VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

KALIBRACE ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ MZGS-200 A SLEDOVÁNÍ ÚNAVOVÝCH EXPERIMENTŮ POMOCÍ LABVIEW

CALIBRATION OF THE TEST STAND MZGS-200 AND THE MONITORING OF FATIGUE EXPERIMENTS USING LABVIEW

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — JAKUB KLUS
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. KAREL SLÁMEČKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2011

Abstrakt
Bakalářská práce se zabývá kalibrací zkušebního zařízení MZGS-200 a způsobem záznamu a analýzy signálu z tenzometrů v průběhu únavových experimentů. V rámci práce byl teoreticky odvozen vztah pro síly působící na zkušební vzorek a vytvořeny dva programy sloužící ke kalibraci a záznamu experimentu v programovacím prostředí LabVIEW. Funkčnost obou programů byla prověřena při experimentálním zatěžování vzorků vyrobených z niklové superslitiny Inconel 713LC. Přesnost měření mechanického napětí pomocí tenzometrů byla ověřena srovnávacím měřením pomocí bezkontaktního laserového měřiče vzdálenosti optoNCDT.

Summary
This bachelor work concerns with the calibration method of the fatigue test stand MZGS-200, monitoring of fatigue experiments and analyzes signal retrieved from tenzometers. Work includes theoretical derivation of the equation describing force acting on the specimen. Two programs in LabVIEW environment were developed for calibration and measurements. The functionality of those programs was verified during fatigue experiments on specimens made of nickel-based superalloy Inconel 713LC. The measurements of mechanical loading by means of tenzometres were compared with optical measurements using noncontact laser sensor optoNCDT.

Klíčová slova
únava materiálu, MZGS-200, LabVIEW, optoNCDT

Keywords
fatigue, MZGS-200, LabVIEW, optoNCDT

KLUS, J. *Kalibrace zkušebního zařízení MZGS-200 a sledování únavových experimentů pomocí LabVIEW*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 27 s. Vedoucí Ing. Karel Slámečka, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Slámečky Ph.D.

Jakub Klus

Děkuji všem, kteří mi pomohli s vypracováním této práce, především těm, jež četnými připomínkami přispěli ke kvalitě této práce.

Jakub Klus

Obsah

Úvod . . . 3

1 Únava materiálu **4**
1.1 Základní pojmy . . . 4
1.2 Vznik a šíření únavových trhlin . . . 4
1.3 Únavové zkoušky . . . 4

2 Konstrukce a princip zařízení MZGS-200 **7**
2.1 Odvození vztahu . . . 7
2.2 Nastavení experimentu . . . 9
2.3 Elektrotechnická část MZGS-200 . . . 11
2.4 Princip tenzometrů . . . 11
2.4.1 Kovové fóliové tenzometry . . . 11
2.4.2 Měření mechanického napětí pomocí tenzometrů . . . 12

3 Vývoj programů pro kalibraci zařízení a záznam experimentu **14**
3.1 Popis řešení . . . 14
3.2 Prostředí LabVIEW . . . 14
3.3 Program pro kalibraci . . . 15
3.4 Program pro měření . . . 16
3.4.1 Čelní panel . . . 16
3.4.2 Zdrojový kód (blokový diagram) . . . 17
3.4.3 Omezení programu . . . 18

4 Měření a výsledky **19**
4.1 Měření kalibračních závislostí . . . 19
4.2 Záznam průběhu zatěžování . . . 19

5 Ověřující měření **21**
5.1 Laserový měřič vzdálenosti optoNCDT 1605 . . . 21
5.2 Kalibrace pomocí optoNCDT . . . 21
5.3 Měření průběhu zatěžování. . . . 22

6 Závěr **24**

7 Seznam použitých zkratek a symbolů **26**

8 Seznam příloh **27**

Úvod

Studium vlivu cyklického namáhání na mechanické vlastnosti materiálů je důležité vzhledem k faktu, že cyklicky je namáhána převážná většina strojních součástí. Únava je majoritní příčinou provozních lomů. Na běžně vybavených pracovištích lze studovat jednoosou únavu zejména tah/tlak; laboratoř mikromechaniky materiálů na Ústavu Fyzikálního Inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně umožňuje výzkum víceosého namáhání, konkrétně zatěžování kombinací krutu a ohybu. Problematika víceosého zatěžování je teoreticky složitější a na toto téma bylo vypracováno několik prací a článků, např [1], [2].

Cílem bakalářské práce bylo v programovém prostředí LabVIEW vytvořit uživatelské rozhraní, které umožní provádět kalibraci zařízení MZGS-200 pomocí statického zatížení sadou závaží a které současně umožní sledovat, zaznamenávat a analyzovat signál v průběhu únavových experimentů. Záznam průběhu zatížení slouží k verifikaci požadovaných hodnot, eventuálně může být využit pro odhad délky etapy iniciace únavové trhliny.

Práce má následující členění. V první kapitole je pojednáno o únavě teoreticky. Ve druhé kapitole je popsána konstrukce zařízení MZGS-200 a použité snímače. Kapitola 3 se zabývá programovacím prostředím LabVIEW a zpracováním signálu. V další části je popsán program pro kalibraci MZGS-200 vytvořený v LabVIEW, vysvětlen způsob jeho použití a diskutována jeho omezení. Obsahem následující kapitoly je ukázka kalibrace a měření reálných dat provedených v rámci zkoušek zkušebních těles vyrobených z niklové superslitiny Inconel 715 LC. V poslední kapitole je popsána kalibrace zařízení pomocí laserového měřiče vzdálenosti optoNCDT 1605. Tato data byla použita pro ověření správné funkčnosti tenzometrů. Přílohou práce je pak ukázka kalibračních protokolů a DVD s vytvořenými programy.

1. Únava materiálu

1.1. Základní pojmy

Únava je degradační proces, ke kterému dochází v důsledku opakované zátěže. Časově proměnlivé zatěžování může být vyvoláno různými způsoby a při únavovém procesu se mohou uplatňovat různé poškozovací mechanismy. Při čistě mechanickém působení hovoříme o mechanické únavě. Je-li zatěžování způsobeno změnami teplotního pole, jedná se o teplotní únavu a konečně, dochází-li ke vzniku únavové trhliny v důsledku opakovaného dotyku dvou povrchů hovoříme o kontaktní nebo třecí únavě. Běžná je kombinace několika zdrojů zatížení a případné působení dalších degradačních procesů, především koroze [1].

Mechanická únava se vyskytuje ve všech inženýrských aplikacích. Proto při konstrukci komponent automobilů, letadel či lopatek turbín je nutné neustále s tímto faktorem počítat. To platí i pro běžné výrobky, kterými jsou například boty, vystavované cyklickému namáhání a to v podobě tahu, tlaku, ohybu, vibrací a jiných vlivů [3].Přestože namáhání obvykle nepřesahuje mez kluzu materiálu, po určitém počtu cyklů může dojít ke vzniku únavové trhliny, jejímu šíření a finálnímu porušení součásti.

1.2. Vznik a šíření únavových trhlin

Únavový proces se zpravidla skládá ze tří fází. Nejdříve se vytvoří mikrotrhlina, a to většinou na povrchu vzorku, zpravidla po určité době od začátku zatěžování [3]. Trhlina vzniká v oblasti největší koncentrace napětí, tedy v místech defektů, škrábanců, inkluzí či hranic zrn. Trhlina se dále pozvolna šíří díky opakovanému zatěžování. V závěrečné fázi zbývající průřez nemá dostatečnou nosnost a vzorek je zlomen.

Únavový proces je podmíněn přítomností nevratné cyklické plastické deformace. Podle její míry a rozsahu je rozlišena nízkocyklová únava, při níž deformace probíhá ve velkém objemu, případně v celém tělese. Takovému působení jsou vystavovány například tlakové nádoby. Dalším druhem je vysokocyklová únava, kdy k plastické deformaci dochází pouze lokálně v měřítku strukturních jednotek materiálu. Takto jsou namáhány běžné strojírenské součásti jako hřídele. Hranice mezi nízkocyklovou a vysokocyklovou únavou bývá definována celkovou životností do lomu N_f kladenou do intervalu 10^3 až 10^5 cyklů. V dnešní době je vzrůstající zájem o zatěžování za hranicí vysokocyklové únavy, o tzv. „gigacyklovou“ únavu. O gigacyklovou únavu se jedná, když počet cyklů do lomu přesáhne tzv. základní počet cyklů normativně stanovený hranicí $N_f = 10^7$ cyklů pro oceli, litiny, měď a její slitiny a $N_f = 10^8$ cyklů pro lehké kovy a jejich slitiny [1].

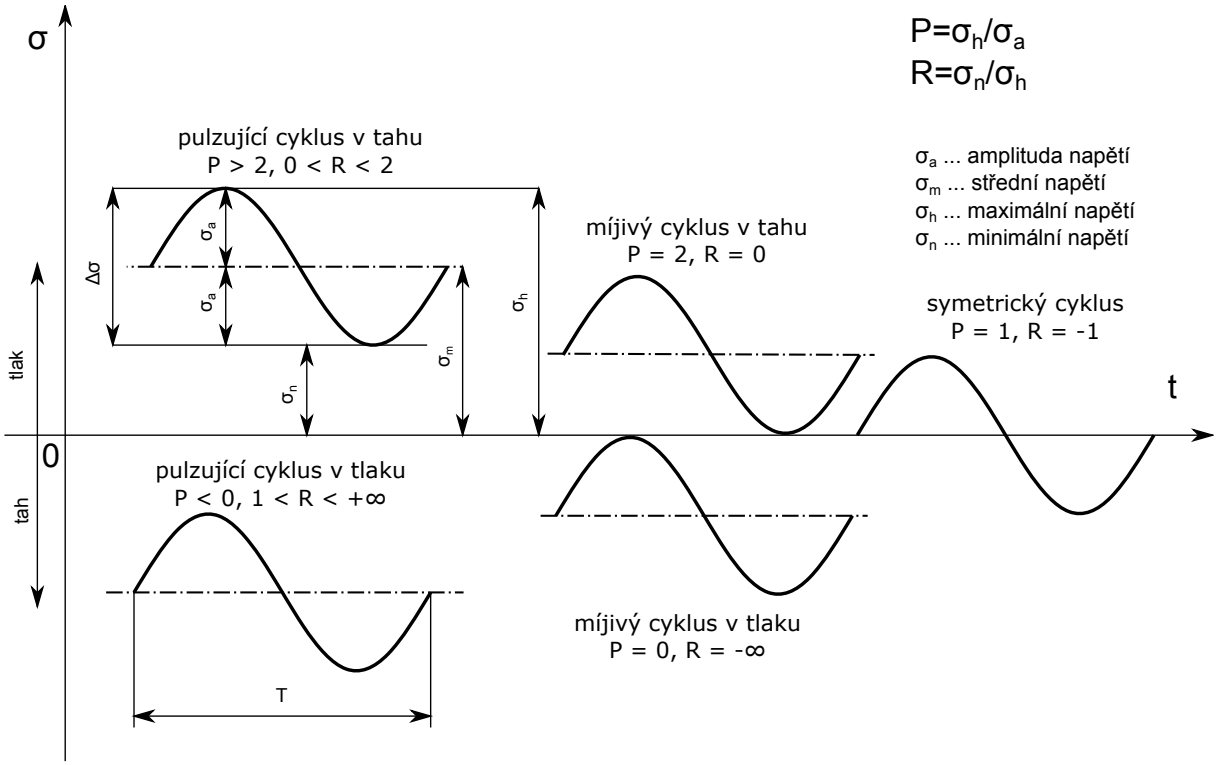
1.3. Únavové zkoušky

Studium únavy je prováděno na únavových strojích, které definovaným způsobem namáhají vzorek. Vzorky jsou zpravidla namáhány tak dlouho, dokud nedojde k lomu. Přitom je zaznamenáván počet cyklů, který byl k lomu při daném zatížení potřeba. Časový průběh zatížení je obvykle harmonický (stejně jako v případě zařízení MZGS-200), ale existují také stroje umožňující aplikovat zatížení s jiným časovým průběhem (obdélníkový, trojúhelníkový, apod.). Běžný je rovněž výzkum únavy při náhodném zatěžování.

