

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
Faculty of Electrical Engineering

**Problémy snímání vlastních kmitů strunových
tenzometrických snímačů a jejich řešení**

**Difficulties of Tensometric String Sensor Self
Oscillations Sensing and its Solving**

Dr. Ing. Jiří Hospodka

Habilitační přednáška / Habilitation lecture

8. března 2007

Summary

The paper describes a new principle of system for tensometric string sensor oscillations measurement. The system uses measuring of damped oscillations of excited sensor string which induces voltage in the sense coil. A selective amplifier is used for amplification of induced voltage. Technique of switched capacitor is used for the narrowband tuned amplifier realization. Synchronous tuning of the amplifier is solved using phase-locked loop. The whole system is controlled by a special circuit handling synchronization. The controlling circuit also generates so-called time points for optimal string excitation. The system is self-adapting on various sensor types, thanks to the above mentioned principle.

The described principle of driver connection is copyright by the utility design which is registered under the name "System for Continuous Measuring of Tensometric String Sensor Self-oscillations with two Wires Connection" on patent office with no. 16806, august 28, 2006.

Souhrn

Uvedený text popisuje nový princip systému pro měření vlastních kmitů strunových tenzometrických snímačů včetně obvodového řešení vybraných částí. Celý systém využívá měření tlumených kmitů vybuzeé struny snímače, která indukuje napětí ve snímací cívce. Pro zesílení indukovaného napětí je mimo jiné použit přeladitelný úzkopásmový selektivní zesilovač. Ten je realizovaný technikou spínaných kapacitorů, přičemž jeho synchronní ladění zajišťuje fázový závěs. Systém je řízen zvláštním obvodem, nezbytným pro přechod do tzv. synchronního stavu. Řídící obvod navíc generuje okamžiky pro optimální buzení struny. Díky uvedenému principu je systém schopen adaptace na různé vlastnosti a typy snímačů.

Uvedený pricip zapojení budiče je chráněn užitným vzorem, který byl zapsán na Úřadu průmyslového vlastnictví pod názvem „Zařízení pro kontinuální měření kmitů strunových tenzometrických snímačů s dvou vodičovým připojením“ dne 21.08.2006, pod číslem zápisu 16806.

Klíčová slova

Tenzometrický strunový snímač, budič strunových tenzometrických snímačů, filtr se spínanými kapacitami, fázový závěs.

Keywords

Tensometric string sensor, driver of tensometric string sensors, switched capacitor filter, phase-locked loop.

Obsah

1 Úvod	6
2 Mechanické uspořádání snímače a jeho vlastnosti	6
2.1 Mechanické vlastnosti snímače	8
2.1.1 Určení kmitočtu struny	8
2.1.2 Vliv amplitudy na kmitočet struny	9
2.1.3 Vliv tlumení na kmitočet struny	9
2.1.4 Vliv teploty na kmitočet struny	9
2.2 Vztah kmitočtu struny k vlastní měřené veličině	10
2.3 Základní elektrické vlastnosti snímače	10
3 Přehled současného stavu v dané problematice	12
3.1 Princip stávajících budičů jednocívkových snímačů	12
3.2 Princip budičů dvoucívkových snímačů	13
3.3 Nevýhody stávajících řešení budičů	15
4 Princip nového budiče a jeho návrh	16
4.1 Princip budiče	16
4.1.1 Tvorba budičích pulzů	18
4.1.2 Přejechod do synchronního stavu	19
4.2 Návrh a obvodové řešení systému	21
5 Závěr	22
Dr. Ing. Jiří Hospodka	25

1. Úvod

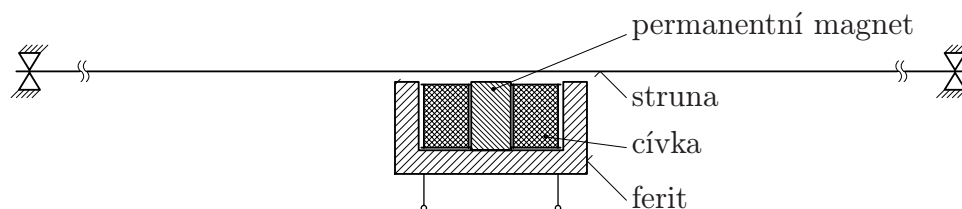
Měření mechanických veličin jako je tlak, síla, deformace atd. se v poslední době značně rozšířilo, hlavně díky prudkému rozvoji mikroelektroniky, a tím i zvládnutí technologie výroby odporových a piezoelektrických tenzometrických snímačů. S nimi se můžeme setkat prakticky na každém kroku. Jsou však i oblasti průmyslu, kde je jejich použití komplikované nebo nemožné. Jednou z těchto oblastí je stavebnictví. Ve stavebních konstrukcích, se pro monitorování statického stavu často jako tenzometrické snímače používají elektromechanické strunové rezonátory, zabudované ve sledovaných částech konstrukcí. Většinou, pokud jde o mostní konstrukce nebo přehradní hráze, je to jediná možnost, jak sledovat jejich stav. Mimo to lze pomocí těchto snímačů měřit i teplotu, náklon a jiné odvozené veličiny.

Oproti jiným druhům tenzometrických snímačů (např. odporovým) mají tyto strunové snímače několik výhod, které rozhodují v jejich prospěch zejména při použití ve stavebnictví. Lze je konstruovat jako vodotěsný masivní mechanický systém, velice odolný proti mechanickému poškození, ale přitom velmi citlivý na měřenou veličinu [1]. Jejich největší předností je časová stálost a velmi vysoká přesnost. Tyto vlastnosti je přímo předurčují pro použití v měřicích systémech a na takových místech, kde je znemožněn přístup a tudíž jejich výměna v případě poruchy. To jsou např. betonové konstrukce přehrad, mostů, . . .

Strunové snímače mají však také své nevýhody. Jednou z nich je poměrně složitá elektronická část (budič) zajišťující spolu se snímačem převod měřené veličiny na elektrický signál. Dále je to také relativně náročná výroba vlastní struny a její uchycení v kotvách. Tyto nevýhody jsou však v dostatečné míře vyváženy výše zmíněnými výhodami.

2. Mechanické uspořádání snímače a jeho vlastnosti

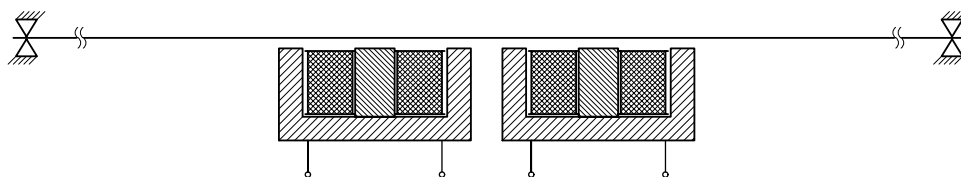
Základem strunového snímače je měrná napjatá ocelová struna, ukotvená na obou koncích v kotevních kamenech upevněných na rámu snímače. Tento základní prvek je doplněn převodním mechanismem převádějícím měřenou veličinu na změnu vzájemné vzdálenosti kotevních bloků. Pro buzení struny, resp. snímání jejich příčných kmitů je mechanická konstrukce opatřena elektromechanickým měničem. V případě jednocívkového systému jedním snímačem, v případě dvoucívkového dvěma měniči, kdy jeden pracuje jako budič a druhý jako snímač. Aby struna pracovala v požadovaném módu (kmitala na první harmonické), je ještě nutno zajistit, aby na strunu působila statická složka magnetického pole. To lze zajistit buď stejnosměrným posuvem budícího proudu cívky, nebo častěji permanentním magnetem umístěným v blízkosti struny, viz. [1]. Popsané uspořádání je schématicky znázorněno na obrázku 1 a 2. Praktické provedení je ukázáno na obrázku 3.



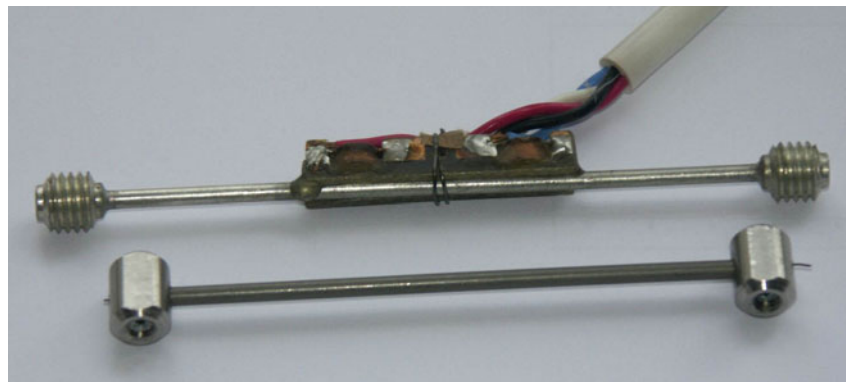
Obrázek 1: Schématické znázornění mechanického uspořádání jednocívkového snímače.

Každý strunový snímač je dále opatřen mechanickou ochranou tohoto vlastního systému, např. vodotěsným pouzdem. Z tohoto popisu je zřejmé, že parametry měrné struny (zejména volba materiálu, technologie výroby a stárnutí) a její ukotvení jsou z hlediska

přesnosti snímače rozhodujícími elementy. Na obrázcích 4 a 5 jsou vyobrazeny ukázky kompletních používaných snímačů.



