĚŘÍCÍ A ŘÍDÍCÍ TECHNIKA* [online]. Praha, únor 2005 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/>. VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE FAKULTA CHEMICKO-INŽENÝRSKÁ.
- [11] SHIMANO MTB SRM POWERMETER. *SRM* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.srm.de/product/powermeters/shimano-xtr/>
- [12] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA* [online]. Brno, 2003 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf. VUT Brno.

- [13] *Shimano Deore XT crankset* [online]. June 2nd, 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/shimano-deore-xt-crankset-1>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
f	[Hz]	Frekvence
K	[-]	Součinitel deformační citlivosti
k	[-]	Deformační součinitel
k_l	[-]	Deformační součinitel podélného přetvoření
k_t	[-]	Deformační součinitel příčného přetvoření
M	[N·m]	Moment síly
n	[min ⁻¹]	Otáčky
O	[m]	Obvod
P	[W]	Výkon
q	[-]	Příčná citlivost
R	[Ω]	Odpor
T	[K]	Teplota
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost
α_G	[K ⁻¹]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti mřížky
α_S	[K ⁻¹]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu
β_G	[K ⁻¹]	Součinitel elektrického odporu mřížky
ε	[-]	Přetvoření
σ	[Pa]	Napětí