Při harmonickém zatěžování je časový průběh jednotlivých složek tenzoru napětí popsán vztahem:

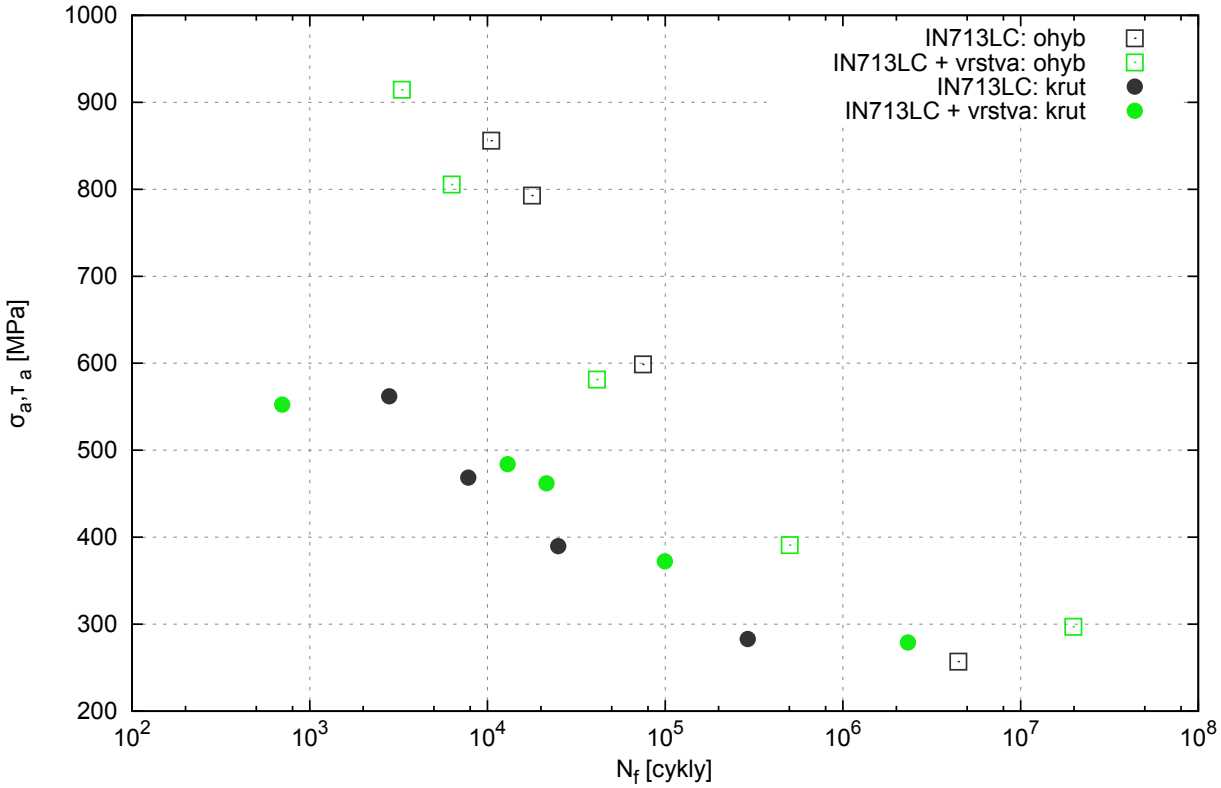
$$\sigma_{ij} = \sigma_{ijm} + \sigma_{ija} \sin\left(\omega_{ij} t + \varphi_{ij}\right), \tag{1.1}$$

kde σ_{ijm} je střední napětí, σ_{ija} je amplituda, ω_{ij} je úhlová rychlost a φ_{ij} fázové posunutí příslušné složky. Vztah mezi σ_{ija} a σ_{ijm} lze popsat pomocí parametrů asymetrie R nebo P. Na obrázku 1.1 je ukázka definování parametrů pro tah/tlak.



Obrázek 1.1: Základní způsoby zatěžování tah/tlak.

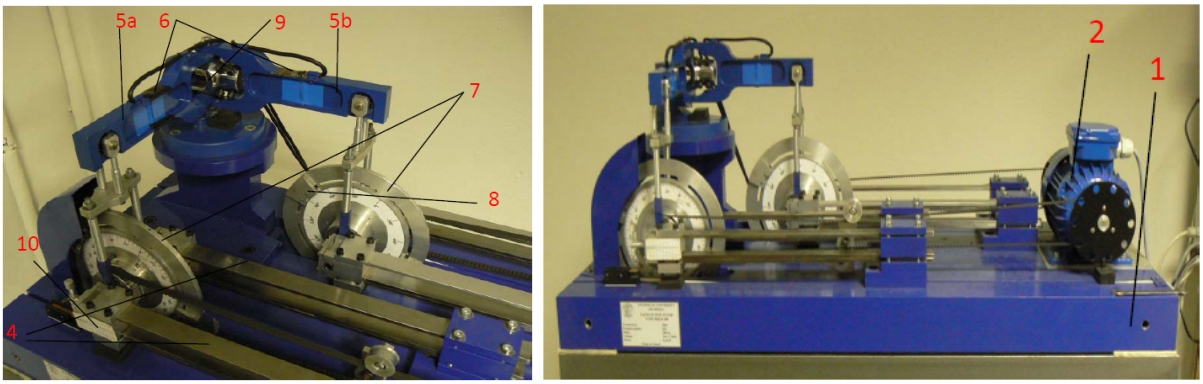
Výsledky únavových zkoušek lze zanést do tzv. Wöhlerovy křivky, která vyznačuje závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů do lomu N_f. Osa x, do níž je zanesen počet cyklů, je zpravidla v logaritmické škále, jelikož počet cyklů do lomu s klesajícím napětím řádově narůstá. Z Wöhlerovy křivky pak lze odečíst mez únavy σ_c, tj. napětí, při kterém vzorek vydrží 10^7 nebo více cyklů zatěžování, viz kap. 1.2. Dále je možné určit parametry jako únavovou životnost, čili počet cyklů do porušení vzorku pro dané napětí, nebo časovanou únavovou pevnost σ_{NC}, tj. napětí, při kterém dojde k lomu po určitém počtu cyklů. Příklad Wöhlerovy křivky je uveden na obrázku 1.2. Jedná se o výsledky únavových zkoušek ohybem a krutem zjištěné na tělesech vyrobených z niklové superslitiny Inconel 713LC bez a s difuzní Al vrstvou. Rozdílný vliv vrstvy na únavovou životnost v ohybu a krutu je zapříčiněn rozdílným mikromechanismem iniciace trhliny v jednotlivých případech [4].



Obrázek 1.2: Ukázka Wöhlerovy křivky, σ_a je amplituda napětí v ohybu, τ_a je amplituda napětí v krutu.

2. Konstrukce a princip zařízení MZGS-200

Únavový stroj MZGS-200 slouží k únavovým zkouškám konstrukčních materiálů při biaxiálním zátěžném režimu. Vzorek může být namáhán libovolnou kombinací krutového a ohybového momentu cyklicky se měnících se stejnou frekvencí (tzv. synchronní namáhání). Mezi oběmi složkami lze nastavit fázový posun φ v rozmezí 0–π. Maximální amplituda momentu pro krut i ohyb je 110 Nm [5].



Obrázek 2.1: Zařízení MZGS-200.

Rám přístroje tvoří čtyři nohy vyrobené z konstrukční oceli, na kterých je pomocí čtyř šroubů připevněna masivní litinová deska (1), obrázek 2.1. Spodní část je vyplněna betonem a přes silentbloky upevněna do země z důvodu zvýšení stability a omezení vibrací. Na jedné části litinové desky je motor (2), který pohání pomocí klínových řemenů dva disky (7) se dvěma páry závaží (8). Každý disk je připevněn k páru listových per (4). Moment, který vzniká rotací nevyvážených disků je pomocí pák (5a, 5b) přenesen na hlavici (9), ve které je upevněn vzorek.

Příčinou harmonického pohybu obou pák, který způsobuje cyklické namáhání vzorku, jsou setrvačné síly, které vzniknou rotací dvou závaží o stejných hmotnostech m, připevněných k diskům vibrátorů [2]. V provozním manuálu [5] je vztah pro velikost setrvačné síly způsobené rotací závaží uveden bez důkazu jako:

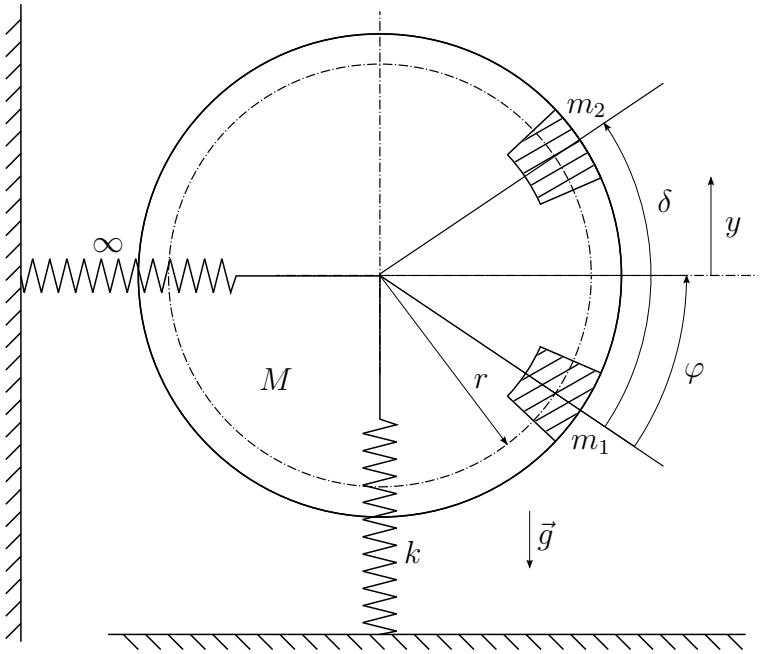
$$F = \frac{1}{2} m r \nu^2 \sqrt{2\,(1 + \cos\delta)}, \tag{2.1}$$

kde m je hmotnost obou závaží na jednom disku, ν je úhlová frekvence otáčení, r je vzdálenost závaží od středu otáčení (poloměr disku), δ je úhel vzájemné polohy obou závaží.