Obrázek 2: Schématické znázornění mechanického uspořádání dvoucívkového snímače.



Obrázek 3: Vnitřní konstrukce tenzometru s elektromechanickými měniči a bez nich.



Obrázek 4: Ponorný tenzometr pro měření napjatosti předpjatých betonů s menším zrnem plnidla. Délka 128 mm, průměr hlav max. 42 mm, průměr střední části 18 mm, frekvenční rozsah 830 – 1670 Hz.



Obrázek 5: Přehradní tenzometr pro dálkové měření napjatosti masivních betonových a železobetonových konstrukcí, jejichž modul pružnosti je větší než $E = 1.5 \cdot 10^4$ MPa. Délka 282 mm, frekvenční rozsah 620 – 1030 Hz.

2.1. Mechanické vlastnosti snímače

Jaké má uvedený snímač mechanické vlastnosti a jak tyto souvisejí s vlastnostmi elektrickými (z hlediska svorek budící, resp. snímací cívky) je velmi stručně uvedeno v následujícím textu. Podrobnější a rozsáhlejší popis je uveden v [1], odkud byly jednotlivé vztahy převzaty.

2.1.1. Určení kmitočtu struny

Při teoretickém výpočtu citlivosti strunového snímače lze předpokládat, že měrná struna se chová v prvním přiblížení jako hmotné vlákno bez ohybové tuhosti, pevně vetknuté na obou koncích a zatížené konstantní osovou tahovou silou. Vlastní frekvence příčného kmitání je pak dána vztahem

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}, \quad (1)$$

kde f je vlastní kmitočet příčně kmitající struny [Hz],
 l – délka struny mezi body vetknutí [m],
 F – síla, kterou je struna napnuta [N],
 μ – hmotnost délkové jednotky struny [kg/m] a
 n – řád harmonické [-].

Jestliže dále zvolíme $n = 1$ a zavedeme hustotu $\rho = \frac{\mu}{S}$, napětí $\sigma = \frac{F}{S}$ [N/m²] a délku struny l [m], pak použitím Hookova zákona $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$, kde ε je poměrná deformace struny a E je její modul pružnosti, lze vztah (1) přepsat na tvar

$$\varepsilon = \frac{4l^2 \rho}{E} f^2. \quad (2)$$

Potom lze jednoduše odvodit, že měřená veličina, tedy změna poměrné deformace $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ je přímo úměrná rozdílu čtverců frekvencí.

2.1.2. Vliv amplitudy na kmitočet struny

Dosud se předpokládalo, že struna kmitá s tak malým rozkmitem, že její délka i napětí zůstávají konstantní. Ve skutečnosti ale není amplituda nekonečně malá a vychýlení struny z rovnovážné polohy prodlužuje střednici a zvyšuje napětí. Aby se tento vliv neprojevil nebo projevil minimálně, je nutno pracovat s co nejmenšími amplitudami kmitů¹ struny, nebo alespoň s jejich konstantní hodnotou po celou dobu měření. Lze odvodit vztah mezi změnou amplitudy kmitů a poměrnou deformací struny [1]. Nemá-li tedy vzniknout chyba větší než $\delta\varepsilon$, nesmí se změnit amplituda kmitů o více než

$$\Delta A = \frac{2l}{\pi} \sqrt{\delta\varepsilon}. \quad (3)$$

2.1.3. Vliv tlumení na kmitočet struny

Vliv tlumení se projevuje u tlumeně kmitající struny buzené impulzem a je vlastně výsledkem čtyř vlivů:

- vlastního vnitřního tlumení hmoty,
- odporu prostředí (vzduchu),
- tlumení v magnetickém poli snímačů a
- energie utlumené v držácích.

Tlumení závisí na amplitudě i frekvenci struny a s rostoucím tlumením frekvence klesá. Označíme-li $\omega = 2\pi f$ kruhovou frekvenci netlumeného kmitání a $\omega_1 = 2\pi f_1$ kruhovou frekvenci téhož systému s tlumením, potom platí

$$\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - b^2}, \quad (4)$$

kde $b = \delta/T = \delta f$ je konstanta tlumení² a $\delta[-]$ je logaritmický dekrement tlumeného kmitání.

Snížení vlastního kmitočtu struny vlivem tlumení není zanedbatelné a je nepřímo úměrné frekvenci. Lze však snadno dokázat, že nemá vliv na měření (má jen význam posunutí stupnice), pokud se konstanta útlumu nemění.

2.1.4. Vliv teploty na kmitočet struny

Vliv teploty je nejnepříjemnější ze všech vedlejších vlivů, protože jej lze často jen těžko sledovat. Je však komplikací každého tenzometrického měření, které se nekoná při konstantní teplotě. Je třeba rozlišovat dva mezní případy, přičemž při prvním je teplota tenzometru shodná s teplotou měřené konstrukce a potom můžeme, známe-li tuto teplotu, její vliv kompenzovat. Při změně teploty o Δt zaznamená strunový tenzometr protažení odměrné délky o

¹maximální vychýlení struny z rovnovážné polohy

$$\Delta\varepsilon_t = (\alpha_m - \alpha_s)\Delta t, \quad (5)$$

kde α_m a α_s jsou tepelné roztažnosti měřeného materiálu a struny.

Má-li se vliv teploty z měření vyloučit, musí se tato hodnota od celkové deformace odečíst

$$\varepsilon = (l/\bar{l})^2 \bar{\varepsilon} - \Delta\varepsilon_t, \quad (6)$$

kde $\bar{\varepsilon}$ značí porovnávací protažení porovnávací struny o délce \bar{l} a l je skutečná délka struny.

Druhý případ, kdy teplota tenzometru není shodná s teplotou konstrukce, je složitější. Za takovýchto okolností lze jen velmi obtížně stanovit korekci, protože i malé rozdíly v teplotě snímače a měřené konstrukce způsobují zdánlivě velké rozdíly v napětí struny. Tyto tepelné rozdíly vznikají díky malé tepelné setrvačnosti snímačů, umístěných na povrchu konstrukce. Proto je nutno pouzdro snímače chránit před velkým prouděním vzduchu a přímým ozařováním sluncem ... Více se celou problematikou zabývá lit. [1].

2.2. Vztah kmitočtu struny k vlastní měřené veličině

Abychom mohli vyhodnocovat měřenou veličinu (mechanické napětí, tlak ...), je nutné znát převodní vztah mezi touto veličinou a měřeným kmitočtem struny. V převodním vztahu převládá zejména kvadratická složka.

Podle dosavadních zkušeností dostačuje pro snížení chyby přepočtu pod $\pm 0.5\%$ v rozsahu měření zpravidla aproximace korekčním polynomem třetího stupně. Protože však většina aplikací strunové metody nevyžaduje dosažení chyby menší než 0.2% , můžeme vztah mezi poměrnou (normalizovanou) měřenou veličinou a frekvencí aproximovat vztahem

$$n = \frac{(f + A)^2}{B} + C, \quad (7)$$

kde n značí poměrnou hodnotu měřené veličiny,

f je frekvence struny [Hz] a

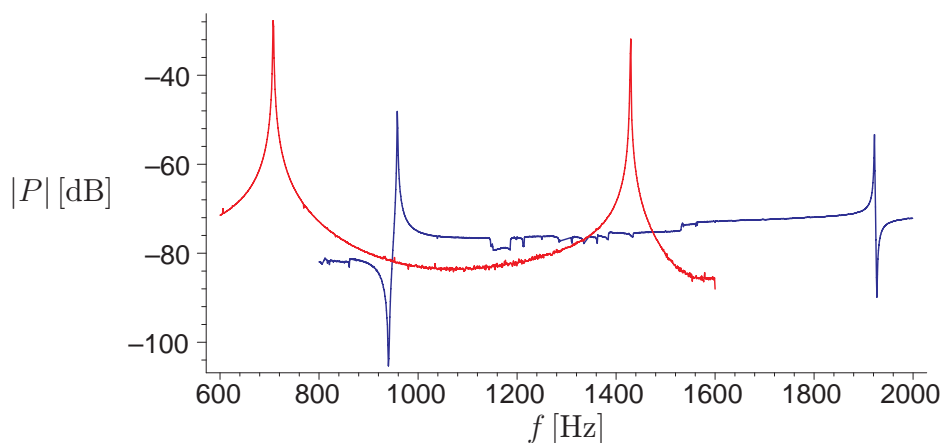
A, B, C jsou konstanty snímače.

O významu jednotlivých konstant a jejich vztahu k mechanické konstrukci je pojednáno v [8].