2.1. Odvození vztahu

Pomocí aparátu teoretické mechaniky je odvozen vztah (2.1). Reálnou situaci lze nahradit následujícím modelem (viz obrázek 2.2). Disk o hmotnosti M a poloměru r rotuje kolem své osy konstantní úhlovou rychlostí ω. Na něm jsou umístěna dvě stejná závaží o hmotnostech $m_1 = m_2 = \frac{m}{2}$. Disk je připevněn k pružině o tuhosti k a omezen v horizontálním směru (pružinou s nekonečnou tuhostí). Model má tedy dva stupně volnosti: úhel natočení

disku φ a polohu středu na vertikální ose y. Pro jednoduchost lze volit souřadný systém, ve kterém je pružina v nezatížené poloze pro $y = 0$. Na všechny hmotné části působí gravitační zrychlení $\vec{g}$ v záporném směru osy y. Kinetická energie T tohoto systému je



Obrázek 2.2: Náčrt zadání.

součtem kinetických energií jednotlivých částí:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{4}m\dot{\varphi}^2 r^2 \sin^2\varphi + \frac{1}{4}m\dot{\varphi}^2 \sin^2(\varphi+\delta) + \frac{1}{4}m\left(\dot{\varphi}r\cos\varphi + \dot{y}\right)^2 + \\ &\quad \frac{1}{4}m\left(\dot{\varphi}r\cos(\varphi+\delta) + \dot{y}\right)^2 + \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}I_M\dot{\varphi}^2. \end{aligned} \tag{2.2}$$

Potenciální energie je způsobena gravitačním polem a tuhostí pružiny:

$$V = \frac{1}{2}mg\left(r\sin\varphi + y\right) + \frac{1}{2}mg\left(r\sin(\varphi+\delta) + y\right) + Mgy + \frac{1}{2}ky^2. \tag{2.3}$$

Lagrangián L je rozdíl kinetické a potenciální energie:

$$\begin{aligned} L = T - V &= \frac{1}{2}m\dot{\varphi}^2 r^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + \frac{1}{2}m\dot{y}\dot{\varphi}r\left(\cos\varphi + \cos(\varphi+\delta)\right) + \frac{1}{2}M\dot{y}^2 + \frac{1}{2}I_M\dot{\varphi}^2 - \\ &\quad mgy - \frac{1}{2}mgr\left(\sin\varphi + \sin(\varphi+\delta)\right) - Mgy - \frac{1}{2}ky^2. \end{aligned} \tag{2.4}$$

Nyní je potřeba sestavit Eulerovu-Lagrangeovu rovnici pro obě zadané souřadnice:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right) = \frac{\partial L}{\partial \varphi}, \tag{2.5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}}\right) = \frac{\partial L}{\partial y}. \tag{2.6}$$

Dosazením (2.4) do (2.5) a (2.6) lze napsat rovnice popisující tento konkrétní problém, nejprve pro (2.5):

$$m\ddot{\varphi}r^2 + \frac{1}{2}mr\left(\ddot{y} + g\right)\left(\cos\varphi\cos(\varphi+\delta)\right) + I_M\ddot{\varphi} = 0, \tag{2.7}$$

a dále pro (2.6):

$$(M+m)(\ddot{y}+g)-\frac{1}{2}m\dot{\varphi}^2 r\left(\sin\varphi+\sin(\varphi+\delta)\right)+\frac{1}{2}m\ddot{\varphi}r\left(\cos\varphi+\cos(\varphi+\delta)\right)+ky=0. \tag{2.8}$$

Protože se disk otáčí konstantní úhlovou rychlostí $\dot{\varphi}=\omega=$konst. je úhlové zrychlení $\ddot{\varphi}$ nulové. Vztah (2.7) se zjednoduší na následující tvar:

$$\frac{1}{2}mr\left(\ddot{y}-g\right)\left(\cos\varphi+\cos(\varphi+\delta)\right)=0. \tag{2.9}$$

Rovnice (2.9) má dvě řešení:

$$\cos\varphi = -\cos(\varphi+\delta), \tag{2.10}$$

$$\ddot{y} = -g \tag{2.11}$$

Řešení (2.10) znamená, že $\delta=\pi$ a závaží jsou naproti sobě, disk je vyvážený a souřadnice y se nemění. Toto řešení není nutné dále rozebírat, nevede k zajímavému výsledku. Naopak po dosazení rovnice (2.11) do(2.8), lze získat rovnici:

$$\frac{1}{2}m\omega^2 r\left(\sin\varphi+\sin(\varphi+\delta)\right)=-ky=F.$$

S využitím vztahů:

$$\sin\varphi+\sin(\varphi+\delta) = 2\sin\left(\varphi+\frac{\delta}{2}\right)\cos\left(\frac{\delta}{2}\right), \tag{2.12}$$

$$\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = \sqrt{\frac{1+\cos\delta}{2}}, \tag{2.13}$$

lze nalézt závislost síly na čase:

$$F(t)=\frac{1}{2}m\omega^2 r\sin\left(\omega t+\frac{\delta}{2}\right)\sqrt{2\left(1+\cos\delta\right)}. \tag{2.14}$$

Amplituda síly pak je:

$$F=\frac{1}{2}m\omega^2 r\sqrt{2\left(1+\cos\delta\right)}. \tag{2.15}$$

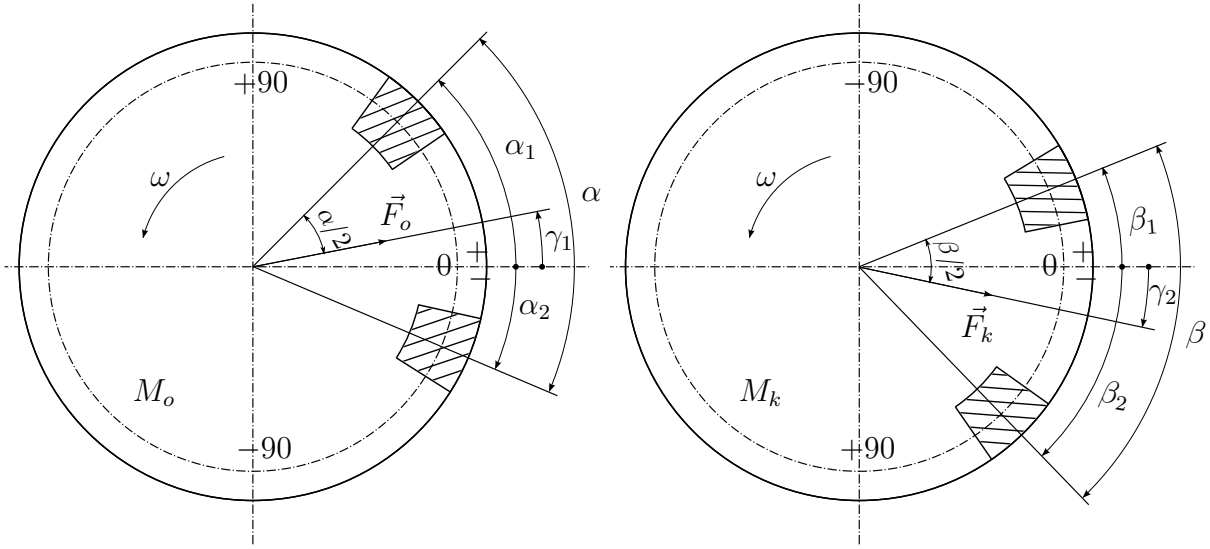
Tento vztah je shodný se vztahem (2.1).

2.2. Nastavení experimentu

Před únavovou zkouškou je potřeba nastavit závaží na discích do polohy odpovídající požadovaným amplitudám ohybového a krutového momentu M_o a M_k a fázového posunu φ. Toho lze docílit vhodnou volbou vzájemného úhlového natočení obou párů závaží (α,β). Úhel vyjádříme z (2.1) samostatně pro ohyb a krut:

$$\delta_o = \alpha = 2\arccos\frac{M_o}{mr\nu^2 l}, \tag{2.16}$$

$$\delta_k = \beta = 2\arccos\frac{M_k}{mr\nu^2 l}, \tag{2.17}$$



Obrázek 2.3: Volba úhlů pro nastavení experimentu [5].

kde l je délka páky. Protože hmotnost závaží ani délka páky se nemění, je pro danou hodnotu úhlové rychlosti ω výraz $mr\omega^2$ konstantní a α a β jsou závislé pouze na požadovaných velikostech amplitud ohybového a krutového momentu M_o a M_k.

Z obrázku 2.3 je patrné, že fázový posun φ lze získat sečtením úhlů γ_1 a γ_2. Pro tyto úhly je možné postupně odvodit následující vztahy:

$$\gamma_1 = \alpha_1 - \frac{\alpha}{2}, \tag{2.18}$$

$$\gamma_2 = \beta_2 - \frac{\beta}{2}, \tag{2.19}$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \alpha_1 - \frac{\alpha}{2} + \beta_2 - \frac{\beta}{2} = \varphi, \tag{2.20}$$

$$\alpha_1 + \beta_2 = \varphi + \frac{1}{2}(\alpha + \beta). \tag{2.21}$$

Vzhledem k tom, že rovnice (2.21) obsahuje dvě neznámé α_1 a β_2, musí být jedna z nich volena, druhá pak je dopočítána. Za předpokladu, že

$$\alpha_1 - \alpha = \alpha_2 \leq -12,5^\circ, \tag{2.22}$$

který je dán konstrukčním omezením zařízení, lze pak určit β_2:

$$\beta_2 = \varphi + \frac{1}{2}(\alpha + \beta) - \alpha_1. \tag{2.23}$$

Také úhel β_2 musí splňovat podmínku:

$$\beta_2 - \beta = \beta_1 \leq -12,5^\circ \tag{2.24}$$

Rovnice (2.16), (2.17), (2.22), (2.23) a (2.24) jsou použity k výpočtu nastavení fázového posunu i amplitud obou zatěžovacích momentů.

2.3. Elektrotechnická část MZGS-200

Součástí sestavy je řídící jednotka, která umožňuje zapnutí motoru a následné nastavení pracovní frekvence namáhání. Frekvence je odečítána dekodérem, umístěným na ose motoru [6]. Dekodér je tvořen diskem s otvory upevněným na ose motoru a optickou branou, která pohyb otvorů převádí na napěťový signál, který je dále zpracován v digitálním měřiči frekvence Tachometer Kübler 522. Pohyb motoru řídí jednotka Altivar 28, která na základě vstupních informací z tachometru kontroluje frekvenci otáčení motoru.

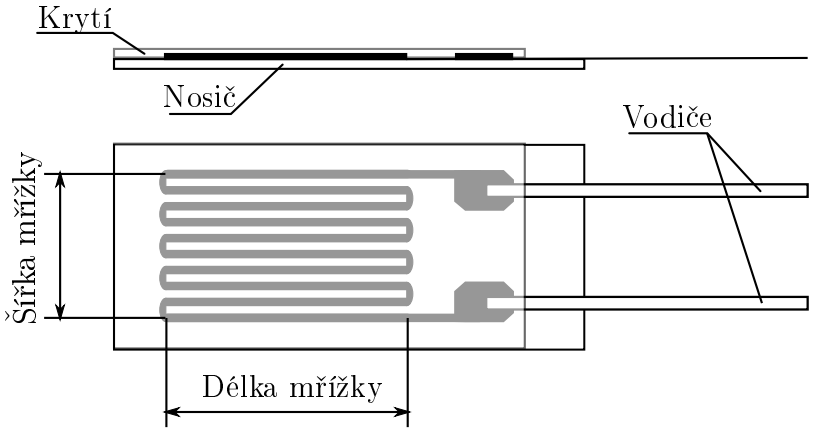
Další veličinou zobrazovanou na panelu řídící jednotky je aktuální počet zátěžných cyklů. Automatické vypnutí stroje je řešeno pomocí dotykových spínačů, které jsou sepnuty při velké amplitudě výchylky související se vznikem makroskopické trhliny, případně s úplným porušením vzorku.

Za účelem sledování a zaznamenávání časového průběhu jednotlivých složek zatížení během experimentu je na každé páce umístěn úplný tenzometrický můstek. Signál z tenzometrů je zesílen zesilovačem a přes vstupní BNC konektorový blok veden do měřící karty PCI-6221 M firmy National Instruments. Signál je ukládán a analyzován v osobním počítači.

2.4. Princip tenzometrů

Tenzometry slouží k převodu mechanického napětí na napětí elektrické, které je zaznamenáváno. Existují dva druhy tenzometrů: kovové a polovodičové. Kovové tenzometry vynikají přesností a linearitou převodu, avšak jejich odpor je závislý i na teplotě. Polovodičové tenzometry mají naopak několikrát větší citlivost, ale jsou silně nelineární [7]. Kovové tenzometry lze rozdělit do tří skupin: drátové, vrstvové a fóliové. Drátové tenzometry jsou lepené nebo volně ložené drátky orientované ve směru namáhání. Vrstvové tenzometry mohou být vakuově naneseny nebo naprášeny. Zařízení MZGS-200 využívá kovové fóliové tenzometry, proto se další text zabývá právě jimi.

2.4.1. Kovové fóliové tenzometry



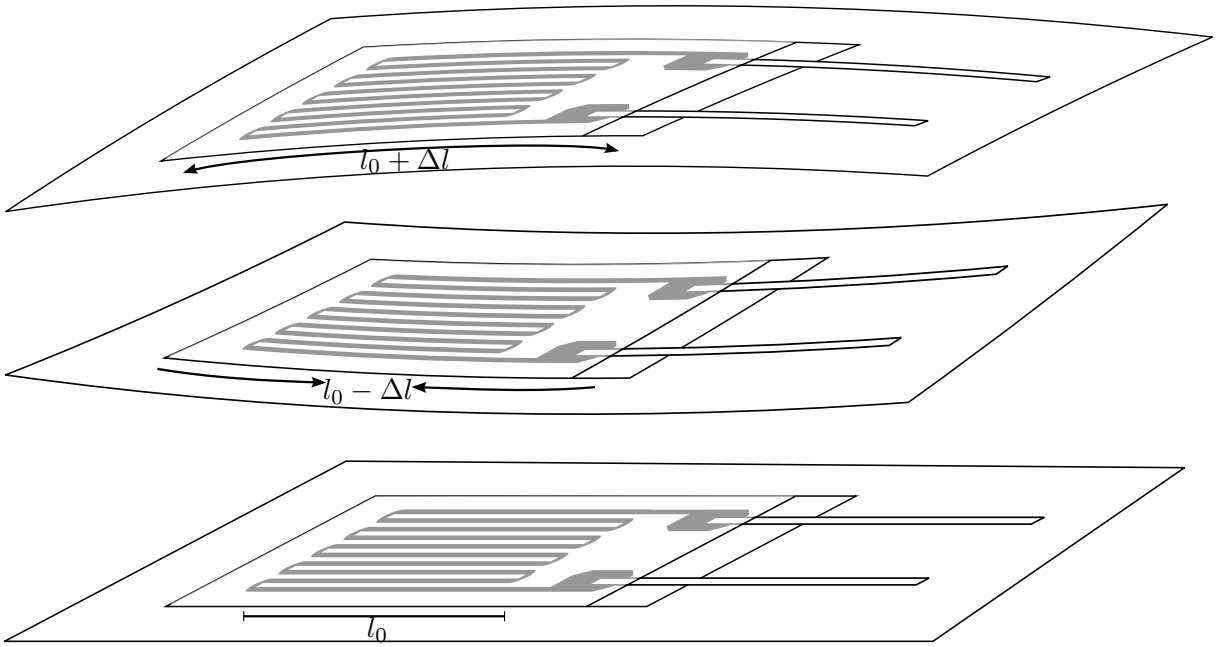
Obrázek 2.4: Schéma fóliového tenzometru [8].

Obrázek 2.4 zobrazuje zjednodušené schéma fóliového tenzometru. Na nosné izolační vrstvě (nosič) obdélníkového tvaru o tloušťce 20 až 50 μm, která je z polyamidu nebo

sklem vyztuženého fenolového filmu, je upevněn měřící odporový meandr (měřící mřížka) o tloušťce 3 až 6 μm, určité délky, šířky a klidového odporu R_0 (obvykle 100, 120, 350, 700 nebo 1000 Ω). Meandr je zpravidla vyráběn fotolitograficky z kovových fólií konstantanu (55% Cu a 45% Ni) nebo karmy (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%) [8]. Na povrchu je pak senzor chráněn krycí vrstvou tloušťky okolo 30 μm a vyvedeny jsou buď pájitelné plošky nebo přímo vodiče. Takové provedení tenzometru velmi dobře kopíruje měřenou deformaci.

2.4.2. Měření mechanického napětí pomocí tenzometrů

Jak je naznačeno na obrázku 2.5, u kovových fóliových tenzometrů je změna ohmického



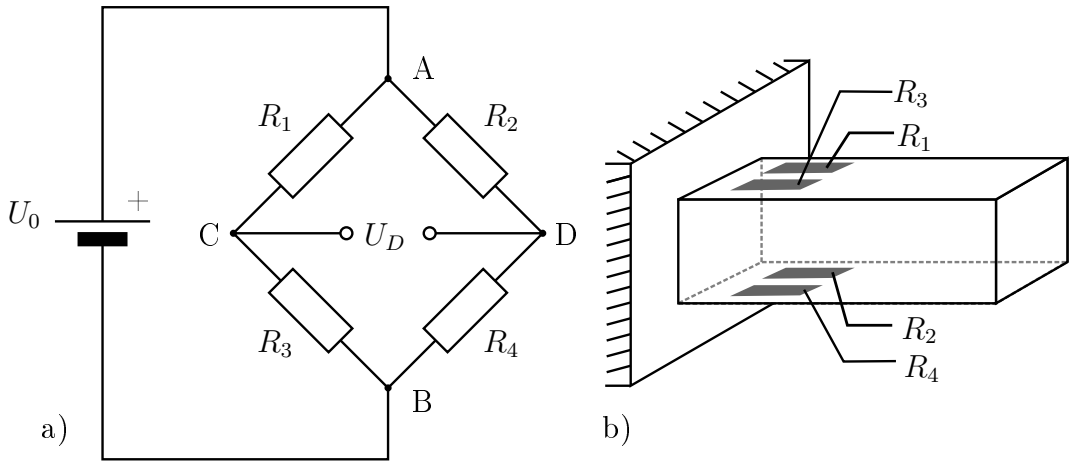
Obrázek 2.5: Schématické znázornění změny délky tenzometru v závislosti na deformaci.

odporu způsobena změnou délky drátku měřicí mřížky Δl a změnou jeho průřezu. Závislost odporu na geometrických parametrech drátku je následující:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \tag{2.25}$$

kde ρ je měrný elektrický odpor materiálu ze kterého je drátek vyroben, l je délka a S je průřez drátku. Pro měření odporu je používán tzv. Wheatstonův můstek (viz obrázek 2.6a). Můstek je napájen stejnosměrným napětím U_0 mezi body A a B, napětí U_D způsobené odpory je pak mezi C a D měřeno.

Tento můstek se používá k měření relativních změn odporu. Pokud mají nezatížené tenzometry stejný odpor, říká se, že můstek je vyvážený, a mezi uzly C a D je nulové napětí. V reálných aplikacích jsou však tenzometry vždy přilepeny s určitým předpětím, a nezatíženému stavu tenzometrů odpovídá nenulové nominální napětí. Změna relativních odporů $\frac{\Delta R}{R_0}$, kde R_0 je klidový odpor a $\Delta R = R - R_0$ je změna odporu způsobená prodloužením (zkrácením) drátku, způsobí změnu napětí U_D. Změny v napětí jsou v řádech μV, proto je nutné použití citlivých zesilovačů. Na obrázku 2.6b je zapojení „úplného“ tenzometrického můstku. Zapojení lze uspořádat i do tzv.„polovičního“ můstku tak, že



Obrázek 2.6: Wheatstonův můstek: a) použití při měření deformace b) skutečné umístění při měření.

tenzometry R_2 a R_4 nahradíme rezistory o odporu $R = R_0$, kde R_0 je klidový odpor tenzometrů R_3 a R_1. Zapojení do úplného můstku vyvažuje teplotní závislost kovových tenzometrů (všechny rezistory jsou stejně teplotně vychýleny) a také zvyšuje přesnost a absolutní velikost signálu.

3. Vývoj programů pro kalibraci zařízení a záznam experimentu

3.1. Popis řešení

Cílem práce bylo provést kalibraci zařízení MZGS-200 a pořídit dáznam dat v průběhu únavového experimentu. Tato úloha byla rozdělena na dva problémy, jedním je kalibrace, druhým její načtení a uložení průběhu zatěžování. K tomuto účelu byly v prostředí LabVIEW vytvořeny dva samostatné programy.

Hlavním účelem kalibrace je stanovit vzorec přepočtu elektrického napětí na mechanický moment. Kalibrace zařízení je prováděna v programu pro kalibraci na základě statického zatížení páky sadou závaží a odečtením odpovídajícího elektrického napětí z tenzometrického můstku umístěného na kalibrované páce. Mimo série dvojic zatížení/napětí je posouzen rovněž signál z páky zatížené vlastní vahou a z páky volně ležící na podložce.

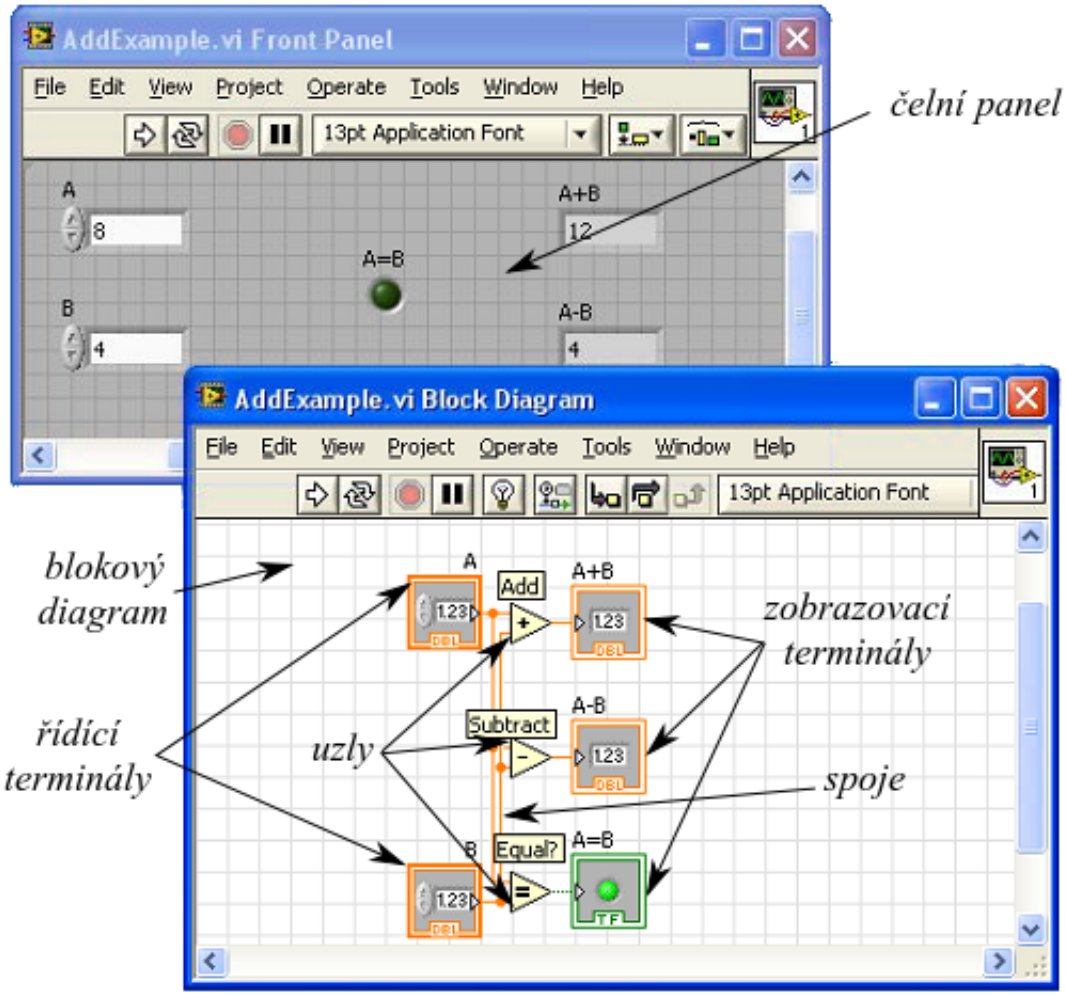
Záznam dat během experimentu a jejich analýzu obstarává program pro měření. Pro zaznamenání průběhu experimentu je nutné znát kalibraci pro daný materiál a typ vzorku. Protože experiment může trvat i několik dní, není nutné ukládat všechny naměřené hodnoty, postačí pouze lokální minima a maxima.

3.2. Prostředí LabVIEW

Vývoj programovacího prostředí LabVIEW odstartovalo v roce 1983 uvedení desky pro rozhraní GPIB z produkce firmy National Instruments (NI). Tuto firmu založili v roce 1976 James Truchard, Jeffrey Kodosky a William Nowlin v době, kdy pracovali na aplikacích sonaru pro americké námořnictvo na Texaské univerzitě v Austinu [9].