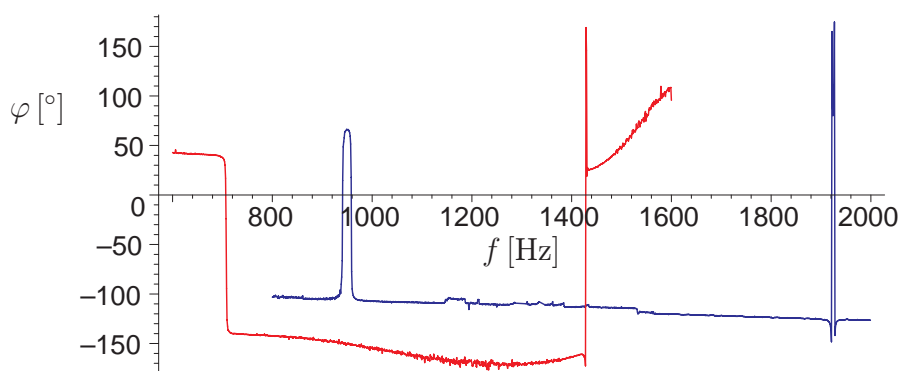
Tímto stručným úvodem je ukázáno, jak souvisí měřená veličina (obvykle mechanické napětí) s rezonančním kmitočtem struny. Tento kmitočet je tedy rozhodující veličinou, kterou je třeba pro nalezení měřené veličiny zjistit jako elektrický parametr snímače. Jakým způsobem to lze učinit a jaká úskalí s tím jsou spojena je uvedeno v následujících kapitolách (3 a 4).

2.3. Základní elektrické vlastnosti snímače

V této podkapitole jsou pro úplnost ukázány některé základní elektrické parametry – přenosové vlastnosti dvoucívkového snímače, kde jedna cívka je zapojena jako budící a druhá pracuje jako elektromagnetický snímač kmitů buzené struny. Změřené kmitočtové charakteristiky dvou snímačů jsou vyneseny na obrázku 6.



(a) modulové charakteristiky



(b) fázové charakteristiky

Obrázek 6: Kmitočtové charakteristiky snímačů z obrázku 3 a 5.

Z uvedených závislostí je evidentní, že přenos je silně závislý na rezonančním kmitočtu struny, je zde zřetelný jeho vliv jak na základním kmitočtu, tak na vyšších harmonických, konkrétně druhé harmonické. Dále je patrné, že útlum signálu je značný a i v rezonanci dosahuje hodnot 30 až 50 dB. Útlum souvisí s velmi slabou elektromechanickou vazbou, což je u těchto konstrukcí typické.

Dalším elektrickým parametrem, který lze na snímači zjišťovat je frekvenční závislost jeho impedance. Ta vykazuje samozřejmě induktivní složku, danou indukčností vlastní cívky. Impedance je však, i když prakticky nepatrně, ovlivněna elektromechanickou vazbou a to právě v okolí rezonančního kmitočtu struny a jeho násobků. Pokud bychom na této závislosti měli založit princip budiče, museli bychom vliv struny na impedanci zvýraznit. Tím se zabývá práce [2] a proto zde není uveden ani příklad této závislosti ani princip budiče, který ji využívá.

Je nutné však zdůraznit, že výše uvedené závislosti (přenos z jedné cívky na druhou a kmitočtová závislost impedance) jsou silně ovlivněny připojovacími kabely. Ty mohou být, vzhledem k využití snímačů, značně dlouhé (až 0,5 km). Navíc se obvykle jedná o silnoproudé kabely, kde je jedním z hlavních kritérií mechanická odolnost.

V další kapitole jsou stručně popsány používané principy budičů, tj. elektrických zařízení pro zjišťování rezonančního kmitočtu struny. Jsou také uvedeny jejich základní výhody i nevýhody.

3. Přehled současného stavu v dané problematice

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, používají se strunové tenzometrické snímače zejména ve stavebnictví pro měření mechanického napětí, např. namáhání mostních nebo přehradních konstrukcí. Pro vyhodnocování jejich stavu je nutné zjistit rezonanční kmitočet struny snímače, který je v měřené konstrukci zabudován. To lze principiálně provádět několika způsoby. Současné metody měření rezonančního kmitočtu struny vycházejí buď z diskrétního nebo z kontinuálního buzení kmitů struny. Druhý případ je typický pro systémy založené na principu oscilátoru, první případ odpovídá zpravidla pulznímu buzení. Popíšme tedy tyto dva nejčastěji používané principy:

1. Budiče založené na principu měření tlumených kmitů.

Struna se vybudí elektrickým pulsem v budící cívce, která slouží zároveň jako snímací. Následně po vybuzení se snímá napětí na této cívce, indukované kmitáním vybuzené ocelové struny v její blízkosti. Kmitočet tohoto napětí je pak vlastním rezonančním kmitočtem struny a tedy nepřímo měřenou veličinou. Výhodou uvedeného principu je skutečnost, že snímač je třeba vybavit pouze jednou cívkou a budič lze tedy připojit „dvouvodičově“.

2. Budiče založené na kmitočtově závislém přenosu mezi jednou budící a druhou snímací cívkou.

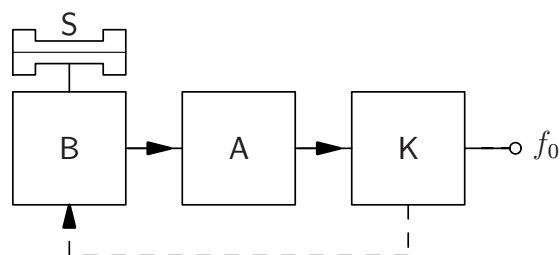
Budič je obvykle konstruován jako můstkový oscilátor, kde je v kladné zpětné vazbě zapojen přenosový člen, tvořený vlastním snímačem. Snímač je v tomto případě nutné opatřit dvěma elektromechanickými převodníky – cívkami, kde jedna slouží jako budící a druhá jako snímací. Využívá se kmitočtových vlastností přenosu ze vstupní brány (cívky) na výstupní. Tento přenos je silně kmitočtově závislý (s vysokým činitelem jakosti) právě v oblasti rezonance, viz. obrázek 6. V tomto případě je nutné „čtyřvodičové“ připojení snímače.

Dále je velmi stručně uveden popis a principiální zapojení budičů, pracujících na obou principech. Jsou popsány také jejich hlavní výhody i nevýhody.

3.1. Princip stávajících budičů jednocívkových snímačů

V současné době se pro buzení strunových snímačů téměř výhradně používají systémy pracující na principu měření tlumených kmitů [6, 7], který vychází z výše uvedeného popisu. Kmity struny se vybudí impulzem v budící cívce a následně se snímá napětí generované v těžce cívce vlivem dokmitávání struny. Zde existují různé modifikace – místo jednoho pulzu se použije série pulzů, aby se dosáhlo dobrého vybuzení struny. Pro zpracování generovaného napětí se používá buď širokopásmový zesilovač nebo selektivní zesilovač s omezeným kmitočtovým pásmem. Přesná zapojení firemních budičů jsou většinou nedostupná, ale jedná se většinou pouze o tento „jednoduchý“ princip realizovaný zapojením, jehož blokové schéma je uvedeno na následujícím obrázku 7.

Pro vybuzení se používá většinou napěťový impulz připojený nejprve na cívku měniče. Ten, jak bylo uvedeno, vybudí kmity struny, které lze následně snímat pomocí indukovaného napětí ve stejné cívce – struna kmitá v magnetickém poli permanentního magnetu. Vzhledem ke slabé elektromechanické vazbě (viz. kapitolu 2.3) je úroveň indukovaného napětí velmi nízká, cca 1 mV. Proto je nutné toto napětí před jeho zpracováním nejprve zesílit. Zde spočívá jeden ze zásadních problémů. Velmi nízká úroveň indukovaného napětí je obvykle zatížena velkou úrovní rušení, tj. má malý odstup signál-rušení. Je to dáno



Legenda: S představuje strunový snímač, B vlastní budič generující budící impuls cívky, A je zesilovač indukovaného napětí a K je komparátor.

Obrázek 7: Základní uspořádání budičů pracujících na principu měření tlumených kmitů snímače.

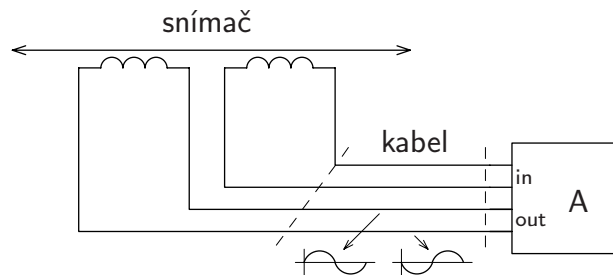
jednak použitým kabelem, jeho délkou a pak mírou elektromagnetického rušení v okolí jeho umístění. Z tohoto důvodu se často na místě zesilovače používá selektivní zesilovač s omezeným kmitočtovým pásmem, jak bylo uvedeno. Zesilovač pak zesílí pouze spektrum kmitočtů odpovídající rozsahu užitečných kmitočtů.

Další neméně závažný problém je načasování budících pulzů vzhledem k poloze dokmitávající struny. Pokud totiž budící impuls přijde v okamžiku, kdy se struna vzdaluje od cívky, energie pro vybuzení struny se spotřebuje částečně na její zabrždění a buzení pak nebude efektivní (dojde velmi rychle k utlumení kmitů). Tento problém je ještě umocněn, pokud je amplituda kmitů struny ještě poměrně velká. Problém nelze řešit ani sledováním fáze kmitání struny a z něho odvozeným okamžikem buzení, jelikož fázi struny nelze určit. Lze sledovat pouze fázi indukovaného napětí, která je však značně ovlivněna přenosovými vlastnostmi použitého kabelu. Tyto vlastnosti se prakticky nedají zjistit a navíc jsou silně závislé na délce kabelu, která se případ od případu liší.