LabView je vlastně rozhraní pro programování grafického jazyka „G“. Výchozím předpokladem vzniku tohoto jazyka byla představa, aby technik, který je schopen zapsat své poznatky a požadavky do blokového schématu, mohl intuitivně sestavit zdrojový kód programu. Uživatelské rozhraní programu v LabVIEW má obvykle podobu čelního ovládacího panelu určitého měřícího přístroje. To je jeden z důvodů, proč se program v LabVIEW nazývá pojmem zdánlivý (virtuální) přístroj – VI (*Virtual Instrument*). Každý VI se skládá ze dvou sdružených (asociovaných) oken: z uživatelského rozhraní, kterému se v terminologii LabVIEW říká čelní panel (*Front Panel*), a z blokového diagramu (*Block Diagram*), který je zdrojovým kódem VI, obrázek 3.1.

Zdrojový kód tvoří grafické objekty, které mohou být typu uzel, terminál nebo spoj. Uzel (*Node*) je prvkem pro vykonání programu, existují tři typy uzlů: funkce, SubVI a struktura. Uzly typu funkce umožňují provádět různé základní operace (sčítání, práce se soubory apod.) a jsou tedy základními prvky blokového diagramu. Uzly typu SubVI reprezentují uživatelské podprogramy. Uzly typu struktura slouží pro řízení průběhu vykonávání programu (smyčka While, For apod.). Terminál (*Terminal*) je branou, kterou prochází data mezi čelním panelem a blokovým diagramem. Terminály se dělí na zdrojové (*Source*), resp. ovládací (*Control*), což jsou počátky datových cest, a koncové (*Destination*), příp. zobrazovací (*Indicator*), což jsou konce datových cest. Spoje slouží k propojení prvků blokového diagramu. Vykonávání program v LabVIEW je řízeno datovým tokem



Obrázek 3.1: Příklad VI užívající základní prvky programování v LabVIEW [9].

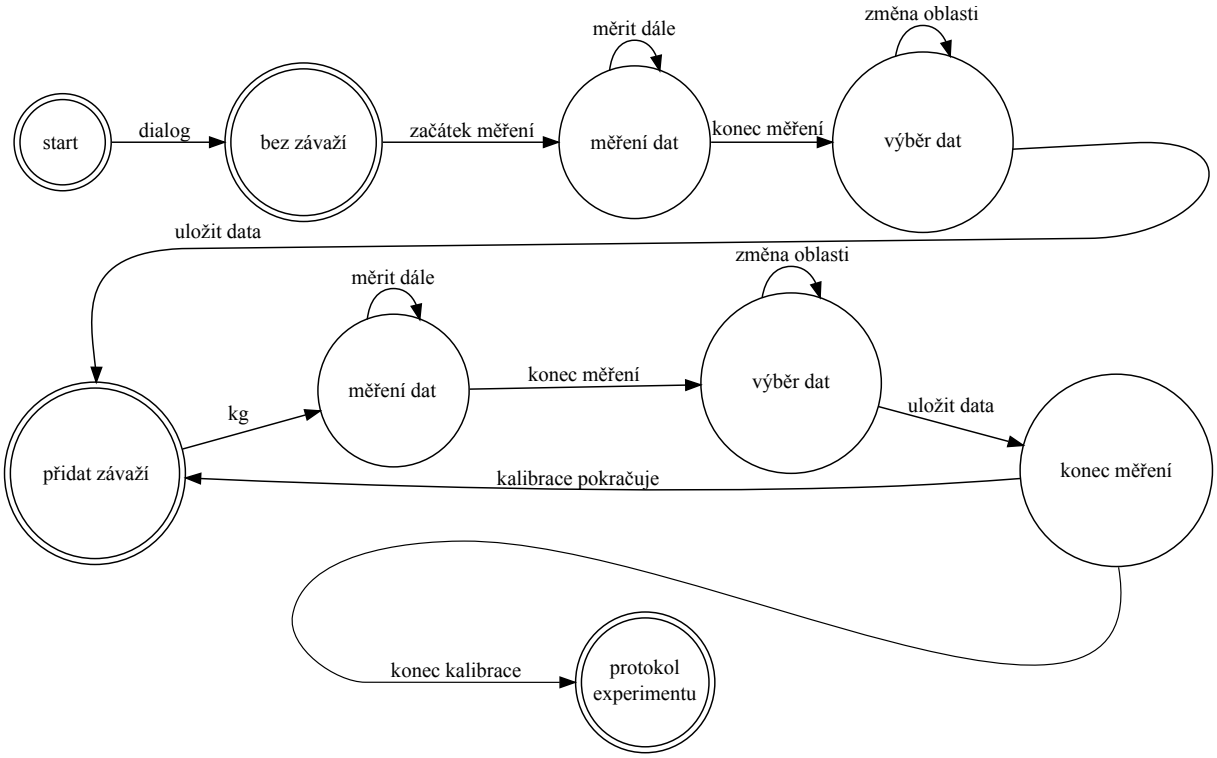
(*Data Flow*) a nikoli postupným vykonáváním řádků kódu[1]. Zpracování v jednotlivých uzlech blokového diagramu se provede tehdy, jsou-li na všech jeho vstupech informace potřebné k jeho provedení. Po ukončení zpracování jsou na výstupu definované informace, které jsou odeslány dále [9].

Čelní panel tvoří uživatelské rozhraní aplikace a určuje její vzhled a chování. Pomocí objektů (ovládací a indikační prvky) lze řídit běh aplikace, zadávat parametry a získávat informace o zpracovaných výsledcích.

3.3. Program pro kalibraci

Program je zjednodušeně popsán obrázkem 3.2, kružnice, které představují blok programu jsou stavy, šipky, které představují uživatelské vstupy, jsou v dalším textu nazvány akce. Stavy mající zvláštní význam jsou ohraničeny dvěmi kružnicemi. V programu pro kalibraci bylo použito struktury pro sekvenční programování (*flat sequence*), která zajišťuje postupné provádění programu zleva doprava.

[1] Jak je obvyklé u textových programovacích jazyků tzv. řízený tok angl. *Control flow*.



Obrázek 3.2: Zjednodušený vývojový diagram kalibrace.

Nejdříve jsou inicializovány všechny ovládací prvky na výchozí hodnoty (stav start). Zadáním údajů o vzorku (akce dialog), které je realizováno modálním SubVI, pokračuje program do dalšího kroku, kterým je měření dat pro nezatíženou páku (stav bez závaží). Samotné měření (stav měření dat) je možné kdykoli ukončit pomocí tlačítka „Konec měření“ (akce konec měření). Ve stavu „výběr dat“ uživatel akcí „změna oblasti“ vybírá data, která jsou použita pro výpočet střední hodnoty a směrodatné odchylky naměřené veličiny[2]. Akcí „uložit data“ jsou střední hodnota a směrodatná odchylka uloženy.

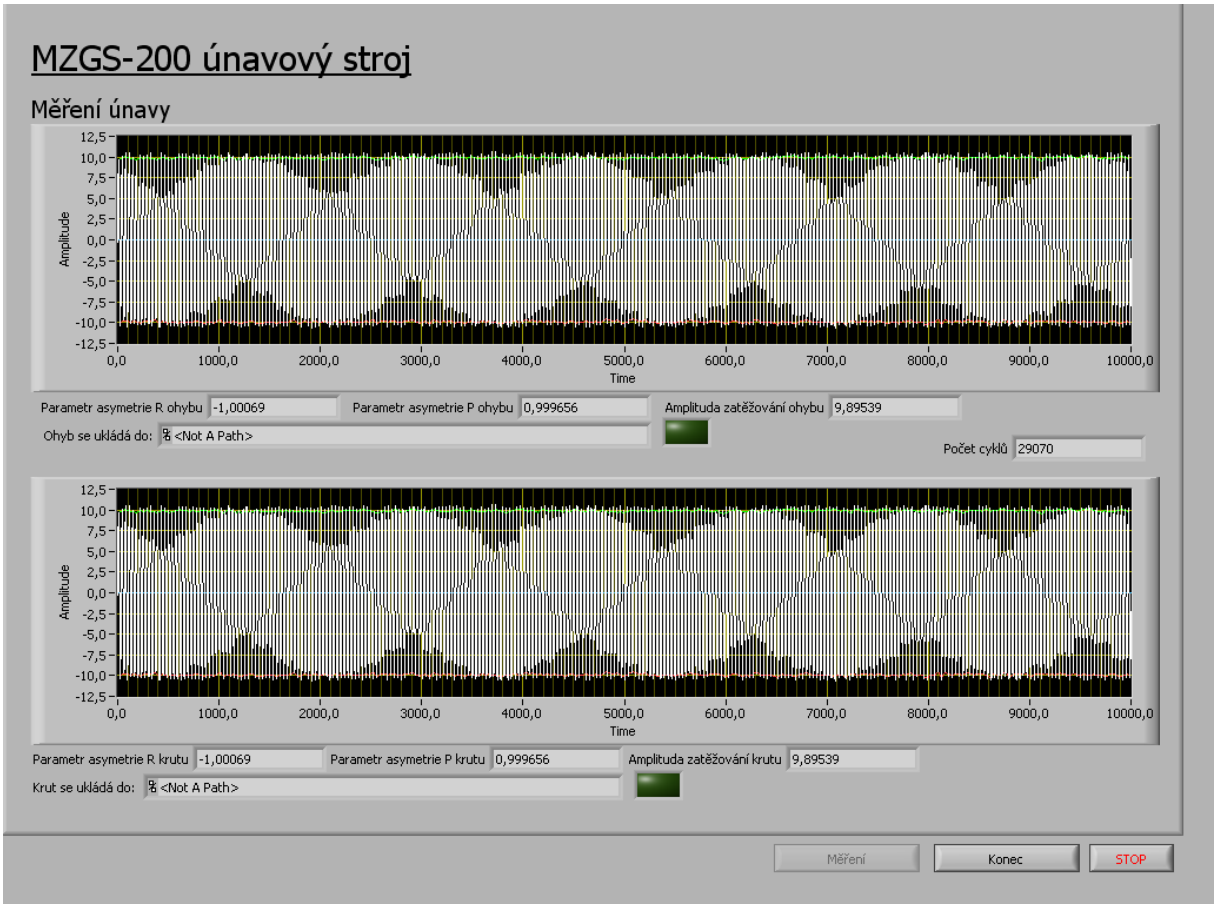
Stav „Změna zatížení“ je realizován vstupním dialogovým oknem. Vyplněním hmotnosti závaží umístěného na páce (akce nastavit zatížení) se program dostane opět do stavu „měření dat“. Následující stavy a akce jsou stejné. Stav „konec měření“, který následuje po každé akci uložit data je realizován dialogovým oknem tázajícím se, zda chce uživatel pokračovat v měření. V případě záporné odpovědi (akce konec kalibrace) přejde program do stavu „protokol experimentu“, ve kterém jsou naměřené hodnoty uloženy do protokolu (ukázka kalibračního protokolu je v příloze) a program je ukončen.

3.4. Program pro měření

3.4.1. Čelní panel

Prvky čelního panelu jsou umístěny v záložkách (*Tab Control*), vně jsou pouze tři ovládací tlačítka (viz obrázek 3.3). Tlačítka postupně mění obsah celého front panelu. První úlohou uživatele je zadání kalibračních údajů, které je možno zadat v číselné formě nebo načtením

[2]Předpokládáme normální rozdělení, vzhledem k tomu, že počítačem lze naměřit více než 1000 hodnot za sekundu lze použít centrální limitní větu.



Obrázek 3.3: Ukázka čelního panelu programu pro měření.

protokolu o kalibraci. Pokud tyto údaje nejsou k dispozici, je možno přímo z rozhraní programu pro měření vyvolat program pro kalibraci a provést kalibraci v daném okamžiku.

3.4.2. Zdrojový kód (blokový diagram)

Program sloužící k nastavení a záznamu experimentu začíná inicializací hodnot jednotlivých tlačítek, výchozím nastavením polí, apod. Dále pokračuje spuštěním tří smyček: smyčky měření, smyčky událostí a smyčky zpracování. Tyto smyčky běží paralelně jako tzv. „vlákna[3]“. Dále jsou popsány funkce jednotlivých smyček.

Smyčka měření

Tato smyčka obstarává spojení programu s měřící kartou NI PCI-6221 M. Smyčka měření je synchronizována se smyčkou událostí pomocí notifikací (*Notifications*). Notifikace jsou hodnoty libovolného datového typu, které lze přenášet do ostatních vláken. Pomocí notifikací se v tomto případě předává celé číslo, reprezentující zobrazovaný obsah čelního panelu. Na základě tohoto čísla pak smyčka měření provádí jeden ze čtyř podprogramů.

[3]Vlákna (*Threads*) jsou pojmem z teorie operačních systémů, přesné vysvětlení tohoto pojmu přesahuje rámec této práce.

Smyčka zpracování

Smyčka obdrží ke zpracování asi 20000 hodnot naměřených na krutové a ohybové páce, tato měření jsou přenesena pomocí fronty[4] ze smyčky měření. Z důvodu velkého množství dat nejsou všechny hodnoty uloženy, ale jsou nejdříve analyzovány. Z naměřených hodnot jsou spočítána lokální maxima a minima, která společně se střední hodnotou slouží k výpočtu parametrů asymetrie. Jako záznam průběhu zatěžování pak slouží závislost lokálních maxim a minim signálu na čase. Množství hodnot v paměti je tak sníženo přibližně desetkrát.

Další funkcí, kterou smyčka zpracování plní je export průběhu počáteční fáze experimentu do grafu v protokolu měření.

Smyčka událostí

Tato smyčka zařizuje interaktivitu programu. Je zde zajištěno zobrazení jednotlivých stránek front panelu a aktivace popisků tlačítek další nebo předchozí strany. Smyčka událostí (*Event Loop*) je speciální strukturou LabVIEW, jež je používána v případech, ve kterých program koná úlohy pouze ve chvíli, kdy uživatel s programem pracuje.

3.4.3. Omezení programu

Zvolené řešení přináší jistá omezení, na která je důležité dbát při použití programu. První omezení vzniká v samotném hardware počítače. Procesor není vícejádrový, takže vícevláknové aplikace neběží paralelně ale pseudoparalelně, to znamená, že sice běží více vláken, ale pracuje jen jedno a počítač mezi nimi rychle přepíná. To má za následek, že mezi doměřením dat, jejich zpracováním a začátkem dalšího měření je malá prodleva, která způsobí, že program nezachytí několik zátěžových cyklů a počet cyklů napočítaný pomocí LabVIEW je tak nutně o něco nižší.

Dalším omezením je elektronika měřící karty. Vstupy karty jsou multiplexovány, čili karta měří pouze jeden vstup a mezi vstupy velice rychle přepíná. Z tohoto plyne, že hodnoty obou kanálů nejsou změřeny přesně ve stejný časový okamžik a odečítání vzájemné fáze dvou kanálů není přesné. Karty, které nejsou multiplexované stojí mnohonásobně více a tak se musí s tímto omezením počítat.

[4] Fronta je další nástroj pro synchronizaci paralelně běžících smyček.

4. Měření a výsledky

4.1. Měření kalibračních závislostí

V rámci bakalářské práce byla provedena kalibrace zařízení MZGS-200 využitím vzorku vyrobeného z niklové superslitiny Inconel 713LC. Postupně byla naměřena kalibrační křivka ohybové a krutové páky. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1. Velikost momentu je vypočtena ze vztahu:

$$M = rF, \tag{4.1}$$

kde $r = 0,2\,\mathrm{m}$ je délka páky a $F = mg$ je tíhová síla ($g = 9,81\,\mathrm{ms}^{-2}$).

		Ohybová páka		Krutová páka	
Zátěž m [kg]	Moment M [Nm]	Napětí U [V]	Odchylka σ [V]	Napětí U [V]	Odchylka σ [V]
0	0,00	-0,654	0,0635	-1,782	0,07
1	1,96	-0,616	0,0355	-1,745	0,09
2	3,92	-0,576	0,0377	-1,702	0,06
3	5,89	-0,538	0,0546	-1,658	0,05
4	7,85	-0,501	0,07	-1,612	0,04
6	11,77	-0,422	0,06	-1,529	0,06
7	13,73	-0,384	0,077	-1,492	0,07
volná	—	-0,7	0,05	-1,81	0,05

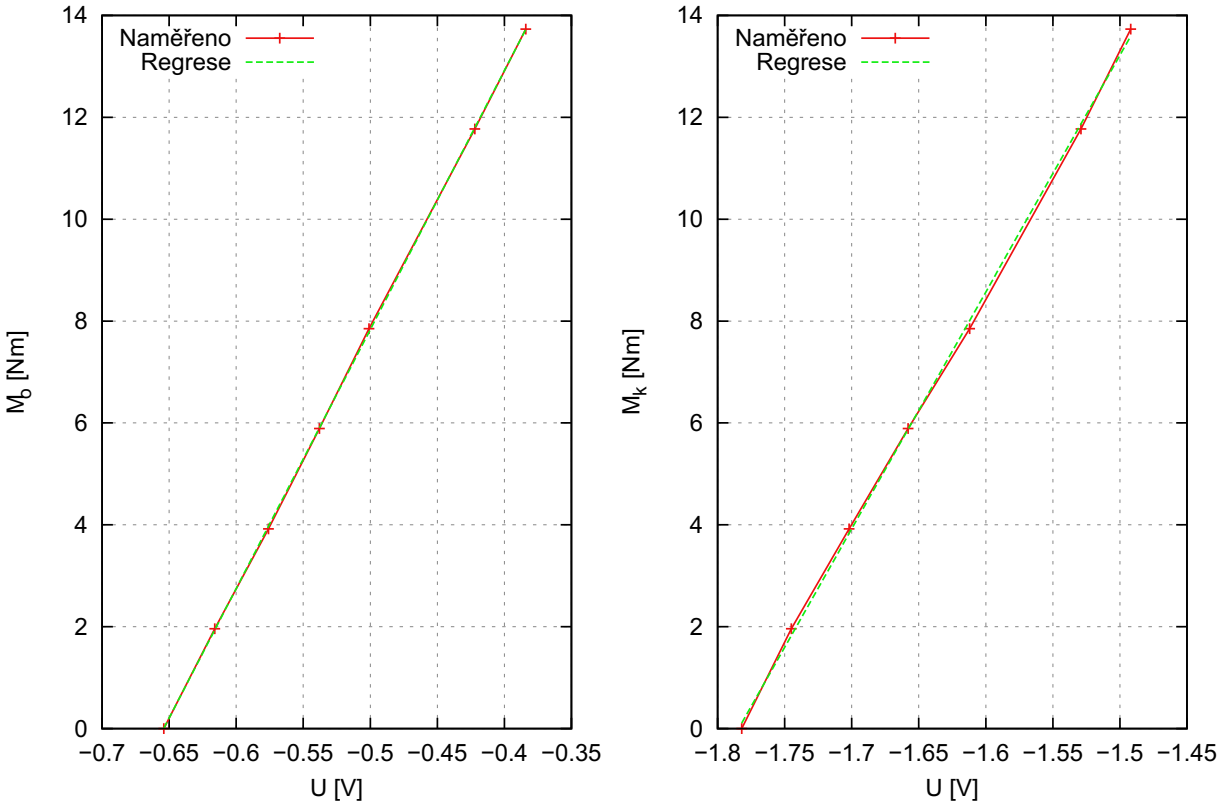
Tabulka 4.1: Naměřená data.

V případě ohybu byly koeficienty regresní funkce $M = aU + b$ určeny bodovým a intervalovým odhadem takto: $a = (50,839 \pm 0,165)\,\mathrm{NmV}^{-1}$, $b = (33,253 \pm 0,089)\,\mathrm{Nm}$. Dosazením do regresní funkce lze zpětně spočítat moment volné páky (moment, který vzniká při lepení tenzometrů), v tomto případě byla volná páka o $M_{o0} = -2,334\,\mathrm{Nm}$ méně zatížená než páka bez závaží. O M_{o0} se posune absolutní člen regrese, takže výsledná kalibrace bude udávat nulu pro páku volnou a ne pro páku bez závaží. Výsledný převod mezi elektrickým napětím U naměřeným pomocí tenzometrů a momentem M_o, jímž je páka zatížena, pak je $M_o = 50,839U + 35,587\,\mathrm{Nm}$.

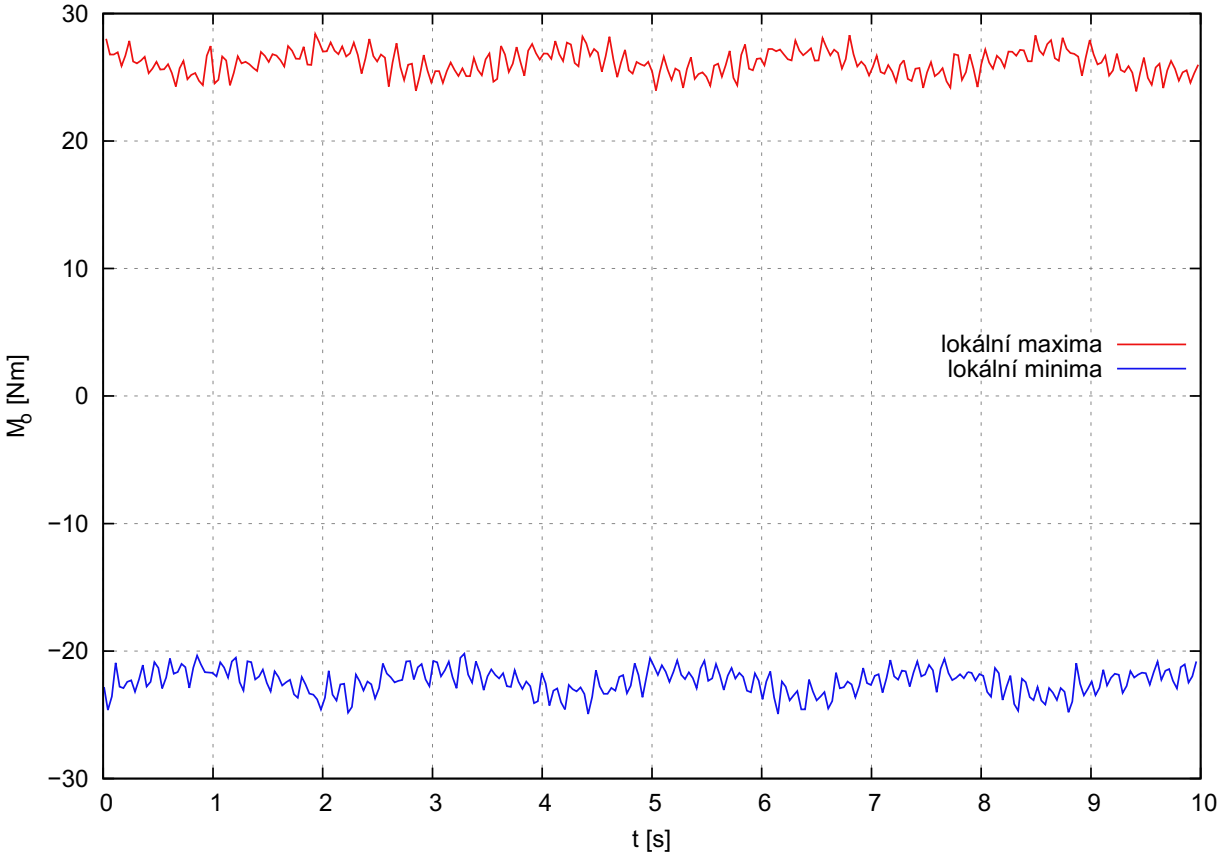
Pro krutovou páku je postup zcela identický, přičemž regresní koeficienty byly vypočítány jako: $a = (46,504 \pm 0,523)\,\mathrm{NmV}^{-1}$, $b = (82,979 \pm 0,863)\,\mathrm{Nm}$ a nulový moment krutové páky $M_{k0} = -1,193\mathrm{Nm}$. Výsledný kalibrační vztah pak je $M_k = 46,504U + 84,173\,\mathrm{Nm}$. Jak je patrné z grafu 4.1 obě závislosti jsou lineární, což potvrzují také malé směrodatné odchylky regresních koeficientů a a b.