Výrobci daný problém obvykle řeší rychlým sledem několika po sobě jdoucích pulzů v jedné půlplně kmitů struny nebo naopak dostatečným odstupem budících pulzů. Oba způsoby mají však své nevýhody: První způsob vede ke značnému ovlivnění kmitů struny, čímž je ovlivněn i měřený kmitočet a navíc je energeticky náročný. Modifikací tohoto principu jsou tzv. „jednocívkové“ oscilátory, kdy se struna budí v každé periodě, viz. [14], [9] a [10]. Druhé řešení vede obvykle k přerušovaným kmitům (kmity struny jsou plně utlumeny před příchodem dalšího budícího pulzu), čímž je znemožněno kontinuální dynamické snímání měřené veličiny (je požadováno např. při měření namáhání přistávacích drah na letištích v době „dosedávání“ letadla). Okamžiky buzení mohou být odvozeny od kmitočtu struny (čítačem), proto je v blokovém schématu tato možnost naznačena přerušovanou čarou.

3.2. Princip budičů dvoucívkových snímačů

Jedná se o systémy založené na kmitočtově závislém přenosu mezi jednou budící a jednou snímací cívkou [15], [13]. Mluvíme o čtyřvodičovém spojení snímače s budícím systémem, pracující prakticky výhradně na principu oscilátoru (generování kmitů s kmitočtem rovným rezonanční frekvenci struny). Tento princip měření vlastních kmitů napnuté struny se využívá např. i pro měření tlouštěk drátů, viz. [11]. Dále se v literatuře můžeme setkat ještě s modifikací tohoto, tzv. „čtyřvodičového“ oscilátoru, kdy se budí nejen první, ale i třetí harmonická struny, viz. [12]. Základní blokové uspořádání popisovaného budiče je uvedeno na obrázku 8.



Obrázek 8: Blokové schéma budiče pracujícího na principu oscilátoru s eliminací parazitních mezižilových přenosů u dlouhých kabelů.

Snímací systém je samozřejmě zapojen v kladné zpětné vazbě zesilovače (viz. obrázek 6) a ve větvi záporné zpětné vazby je zapojen obvod řízení zisku. Zisk musí být řízen v širokém rozsahu, odpovídajícím útlumu přenosu různých snímačů, viz. obrázek 6 (a). Navíc je vhodné aby obvod nastavení zisku byl řízen elektronicky, čímž lze udržovat konstantní úroveň výstupního signálu. Snímač je pak buzen skutečně harmonickým signálem a jednak je buzen konstantní, definovanou úrovní signálu, což vede k přesnějším a zejména opakovatelným výsledkům.

Mezi hlavní nevýhody patří složitější konstrukce snímačů (nutnost dvou elektromagnetických měničů) a nevyhnutelnost čtyřvodičového připojení snímače (dražší připojovací kabely). Zde je nutné si uvědomit ekonomické náklady v souvislostech. Snížení ceny snímačů a připojovacích kabelů je prvořadé, protože se jedná o „mnohokusové“ položky. Naproti tomu navýšení ceny budiče není rozhodující, protože se jedná prakticky o kusovou výrobu.

Problém, který je zde nutné řešit, je existence přeslechů (parazitních přenosů) mezi jednotlivými žilami kabelu. Ten je dán vzájemnou, kapacitní vazbou. Tato vlastnost se výrazně projeví při větších délkách připojovacích kabelů. Zkušenosti ukazují, že pro běžně používané kabely postačí délka 10 m k tomu, aby mezižilový přenos převládl nad přenosem vlastního snímače a celý systém je nepoužitelný – oscilátor se rozkmitá na kmitočtu, který je určen parazitním přenosem kabelu a je dokonce lhostejné, zda je kabel zakončen snímačem či nikoli. Tento problém lze řešit použitím symetrického výstupu zesilovače, jak je uvedeno na obrázku 8. Tím se právě odečtou příspěvky od obou výstupních signálů indukované ve vstupní větvi. Zde se samozřejmě nabízí další vylepšení tohoto principu, a to použití diferenciálního vstupního obvodu zesilovače. Tím budou jednak dále potlačeny souhlasné složky signálu, vzniklé jak parazitním mezižilovým přenosem kabelu, tak složky indukované vlivem elektromagnetického rušení. Uvedená úprava byla autorem úspěšně použita v jeho konstrukcích pro průmyslovou praxi a zaručuje spolehlivou funkci systému i s velmi dlouhými připojovacími kabely.

Pokud jde o literaturu zabývající se touto problematikou, její rozsah je poměrně malý. Jde především o literaturu tuzemskou, jak je vidět z uvedeného seznamu a naše i zahraniční patentové spisy. Jedná se o vědecké zprávy z Kloknerova ústavu ČVUT ([1], [6], [7]), některé vlastní publikace [2, 3] a patentové zprávy [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]. Je to dáno velice úzkou problematikou, ke které jistě strunové tenzometrické snímače a jejich buzení patří. Lze předpokládat, že výzkum v tomto oboru bude v zahraničí existovat, zejména v celé řadě firem, které se aplikací strunových snímačů zabývají. Jejich vlastní vývoj však probíhá ve firemních laboratořích a je tudíž majetkem firmy, který je prakticky

nedostupný. Principy, na kterých jejich systémy (budiče) pracují, lze vytušit z jejich reklamních listů. Jedná se téměř výhradně o systémy, pracující na principu vybuzení struny impulzem a následném snímání jejích tlumených kmitů nebo na principech z něho odvozených. Takové systémy vyvíjejí a vyrábějí např. firmy DEAKIN–Philips, GALILEO (Itálie), MAIHAK–Hamburg, MESOTEC–Drážďany. Dále firma TÉLEMAC–Paříž vyvíjí budiče pro dvoucívkové snímače, a to budiče pracující na principu oscilátoru. Dosud však, zjevně neexistuje systém, který by pracoval na jiném principu, odlišném od výše uvedených.

Na závěr této kapitoly zrekapitulujme hlavní nevýhody stávajících budičů, abychom mohli lépe vytýčit vlastnosti nově navrhovaného systému.

3.3. Nevýhody stávajících řešení budičů

Pro budiče pracující na principu oscilátoru je hlavní nevýhodou nutnost použití snímače s dvěma elektromagnetickými měniči a jeho připojení pomocí čtyřžilového kabelu. To je jednak ekonomicky nákladné a jednak existuje již řada konstrukcí, v nichž jsou instalovány snímače pouze s jedním měničem, které vylučují použití takového typu budiče. Z tohoto důvodu jsou preferovány budiče schopné pracovat se snímači opatřenými pouze jedním měničem. Výhradně takovými systémy se proto budeme zabývat v dalším textu.

Současné konstrukce budičů, založených na pulzním buzení a měření tlumených kmitů struny, mají především následující nevýhody:

1. Malý odstup rušení od užitečného signálu může v některých případech vést až k nefunkčnosti budiče.
2. Nespolehlivost nebo nízká míra adaptovatelnosti budičů na různé typy snímačů – jde především o kmitočtový rozsah, velikost indukovaného napětí a zejména různou konstantu tlumení.
3. Nezanedbatelné ovlivnění měřeného údaje (vlastního kmitočtu struny) několikanásobnými budícími impulzy.
4. Neefektivní buzení struny do protifáze jejího pohybu díky nemožnosti zjištění její fáze.
5. Nemožnost kontinuálního snímání měřené veličiny v případě velkého časového odstupe budících pulzů.
6. Vlivem velkých budících impulzů pracuje snímač alespoň přechodně v „nelineárním režimu“, což může mít za následek zkreslení výsledků.

V následující kapitole je popsán nový princip budiče, který se snaží některé z uvedených nevýhod eliminovat nebo alespoň snížit jejich vliv.

4. Princip nového budiče a jeho návrh

Navržené řešení vychází ze stejného základního principu – vybuzení kmitů pulzem a snímání tlumených kmitů struny. Zpracování signálu a řízení činnosti celého zařízení je však navrženo zcela nově. Při řešení byly sledovány tyto cíle:

1. Nalezení nového principu určení rezonančního kmitočtu struny s aplikací moderních obvodových přístupů tak, aby umožňoval kontinuální měření tohoto kmitočtu.
2. Na tomto principu nalézt novou koncepci budiče, tj. elektrického systému umožňujícího převod měřené veličiny na veličinu elektrickou, vhodnou k dalšímu zpracování.
3. Budič by měl být dostatečně odolný vůči rušení a použitelný pro širokou škálu snímačů různých typů.
4. Nalezení principu efektivního buzení, které by minimálně ovlivňovalo měřený kmitočet.

Volba dvou vodičového připojení snímače, tj. budiče založeného na měření tlumených kmitů a snaha o co nejvyšší univerzalitu má své opodstatnění. I v současné době jsou vyráběny různé druhy snímačů, ale zejména je nutné k měření využívat různé snímače vyráběné v širokém časovém období. V situacích, kdy se monitoruje např. stav přehradních hrází, se totiž používají zabudované snímače i několik desítek let.

4.1. Princip budiče

Před vlastním popisem principu systému provedme nejprve rozbor nevýhod stávajících budičů, uvedených ve výčtu minulé podkapitoly 3.3.

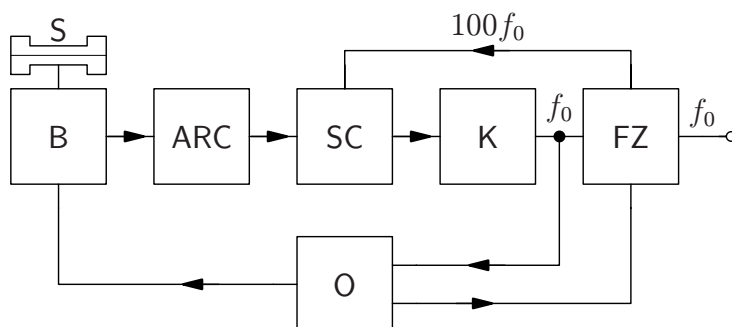
První a druhý bod popisují závažné nevýhody. Velmi slabý signál snímače znehodnocen vysokou úrovní šumu je nutné dostatečně zesílit (min. 60 dB) a přitom potlačit vliv rušení. To vede na použití několikanásobného, nejlépe selektivního zesilovače. Přitom platí, že čím bude šířka přenášeného pásma zesilovače užší, tím bude lépe potlačeno rušení, ale výrazně se tím sníží použitelnost takového systému – bude fungovat jen se snímači laděnými v úzkém rozsahu kmitočtů. Pokud však využijeme přeladitelný zesilovač (filtr) lze takový systém použít univerzálně.

Řešení nového budiče je založeno právě na použití takového přeladitelného selektivního zesilovače pro zesílení indukovaného napětí na snímací cívice snímače. Pro správnou funkci je však nutné zajistit samočinné, elektronicky řízené přeladování filtru podle aktuálního rezonančního kmitočtu. Pro realizaci přeladitelného úzkopásmového zesilovače byla zvolena technika spínaných kapacitorů. Pro synchronní ladění je použit fázový závěs.

Činnost celého systému je však nutné řídit zvláštním obvodem, nezbytným pro přechod do tzv. synchronního stavu. Je nutné si uvědomit, že při startu systému (zapnutí napájení) není znám rezonanční kmitočet struny a tudíž ani správné naladění filtru. Tuto funkci plní obvod ovládání, který dále generuje optimální okamžiky pro buzení struny. Budič pulzy se generují v okamžiku, kdy je amplituda kmitů struny již velmi malá, aby nedocházelo ke zbytečnému brždění struny (neefektivnímu buzení), ale ne nulová, aby byla zajištěna kontinuita kmitů na výstupu budiče. Tím je také zajištěno, že odstup budičích pulzů je největší možný, což povede k minimálnímu ovlivnění měřené veličiny (kmitočtu) a zároveň umožnění jejího kontinuálního měření.

Z tohoto jednoduchého rozboru vyplývá i hlavní myšlenka principu navrhovaného budiče, který by měl být schopen *adaptace na různé vlastnosti a typy snímačů*. Zjednodušené blokové schéma tohoto principu je uvedeno na následujícím obrázku 9,

kde S je strunový snímač,
 ARC aktivní RC filtr typu pásmová propust,
 SC úzkopásmový přeladitelný filtr typu pásmová propust,
 K komparátor,
 FZ fázový závěs a
 O je blok ovládání celého systému.



Obrázek 9: Základní blokové schéma budiče.

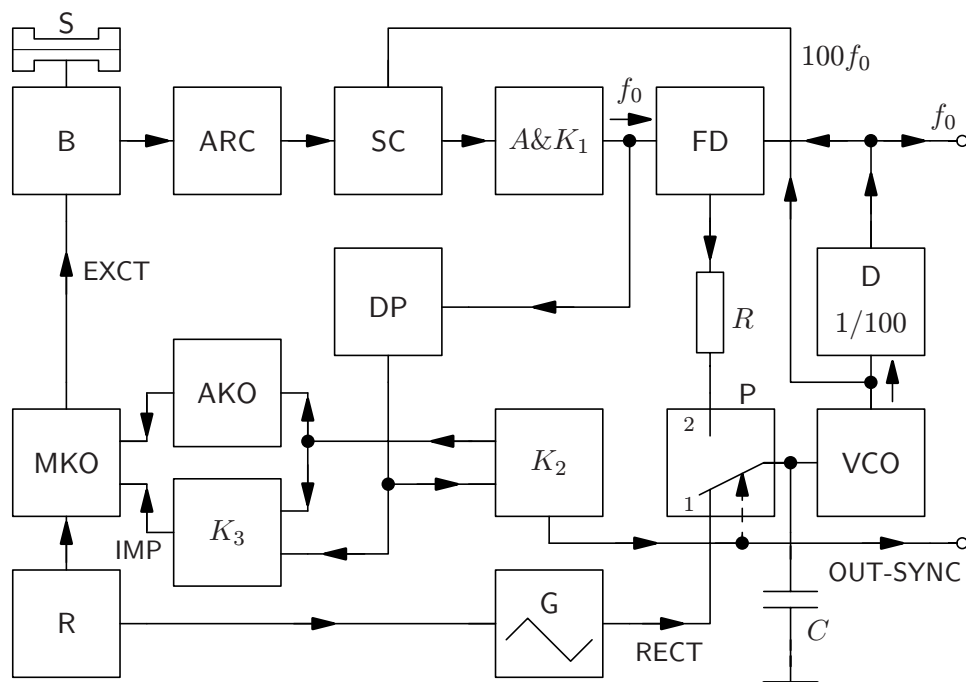
Uvedené schéma lze popsat následujícími body:

- Zesílení signálu je rozděleno na „předzesilovací“ ARC filtr typu pásmová propust s pevně daným, dostatečně širokým propustným pásmem. V kaskádě za ním je zapojen přeladitelný filtr realizovaný technikou spínaných kapacitorů (SC) s velmi úzkým propustným pásmem. Tím se do značné míry potlačí rušení indukované v přívodních vodičích snímače.
- Výstupní signál z SC filtru prochází komparátorem K, na jehož výstupu je v synchronním stavu obdélkový signál o kmitočtu f_0 rovném rezonančnímu kmitočtu struny. Na něj je pak zavěšen fázový závěs FZ. Ladicí kmitočet SC filtru je přitom získáván z fázového závěsu a systém se tak adaptuje přímo na vlastnosti připojeného snímače.
- Pro start celého systému je použito speciální zapojení (ovládání O), které zajistí přechod do synchronního stavu. Tento obvod pak generuje i potřebné budící impulzy (časové okamžiky pro buzení). Ty se generují v závislosti na vlastnostech snímače (délce odezvy kmitů struny), což je optimální jednak pro vlastní vybuzení snímače, jednak pro minimální ovlivnění výstupního kmitočtu.
- Celý systém pracuje nezávisle, má vlastní řízení a je vhodný i pro dynamická měření.

Podrobný popis funkce bude objasněn na kompletním blokovém schématu, které je uvedeno na obrázku 10.

Snímač je prostřednictvím budiče buzen impulzy generovanými monostabilním klopným obvodem MKO, který je ovládán buď náběžnou hranou signálu IMP z komparátoru K_3 nebo sestupnou hranou pomocného astabilního klopného obvodu AKO. Jejich význam bude vysvětlen později.

Vybuzené kmitů snímače jsou zesilovány v podobě indukovaného napětí nejprve „klasickým“ ARC filtrem. Ten je konstruován jako pásmová propust 6., případně 4. řádu



Obrázek 10: Kompletní blokové schéma budiče.

s propustným pásmem 500 Hz až 2.2 kHz³ a zesílením cca 40 dB. Za ním je řazen přeladitelný úzkopásmový SC filtr 4. řádu se zesílením min. 20 dB. Za tímto filtrem už následuje další zesilovač a komparátor ($A&K_1$), na jehož výstup je připojen fázový závěs FZ. Ten je zachycen na rezonančním kmitočtu struny a jeho napětím řízený oscilátor VCO kmitá na stonásobku tohoto kmitočtu, díky použitému děliči D.⁴ SC filtr je laděn kmitočtem VCO fázového závěsu, přičemž tento kmitočet odpovídá přesně stonásobku kmitočtu propustného pásma SC filtru. Tím je zajištěno, že SC filtr je naladěn přesně na rezonanční kmitočet struny snímače. Výstupní (TTL) signál o kmitočtu rovném vlastním kmitům připojeného strunového snímače je odebírán za děličem D fázového závěsu. Pokud se tedy změní mechanické poměry, změní se kmitočet struny, tím se změní i kmitočet fázového závěsu a dojde k doladění SC filtru. Takto je systém funkční v zasynchronizovaném stavu. Je však nutné řešit dvě otázky, aby byl systém plně funkční.

1. Otázku generování budicí pulzů a jejich časových okamžiků, kdy jsou přivedeny na snímač.
2. Jak zajistit přechod do synchronního stavu systému po jeho zapnutí, případně výpadku napětí?