4.2. Záznam průběhu zatěžování

V této stati je uvedena ukázka průběhu experimentálního zatěžování vzorků vyrobených z niklové superslitiny Inconel 713LC. Obrázek 4.2 představuje 10 s záznamu zatěžování ohybovým momentem $M_o = 50\,\mathrm{Nm}$ (parametry asymetrie $P = 1,001$, $R = -0,997$). Jak lze na záznamu vidět, průběh zatěžování není harmonický, ale je amplitudově modulovaný. Přestože z hlediska prováděných experimentů nepředstavuje modulace významný problém, vzhledem k malým a spojitým změnám amplitudy napětí, které výrazně neovlivní velikost plastické zóny na čele trhliny a tudíž ani její šíření, byl tento jev dále studován.



Obrázek 4.1: Grafy naměřených hodnot.



Obrázek 4.2: Ukázka naměřeného průběhu zatěžování.

5. Ověřující měření

5.1. Laserový měřič vzdálenosti optoNCDT 1605

V rámci předkládané práce bylo provedeno měření mechanického napětí pomocí tenzometrů. Zvažováno bylo použití vibrometru OMETRON VH-1000-D a laserového měřiče vzdálenosti optoNCDT 1605. Jelikož vibrometr nebylo možno vzhledem k velké hmotnosti vhodně umístit, bylo provedeno pouze měření pomocí optoNCDT 1605.

Bezkontaktní senzor optoNCDT je určen k měření vzdálenosti. Tento senzor je vyráběn ve dvou provedeních, která se liší použitým zdrojem světla: laser, LED. Výhodou užití LED je nižší cena a větší vlnová délka použitého světla. Výhodou laseru je kratší doba odezvy, menší průměr stopy a nižší chyby způsobené vlivem okolního světla. V práci bylo užito laserového měřiče s referenční vzdáleností 220 mm a rozsahem měření 50 mm. Celkové pásmo měření je pak 170 – 270 mm s rozlišením 30 μm, šířka stopy 1,5 μm, vlnová délka použitého světla 675 nm [10].

Princip měření je následující: ze zdroje světla je vyslán paprsek na povrch vzorku, odražené světlo je fokusováno a dopadá na detektor tvořený fotocitlivým proužkem. Dopadající světlo rozdělí proužek na dvě části, přičemž každou protéká jiný proud. Pomocí proudů I_1, I_2 a délky proužku L lze polohu paprsku na detektoru vypočítat jako:

$$x = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2}\frac{L}{2} \tag{5.1}$$

Změna vzdálenosti mezi objektem a senzorem se projeví změnou místa dopadu fokusovaného světla.

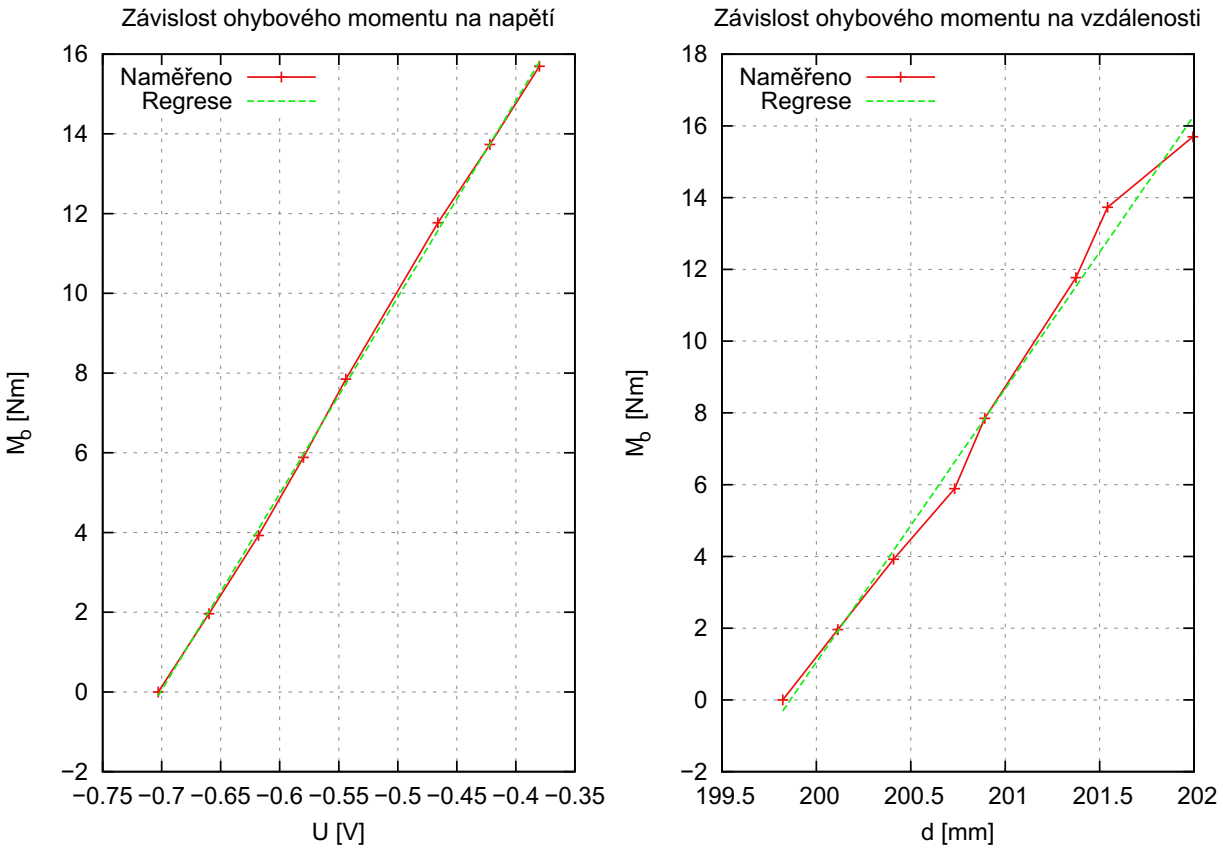
5.2. Kalibrace pomocí optoNCDT

		Měření laserem		Měření tenzometry	
Zátěž m [kg]	Moment M [Nm]	Vzdálenost d [mm]	Odchylka σ [mm]	Napětí U [V]	Odchylka σ [V]
0	0,000	199,822	0,065	-0,703	0,011
1	1,962	200,114	0,067	-0,660	0,011
2	3,924	200,409	0,064	-0,618	0,012
3	5,886	200,732	0,061	-0,580	0,012
4	7,848	200,892	0,070	-0,544	0,013
6	11,772	201,374	0,069	-0,466	0,013
7	13,734	201,542	0,066	-0,422	0,013
8	15,696	201,994	0,063	-0,380	0,012

Tabulka 5.1: Naměřené hodnoty pomocí laseru a tenzometrů.

Výchylka páky v závislosti na hmotnosti závaží byla měřena pomocí optoNCDT 1605 a současně pomocí tenzometrů. Postup měření byl následující: na páku bylo zavěšeno závaží, potom bylo naměřeno 10 000 vzorků pomocí tenzometrů i laseru, z naměřených dat byla vypočítána střední hodnota a směrodatná odchylka. Vzorkovací frekvence byla 1 kHz. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1.

Z naměřených dat byly spočítány bodové a intervalové odhady koeficientů regresní funkce $M = aU + b$ a jejich relativní chyby δ_a, δ_b. Pro měření tenzometry byly regresní koeficienty určeny takto: $a = (49,269 \pm 0,445)\,\mathrm{NmV}^1$, $\delta_a = 0,90\%$ a $b = (34,535 \pm 0,248)\mathrm{Nm}$, $\delta_b = 0,72\%$. Měřením pomocí optoNCDT byly stanoveny tyto hodnoty regresních koeficientů: $a = (7,620 \pm 0,290)\,\mathrm{NmV}^{-1}$, $\delta_a = 3,80\%$ a $b = (-1522,89 \pm 58,080)\mathrm{Nm}$, $\delta_b = 3,81\%$. Z grafů na obrázku 5.1 lze odvodit, že u laseru jsou data méně

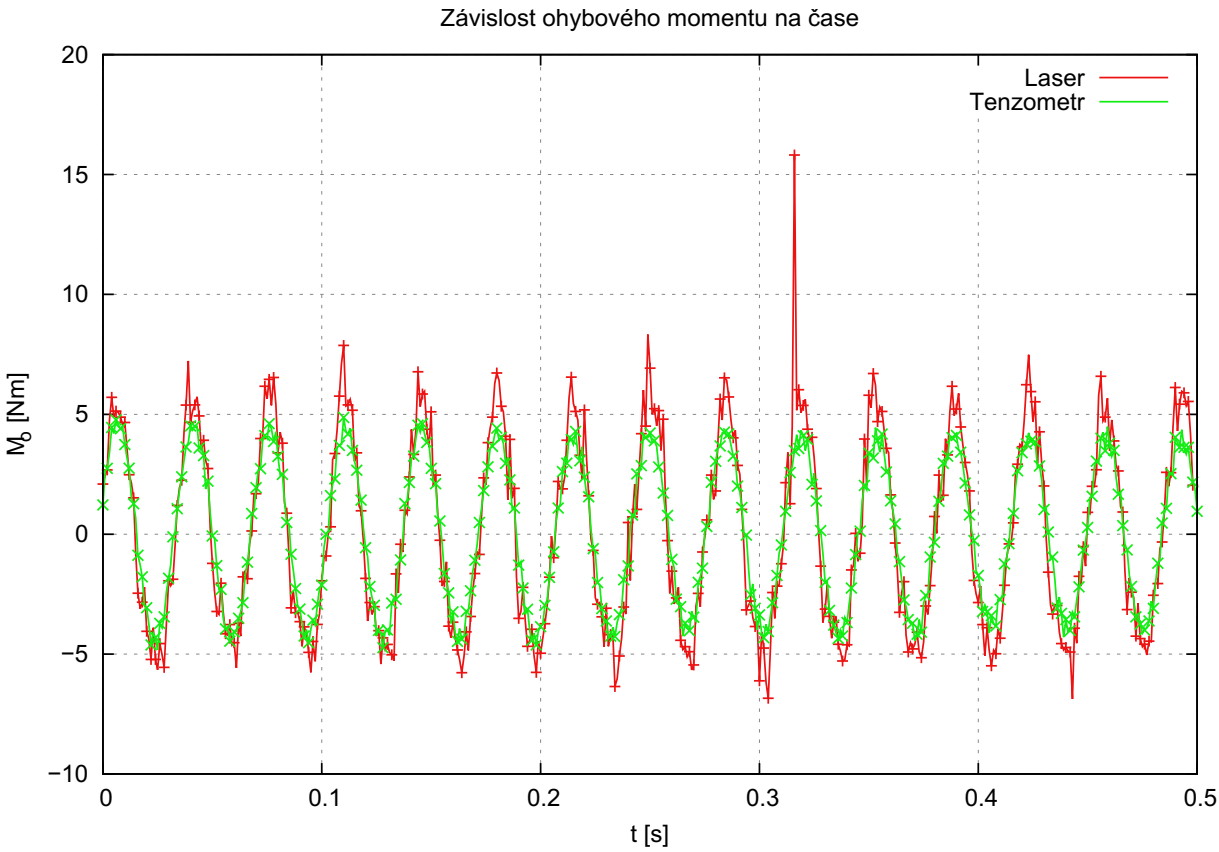


Obrázek 5.1: Grafy naměřených hodnot.

přesná a regrese má větší chybu. Hlavním rozdílem je, že tenzometry mají velice kvalitní analogový filtr, který signál vyhladí, zatímco signál z laseru je bez úpravy digitalizován a následně filtrován a zpracován. Přítomnost filtru zvyšuje kvalitu signálu z tenzometrů, návrh analogového filtru pro laserový měřič přesahuje rámec této práce. Vliv šumu a kvality signálu z laseru byl lépe patrný při záznamu průběhu zatěžování.