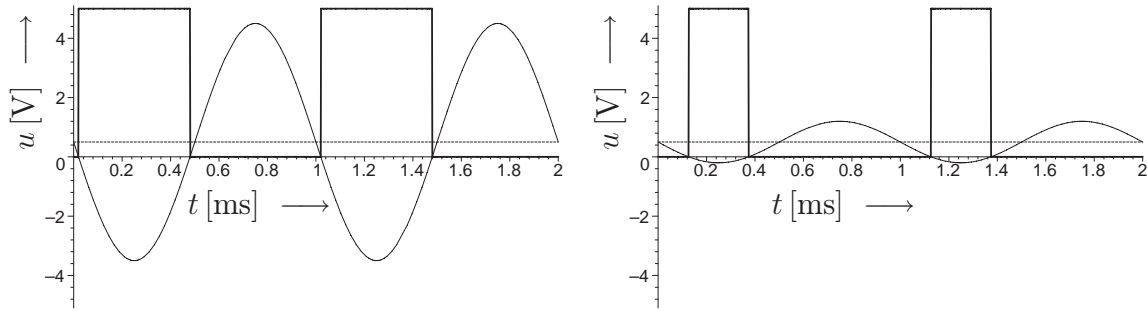
4.1.1. Tvorba budicích pulzů

První otázka je částečně řešena již v bloku zesilovače a komparátoru $A&K_1$, kde je před komparací zavedena do užitečného signálu nenulová stejnosměrná složka. Jestliže potom nastavíme komparační úroveň na 0 V, bude výstupní napětí komparátoru K_1 měnit svoji

³V tomto rozsahu je laděna převážná většina snímačů.

⁴Jak bude ukázáno dále, v synchronním stavu je velikost signálu OUT-SYNC +5 V, tj. log. 1 a přepínač P je přepnut do polohy 2 – vstup VCO je spojen s výstupem fázového detektoru FD a smyčka fázového závěsu je uzavřena.

střídu, tj. i střední hodnotu, podle velikosti vstupního signálu tak, jak je naznačeno na obrázku 11.



Obrázek 11: Výstupní napětí invertujícího komparátoru pro dvě úrovně vstupního signálu se zavedenou stejnosměrnou složkou, která je naznačena čárkovanou čarou.

Střední hodnota výstupního napětí komparátoru K_1 je získávána pomocí dolní propustí DP. Pokud dokmitávající struna snímače má již malou výchylku, je indukované napětí snímače malé, a tím je malá i střední hodnota výstupního signálu komparátoru K_1 . Při zvolené úrovni pak dojde k překlopení komparátoru K_3 a signál IMP aktivuje monostabilní klopný obvod MKO, který vygeneruje nový budící impuls pro snímač. Tím se opět zvýší vstupní signál komparátoru K_1 , vzroste střední hodnota jeho výstupního signálu a celý proces se opakuje, přičemž *jsou udržovány kontinuální kmity struny snímače, vhodné i pro dynamické snímání měřené veličiny*. Uvedeným postupem je navíc zajištěno, že buzení struny bude efektivní – budící pulz je generován až při velmi malé amplitudě kmitů struny. Nemůže tedy dojít ke stavu, kdy budící pulz přijde v okamžiku, kdy struna kmitá ještě s dostatečně velkou amplitudou a právě se vzdaluje od budící cívky. V tom případě by ji budící pulz přitahoval zpět (brzdil) a vybudění by bylo neefektivní – tzv. buzení v protifázi, kdy energie nutná pro rozkmitání struny se spotřebuje na její zbrždění. *Navrhovaný systém se díky popsanému principu adaptuje na různé typy snímačů s různým činitelem tlumení struny (různou dobou dokmitávání struny), přičemž buzení zůstává efektivní.*

Jak již bylo uvedeno výše, optimální buzení kmitající struny – „buzení ve fázi“ nelze v praktických podmínkách nikdy uskutečnit díky fázovým posuvům signálu, zejména vlivem připojovacího vedení, u kterého obvykle neznáme jeho parametry ani přesnou délku. Pokud není možno tyto posuvy jednoduše vyhodnocovat, je nutné se buzení ve fázi vzdát. Popisovaný způsob buzení je proto vhodný jak pro svoji funkčnost, tak jednoduchost.

4.1.2. Přejít do synchronního stavu

Dosud byl popisován systém v zasynchronizovaném stavu. Pokud však dojde k zapnutí napájecího napětí, není systém synchronizován a VCO kmitá na volnoběžném (obvykle nejnižším) kmitočtu. Tím není naladěný SC filtr a výstupní napětí za komparátorem K_1 je nulové. Typ fázového detektoru je nutné volit tak, aby střída vstupního signálu neovlivňovala jeho funkci, tj. hranově řízený. Vzhledem k těmto skutečnostem a vzhledem ke složitosti celého zařízení nemůže dojít k „samovolnému“ zachycení fázového závěsu – navíc není snímač buzen, ani není naladěný SC filtr. Pro zachycení je tedy nutné po zapnutí (nebo signálu RESET) vyvolat následující postup.

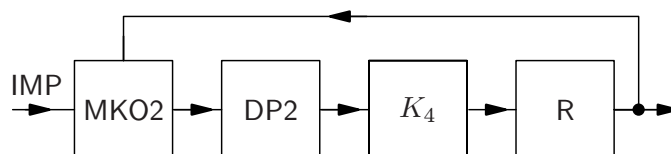
Díky nulovému signálu komparátoru K_1 deaktivuje komparátor K_2 funkci komparátoru K_3 a naopak aktivuje astabilní klopný obvod AKO, který začne periodicky budit snímač prostřednictvím MKO. V tomto stavu je dále nulový signál OUT-SYNC (log. 0)

a přepínač P je přepnut do polohy 1. Oscilátor fázového závěsu (VCO) je nyní řízen pomaloběžným generátorem „trojúhelníkového“ průběhu, který začne zvyšovat svoje napětí z hodnoty 0 V. Oscilátor fázového závěsu tedy zvyšuje svůj kmitočet a tím se příslušně přeladuje i SC filtr a to až do stavu, kdy se naladí na kmitočet signálu z filtru ARC, tj. na rezonanční kmitočet struny, která je nyní periodicky buzená díky AKO. Jakmile se naladí SC filtr, objeví se na jeho výstupu signál, který zpracuje komparátor K_1 a následně dojde k překlopení komparátoru K_2 . Tím se spojí smyčka fázového závěsu, který se zachytí, deaktivuje se AKO a budící pulzy se začnou generovat komparátorem K_3 , jak bylo výše uvedeno.

Komparační úrovně komparátorů K_2 a K_3 musí být nastaveny tak, aby se při poklesu napětí za obvodem DP v synchronním stavu nejprve překlopil komparátor K_3 a tím obnovil vybudění struny dříve, než se překlopí komparátor K_2 , čímž by došlo k rozpojení smyčky fázového závěsu a zablokování komparátoru K_3 .

Posledním uvedeným obvodem je resetovací obvod (R), který zajišťuje definované podmínky po zapnutí nebo poklesu napájecího napětí. Ten zablokuje na definovanou dobu činnost MKO, čímž se přestane budit snímač a dojde k počátečnímu nesynchronizovanému stavu – signál OUT-SYNC přejde do log. 0. Po tuto dobu zajistí zároveň obvod R nastavení počátečních podmínek generátoru G (vybití kondenzátoru C7 – viz. obrázek 14 dále, tj. i kondenzátoru C v blokovém schématu). Po odblokování činnosti obvodem R začne výše popsáný děj, vedoucí k synchronizaci systému.

Na závěr je nutné se zmínit o problémech, které mohou nastat při synchronizaci systému. Ty nastávají díky přechodovým dějům při buzení snímače. Pro vybudění struny, je nutné přivést na budící cívku poměrně velký napěťový pulz. Jeho šířku je vhodné volit tak, aby byla struna dostatečně vybudena (cívkou protekl dostatečný proud), ale zároveň jeho trvání nesmí být dlouhé, aby nedošlo k příliš velkému ovlivnění snímaného kmitočtu (přerušeni vlastních kmitů struny). V každém případě vznikne jak ve vlastní budící cívce, tak v připojovacím kabelu přechodový děj, který je nutné minimalizovat. Dále je nutné si uvědomit, že budící cívka je zároveň cívkou snímací, tj. je připojena k velmi citlivému zesilovači. Pokud i malá část budícího pulzu projde na vstup tohoto zesilovače, dojde k přechodovému ději i zde. Ten vyvolá na výstupu harmonické kmity (jedná se o selektivní zesilovač – filtr). Pokud se při procesu synchronizace na tento kmitočet naladí SC filtr, dojde k nesprávnému zachycení fázového závěsu a tím „falešné synchronizaci“ celého systému. Kmitočet výstupního signálu je totiž dán vlastnostmi vstupních obvodů (zesilovače) a nikoli vlastnostmi snímače. Přechodovým dějům lze zabránit nebo je alespoň minimalizovat vhodným zapojením budícího obvodu, jak bude ukázáno dále. Přesto je však vhodné umět případnou „falešnou synchronizaci“ vyloučit (rozpoznat). Pokud kmity, na kterých se systém zachytí, vzniknou mimo snímač, tj. vlivem přechodných jevů budou daleko více tlumeny. Díky tomu bude systém produkovat budící pulzy s daleko kratší periodou a tím lze tuto skutečnost rozpoznat. Řešením pak může být úprava výše uvedeného blokového schématu z obrázku 10 přidáním dalších obvodů tak, jak ukazuje obrázek následující.



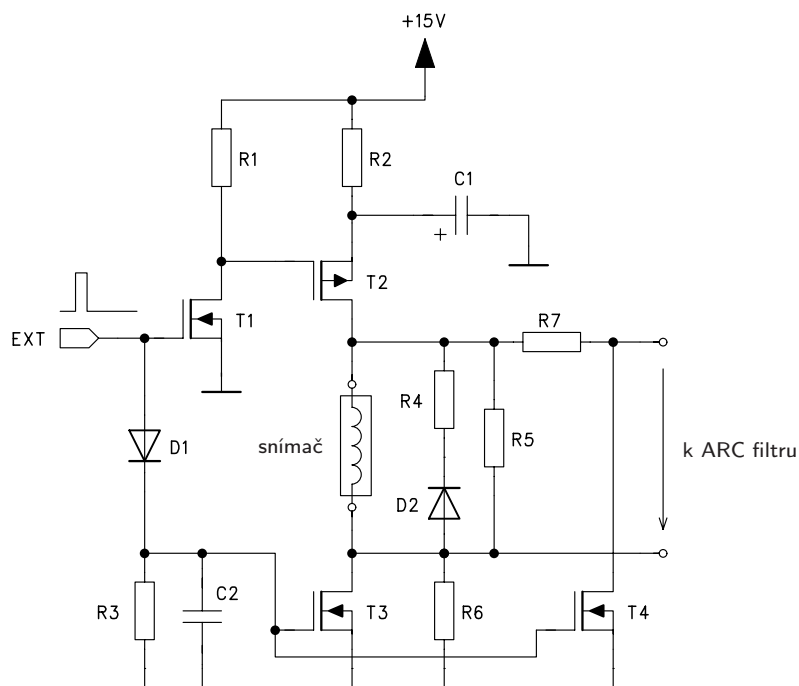
Obrázek 12: Doplnění blokového schématu budiče z obrázku 10 o obvod indikující špatné zachycení.

Pokud budou mít budící pulzy⁵ v zasynchronizovaném stavu (nikoli v procesu synchronizace) krátkou periodu, dojde ke zvýšení střední hodnoty signálu za přídavným monostabilním obvodem MKO2 a tím ke zvýšení napětí na dolní propusti DP2, což zapříčiní překlopení komparátoru K_4 , který vyvolá reset systému.

Je zřejmé, že realizaci celého systému lze uskutečnit několika způsoby. To se týká zejména části ovládání, které lze jistě realizovat například s použitím moderních procesorů. Je také evidentní, že by to znamenalo procesor s poměrně rychlým A/D převodníkem a následným zpracováním dat. Některé části (budič, zesilovač, filtr) je však nutné realizovat pomocí analogové techniky. Obvodové řešení uvedené v následující kapitole je pouze ukázkou jedné možnosti realizace, v tomto případě „klasické“. Ta je však v tomto případě poměrně efektivní, protože s využitím několika obvodů lze realizovat kompletní princip. I z tohoto důvodu je zařazena další podkapitola obsahující konkrétní obvodové řešení některých vybraných částí systému, spolu se základním popisem.

4.2. Návrh a obvodové řešení systému

Jako první je uvedena obvodová struktura vlastního budiče B. Ten zesiluje pulzy EXCT z MKO – připojuje na dobu trvání pulzu (cca $200 \mu\text{s}$) na cívku snímače napětí o velikosti 15 V a tím je zajistí dobré vybudení struny. Po odeznění přechodového děje na budící cívce je signál zesilován ARC filtrem. Budič má ještě jednu důležitou úlohu – minimalizovat přechodový děj a zároveň chránit následující zesilovač proti přebuzení. Konkrétní schéma vlastního budiče je ukázáno na obrázku 13.



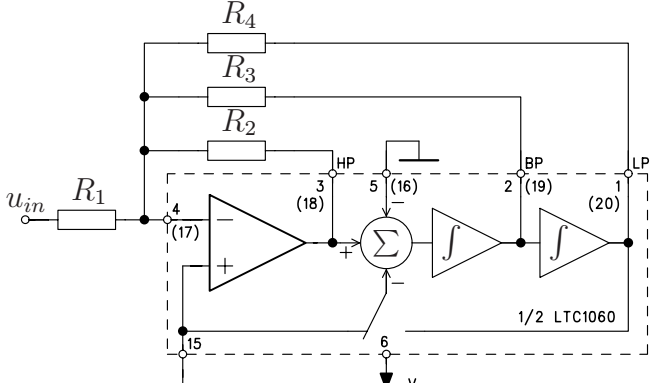
Obrázek 13: Schéma vlastního budiče v „komplementárním“ (symetrickém) zapojení s blokovacím obvodem.

Jedná se o zapojení, umožňující následné připojení diferenčního vstupu zesilovače (ARC filtru) pro potlačení souhlasného rušivého signálu. Přechodový děj je minimalizován pomocí rezistorů R4, R5, diody D2 a zejména pak tranzistorem T4, který zajišťuje také

⁵v našem případě signál IMP

ochranu vstupních obvodů zesilovače. Jeho gain spolu s řídicí elektrodou tranzistoru T3 je ovládán spouštěcími pulzy EXT budiče. Ty jsou však prodlouženy pomocí C2, R3 o cca 1 ms, aby byla zajištěna potřebná ochrana – na výstupu by se během trvání přechodného děje neobjeví napětí větší než 1 mV.

Následuje ukázka zapojení SC filtru, který je složen ze dvou shodných bloků druhého řádu řazených v kaskádě. Jedná se tedy o filtr 4. řádu, jak bylo výše uvedeno. Je realizován pomocí obvodu LTC1060. Zapojení jednoho bloku, včetně velikostí jednotlivých rezistorů je uvedeno v tabulce 1.

N	schéma zapojení	hodnoty prvků
1		$R_1 = 18.0 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 10.0 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 100.0 \text{ k}\Omega$ $R_4 = 10.0 \text{ k}\Omega$ ratio = 100 výstup: BP

Tabulka 1: Realizace jednoho bloku SC filtru pomocí obvodu LTC1060

Zesílení bloku lze měnit jednoduše pomocí změny velikosti rezistoru R_1 . V tomto případě je jeho velikost zvolena tak, aby zesílení v propustném pásmu dvou těchto bloků zapojených v kaskádě bylo 30 dB. Činitel jakosti přenosové funkce jednoho bikvadu byl volen $Q = 10$ a poměr hodinového (ladícího) kmitočtu a kmitočtu středu propustného pásma filtru $f_{clk}/f_0 = 100 = \text{ratio}$. Tento poměr musí souhlasit s dělicím poměrem děliče D fázového závěsu na obrázku 10. Potom je SC filtr v synchronním stavu naladěn přesně na rezonanční kmitočet struny.

Za tímto filtrem následuje blok zesilovače a komparátoru $A\&K_1$, kde je zavedena potřebná stejnosměrná složka, aby komparátor pracoval tak, jak udává obrázek 11. Jeho obvodová realizace není uvedena, stejně jako zapojení fázového závěsu, který může být realizován např. známým obvodem 4046.

Pro zajímavost je na závěr uvedena možná obvodová realizace bloků ovládání celého systému. Zapojení zajišťuje jednak přechod do synchronního stavu a jeho udržování. Jednotlivé bloky jsou spolu provázány a tvoří jeden celek, viz. obrázek 14.