5.3. Měření průběhu zatěžování.

Cílem tohoto měření bylo vyloučit tenzometry jako příčinu modulace. Na obrázku 5.2 je ukázáno srovnání průběhu zatěžovacího momentu ohybové páky naměřeného současně pomocí laseru a tenzometrů. Je zřejmé, že měření laserem je zejména v maximech a minimech méně přesné. Přesto zatížení změřené pomocí laseru vykazovalo kvalitativně stejný průběh, včetně modulace, jako zatížení změřené pomocí tenzometrů. Hypotéza o tenzometrech jako příčině amplitudové modulace tímto nebyla potvrzena.



Obrázek 5.2: Časový průběh zatěžování.

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit uživatelské rozhraní v programovém prostředí LabVIEW, které umožní provádět kalibraci zařízení MZGS-200 pomocí statického zatížení sadou závaží a které současně umožní sledovat, zaznamenávat a analyzovat signál v průběhu únavových experimentu. V rámci práce byl teoreticky odvozen vztah pro síly působící na zkušební vzorek a vytvořeny dva programy, jeden pro stanovení kalibrace, druhý pro záznam průběhu zatěžování a jeho analýzu. Tyto programy byly použity pro kalibraci zařízení a záznam experimentálního zatěžování vzorků vyrobených z niklové superslitiny Inconel 713LC.

Při vývoji programů bylo zjištěno, že signál vykazuje nežádoucí modulaci. Srovnávací měření pomocí laserového měřiče vzdálenosti optoNCDT, vyloučily tenzometry jako příčinu modulace. Pro přesnější stanovení průběhu napětí jsou v současné době připravovány experimenty na vzorcích s tenzometry umístěnými přímo na funkční části. Takto naměřená data pak bude možné srovnat s teoretickým odvozením rozložení napětí na vzorku z diplomové práce Mgr. Kateřiny Dědkové [2].

Literatura

[1] SLÁMEČKA, Karel. *Životnost ocelových vzorků při kmitavém zatěžování ohybem a krutem.* Brno, květen 2001. 90 s. Diplomová práce. Fakulta Strojního Inženýrství VUT Brno.

[2] DĚDKOVÁ, Kateřina. *Kritéria životnosti při biaxiálním únavovém namáhání.* Brno, 2008. 77 s. Diplomová práce. Přírodovědecká Fakulta, Masarykova Univerzita v Brně.

[3] ASKELAND, Donald R; PHULÉ, Pradeep P. *Science and engineering of materials.* 5th ed. Toronto : Thomson, 2006. 863 s. ISBN 05-345-5396-6.

[4] POKLUDA, Jaroslav; SLÁMEČKA, Karel; HORNÍKOVÁ Jana. *Ohybové a krutové únavové namáhání materiálu Inconel 713LC v základním stavu a s vrstvou.* Brno, 2010. Dílčí výzkumná zpráva VUT 7/2010 k projektu FR-TI1/099. VUT Brno.

[5] *The fatigue test stand MZGS-200: Service manual.* Opole : Technical University of Opole, 2004. 16 s.

[6] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty : pohony, senzory, řízení.* Vyd. 1. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 248 s. ISBN 80-730-0141-1.

[7] *Automatizace* [online]. 2005 [cit. 2011-04-10]. Když se řekne... Tenzometry. Dostupné z WWW: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=510>.

[8] *Automatizace.hw.cz* [online]. 2005 [cit. 2011-04-10]. Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. Dostupné z WWW: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111201>

[9] VLACH, Jaroslav; HAVLÍČEK, Josef; VLACH, Martin et al. *Začínáme s LabVIEW.* 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 247 s. ISBN 978-807-3002-459.

[10] *Instruction manual optoNCDT 1605*, 33 s.

[11] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu.* 2. opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

7. Seznam použitých zkratek a symbolů

φ	úhlová souřadnice
N_f	počet cyklů do lomu
P, R	parametry asymetrie
σ	mechanické napětí
M_o	ohybový moment
M_k	krutový moment
ν	úhlová frekvence
ω	úhlová rychlost
T	kinetická energie
V	potenciální energie
L	Lagrangián
R_0	klidový odpor
ρ	měrný elektrický odpor
S	průřez drátu
l	délka drátu
U_D	napětí
NI	National Instruments
VI	Virtual Instrument
σ_{ij}	tenzor napětí

8. Seznam příloh

Protokol kalibrace ohybové páky

Protokol kalibrace krutové páky

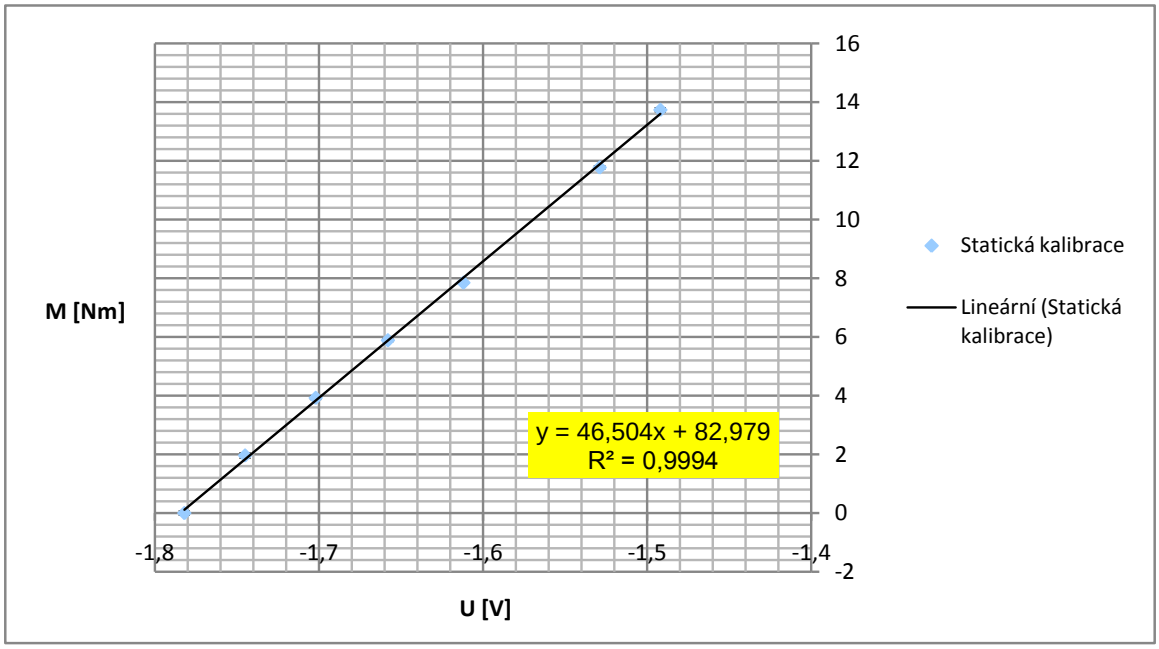
DVD s programy pro kalibraci a měření

ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ MZGS-200 - ZÁZNAM O KALIBRACI KRUTOVÉ PÁKY

Zkušební vzorek	
materiál:	Inconel 713LC, obráběný
typ:	PBS Velká Bíteš - zkušební vzorek číslo 4
číslo vzorku:	B38 19-10

Volná páka		
Napětí [V]	Odchylka [V]	Moment [Nm]
-1,812	0,052	-1,286412333

Statická kalibrace			
zátěž	moment	napětí	odchylka
m [kg]	M [Nm]	U [V]	U [V]
0	0,00	-1,782	0,071
1	1,96	-1,745	0,091
2	3,92	-1,702	0,063
3	5,89	-1,658	0,052
4	7,85	-1,612	0,041
6	11,77	-1,529	0,063
7	13,73	-1,492	0,071



Výsledky regrese (m*x +b)	
m	b
46,50419788	82,97919423

Skutečné momenty včetně vlastní tíhy	
m	b
46,50419788	84,26560656

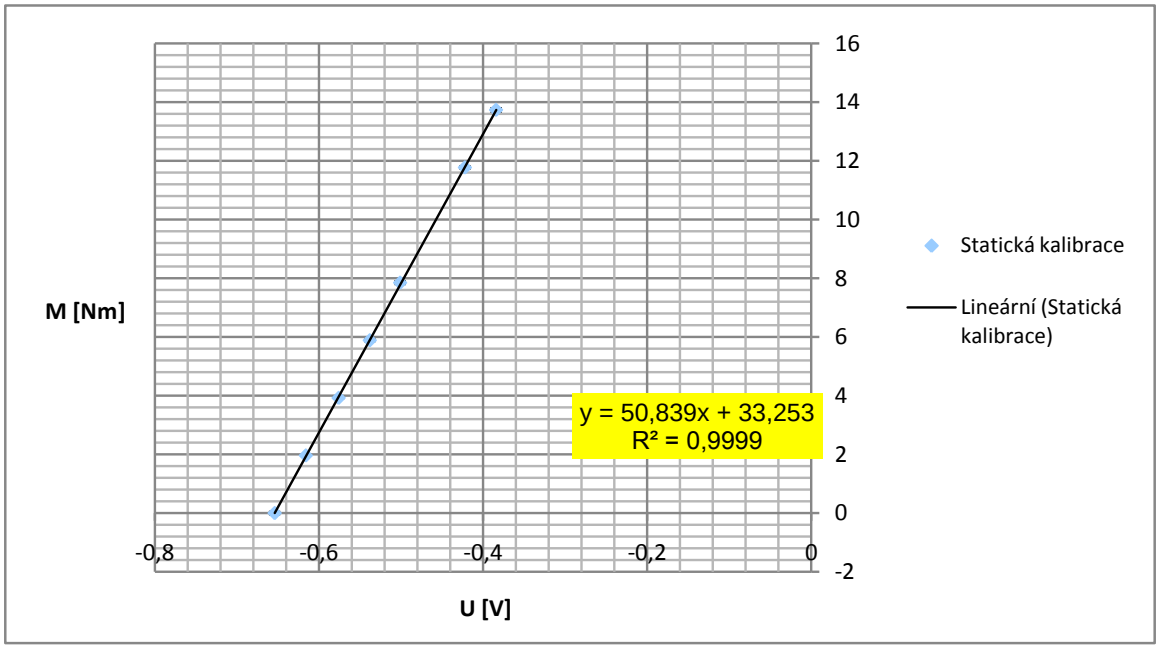
jméno:	Karel Slámečka
datum:	pondělí, září 13, 2010

ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ MZGS-200 - ZÁZNAM O KALIBRACI OHYBOVÉ PÁKY

Zkušební vzorek	
materiál:	Inconel 713LC, obráběný
typ:	PBS Velká Bíteš - zkušební vzorek číslo 4
číslo vzorku:	B38 19-10

Volná páka		
Napětí [V]	Odchylka [V]	Moment [Nm]
-0,701	0,035	-2,384843099

Statická kalibrace			
zátěž	moment	napětí	odchylka
m [kg]	M [Nm]	U [V]	U [V]
0	0,00	-0,654	0,064
1	1,96	-0,616	0,036
2	3,92	-0,576	0,038
3	5,89	-0,538	0,055
4	7,85	-0,501	0,070
6	11,77	-0,422	0,060
7	13,73	-0,384	0,077



Výsledky regrese (m*x +b)	
m	b
50,83873495	33,2531101

Skutečné momenty včetně vlastní tíhy	
m	b
50,83873495	35,6379532

jméno:	Karel Slámečka
datum:	pondělí, září 13, 2010