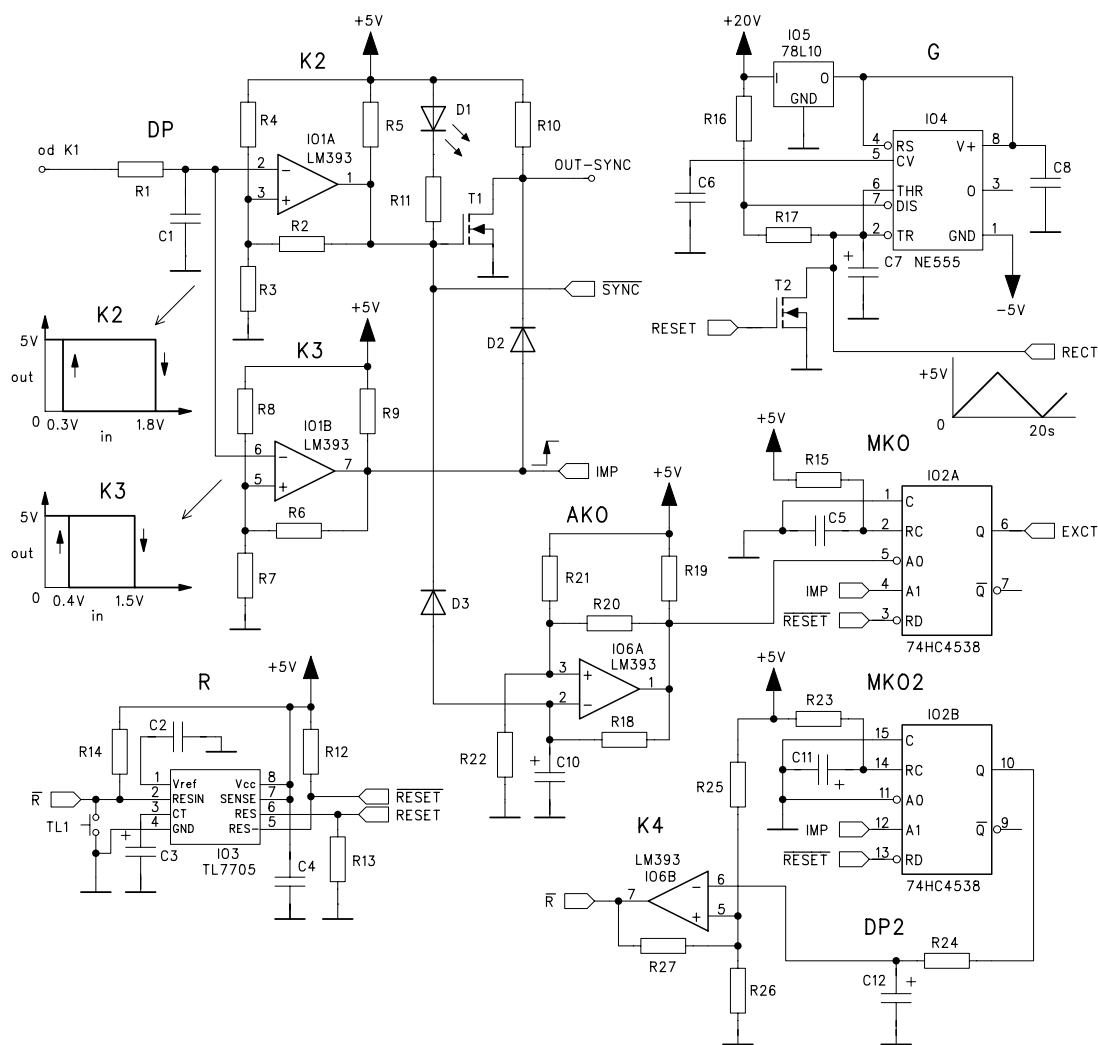
Vzhledem k zaměření publikace a poměrnou jednoduchost zapojení není zde uveden podrobný popis činnosti obvodu. Ten je však patrný z vlastního zapojení, které ukazuje jak lze uvedenou činnost jednoduše realizovat pomocí *klasické analogové techniky*.

V zapojeních není rozlišena digitální a analogová společná svorka (zem), což je důležité vzhledem k omezení rušivých signálů, vznikajících ve vlastním zařízení.

Popsaná činnost byla ověřena funkčním vzorkem na různých typech strunových tenzometrických snímačů.

5. Závěr

Použití strunových tenzometrů pro měření mechanických veličin má i dnes své opodstatnění a v některých případech je nenahraditelné. Jsou to však často specializované oblasti



Obrázek 14: Kompletní obvodové schéma ovládání budiče.

zejména stavebnictví. Z hlediska konstrukce budičů je tato oblast odborné veřejnosti prakticky neznámá. Je to zřejmé i z výpisu literatury, jak je uvedeno již v úvodu. Nicméně výzkum v této oblasti je potřebný, což ukazují právě zkušenosti z praxe. Spolehlivých budičů není mnoho a jsou to převážně firemní budiče určené právě pro několik málo typů snímačů dané firmy.

Budiče doposud navržené autorem byly úspěšně použity na několika tuzemských stavbách, jak dokládá reference přiložená k materiálům habilitační práce. Jedná se o příklad úspěšné spolupráce v odvětví stavebnictví, strojírenství a elektrotechniky.

Při jejich vývoji autor využil i poznatky a výsledky práce z jeho zaměření. Například veškeré návrhy a simulace filtrů nově vyvíjeného budiče byly prováděny v programu Maple s využitím knihovny Syntfil. O jisté hodnotě tohoto návrhu svědčí i schválený užitný vzor, který byl zapsán na Úřadu průmyslového vlastnictví pod názvem „Zařízení pro kontinuální měření kmitů strunových tenzometrických snímačů s dvou vodičovým připojením“ dne 21.08.2006, pod číslem zápisu 16806. Autor na uvedenou konstrukci budiče podal také patentovou přihlášku, která je v současné době projednávána.

Literatura

- [1] Petřík M., Kratochvíl J., Záruba-Pfefferman J.: *Rozvoj strunové a polovodičové tensometrie pro aplikaci ve stavebnictví*, ČVUT Stavební ústav, Praha 1975
- [2] Hospodka J.: *Měření vlastních kmitů elektromechanických rezonátorů*, Dizertační práce, ČVUT FEL, Praha 1996.
- [3] Hospodka J., Struhovsky P.: *New Method for Measuring of Natural Frequency of Tensometrical String Sensors*. Proceedings of the Applied Electronics 2006 International Conference. Pilsen 2006 s. 59-62. ISBN 80-7043-442-2.
- [4] Merhaut Josef: *Teoretické základy elektrotechniky*, Akademia, Praha 1985
- [5] Škvor Zdeněk: *Equivalent Circuits*, Elsevier Science Publisher, Amsterdam 1991
- [6] Kratochvíl J.: *Autosynchronní půlperiodické buzení netlumených kmitů struny pro měřicí přístroje v úsporném zapojení s dvoužilovým kabelem*, ČVUT Stavební ústav, Praha 1971
- [7] Záruba-Pfefferman J., Švanda J., Brettl J., Hrubý J.: *Zapojení pro elektromagnetické buzení kmitavého pohybu*, patent č. 277715, r. 1993
- [8] Záruba-Pfefferman J.: *Posouzení vhodnosti strunové měřicí metody pro sekundární etalonáž*, Zpráva č. M/58/93 podle smlouvy o zajištění metrologie, Kloknerův ústav ČVUT, Praha
- [9] William V. Bailey, Lebanon, N.H.: *Vibrating Wire Meter*, Patentový spis US č. 3,889,525, r. 1975
- [10] Nowakowski L., Muter M., Golonka E.: *Spósob i układ pobudzania tensometrycznego czujnika strunowego*, Patentový spis PL č. 163674, r. 1991
- [11] David c. Miley: *Continuos Cable Tension Monitor*, Patentový spis GB č. 1 480 702, r. 1975
- [12] Jens K. Simonsen: *Apparatus for Measuring a Force*, Patentový spis US č. 4,669,320, r. 1987
- [13] В. М. Разумихин, Д. В. Рамм, Г. А. Синельников-Мурылев, Л. Г. Эткин: *Устройство для возбуждения резонаторов виброчастотных датчиков*, Patentový spis SSSR č. 365599, r. 1973
- [14] Robert B. McLeod, Clinton, Mass: *Stable-Fast Start Elestromechanically Controlled Oscillator*, Patentový spis US č. 3,460,057, r. 1969
- [15] Kratochvíl J.: *Strunový oscilátor*, Patentový spis ČSSR č. 125559, r. 1967
- [16] Linear Technology Web site.
<http://www.linear.com/>

Dr. Ing. Jiří Hospodka

narozen 30.8. 1967 v Havlíčkově Brodě, národnost: česká, adresa: ČVUT FEL, katedra Teorie obvodů, Technická 2, Praha 6, E-mail: hospodka@feld.cvut.cz

Vzdělání

1995 Dr., ČVUT FEL, specializace: Teoretická elektrotechnika
1991 Ing., ČVUT FEL, specializace: Mikroelektronika

Zaměstnání

1989-1991 částečný úvazek ČVUT FEL, katedra fyziky, obvody plazmových zobrazovačů
od 1995 odborný asistent ČVUT FEL, katedra teorie obvodů

Pedagogická praxe

Přednášky: Analýza elektronických obvodů
Počítačové řešení elektrických obvodů
Elektronické obvody – kombinované studium

Cvičení: Elektrické obvody 1 a 2
Elektronické obvody
Analýza elektronických obvodů
Analogové a digitální soustavy
Obvodová technika funkčních bloků
Základy elektronických obvodů

Vedení diplomantů:
vedoucí 11 úspěšně obhájených diplomových prací

Vedení doktorandů:
školitel 2 PHD studentů, školitel-specialista 2 PHD studentů

Řešené projekty

2001 *Syntéza elektrických filtrů v MAPLE*, grant ČVUT č. 300107713.

2002 *Optimalizace výuky Elektronických obvodů a funkčních bloků*, grant ČVUT č. 0216313, spoluřešitel.

2002 – 2004 *Synthesis of Selective Systems*, GAČR č. 102/02/1072, spoluřešitel.

2003 *Multimediální podpora výuky lineárních obvodů s využitím internetu*, grant FRVŠ č. 2447/F1/d.

2003 *Modernizace laboratoře lineárních obvodů*, grant ČVUT č. 0316913.

2004 *Syntéza elektrických filtrů v programu MAPLE*, grant ČVUT č. 0414413.

2005 *Podpora výuky elektronických obvodů s využitím internetu*, grant FRVŠ č. 1570/F1/d.

2005 – 2007 *Zařízení pro kontrolu kvality elektrické energie*, grant programu Tandem č. FT-TA2/036, spoluřešitel.

2006 *Příprava předmětu „Elektrické filtry“*, grant FRVŠ č. 2837/F1/b, spoluřešitel

Realizované dílo – software

Realizace knihovny *Syntfil* pro návrh elektrických filtrů v programu Maple. 2005 knihovna zařazena do projektu MapleConnect společnosti Maplesoft, divize Waterloo Maple Inc.