

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

Zveřejněná podle §31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2013-687

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

H03H 17/04 (2006.01)

G06F 17/00 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **09.09.2013**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **04.02.2015**
(Věstník č. 5/2015)

(71) Přihlašovatel:
Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava,
Ostrava-Poruba, CZ

(72) Původce:
prof. Ing. Jiří Tůma, CSc., Štramberk, CZ
Ing. Pavel Šuránek, Hlučín, CZ
Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D., Bánov, CZ

(54) Název přihlášky vynálezu:
**Způsob aktivního tlumení vibrací
mechanických poddajných struktur pro
různou polohu aktuátoru a snímače vibrací
využívající all-pass filtr druhého řádu**

(57) Anotace:
Způsob aktivního tlumení vibrací pružné mechanické
poddajné struktury regulovaným působením tlumící síly
v místě, které není totožné s místem, ve kterém je
umístěn snímač vibrací. Tento způsob řeší problém
nestability regulační smyčky s málo tlumenou
mechanickou strukturou a rozdílným typem zpětné vazby
pro některé módy kmitání.

CZ 2013 - 687 A3

Způsob aktivního tlumení vibrací mechanických poddajných struktur pro různou polohu aktuátoru a snímače vibrací využívající all-pass filtr druhého řádu

Oblast techniky

Vynález se týká aktivního tlumení vibrací (active vibration control) mechanických poddajných struktur regulovaným působením tlumící silou v místě, které není totožné s místem, ve kterém je umístěn snímač vibrací. Vynález řeší problém nestability regulační smyčky s málo tlumenou mechanickou strukturou a rozdílným typem zpětné vazby pro některé módy kmitání.

Dosavadní stav techniky

Podle současného stavu techniky je velikost tlumící síly určována regulátorem obsahující složku proporcionální, derivační a popřípadě také integrační. Vstupem regulátoru je signál vibrací v jednotkách výchylky nebo rychlosti anebo zrychlení. Seřízení takového regulátoru je omezeno přirozeným tlumením kmitání soustavy. Jestliže by byla soustava ideálně bez tlumení, pak pro stabilitu funkce regulačního obvodu pro aktivní tlumení je zapotřebí, aby byla buď měřena rychlost vibrací, nebo v případě měření výchylky by měl regulátor obsahovat derivační složku, anebo v případě měření zrychlení by měl regulátor obsahovat integrační složku.

Zmíněné uspořádání snímače a aktuátoru se nazývá non-located a na rozdíl od located konfigurace, jejíž vlastností je měření vibrací v místě působení tlumící síly. Non-located konfigurace vykazuje nestabilitu obvodu aktivního tlumení při překročení jisté hranice zesílení regulátoru. Kmitání mechanické struktury se vybudí poruchovou silou a úkolem aktivního tlumení vibrací je potlačit vliv poruchové síly a kmitání struktury zmenšit. V případě vetknutého nosníku se nejčastěji měří vibrace na volném konci nosníku a aktuátor působí blízko místa vetknutí. Proměnlivá tlumící síla aktuátoru, která působí na nosník, je výstupem regulátoru, na jehož vstupu je signál vibrací.

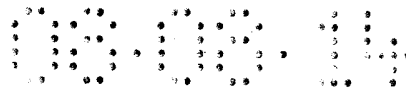
Prostorové kmity soustavy jsou složeny z módů, které jsou charakterizovány úhlovou frekvencí ω_0 , poměrným tlumením ξ soustavy a tvarem kmitu, který je dán pro n -tý mód kmitání souřadnicemi $v_{n,r}, r = 1, 2, \dots, N$. Modální vlastnosti lze jednoduše zjistit výpočtovou nebo experimentální modální analýzou. Vybuzení příslušného módu kmitání se děje

odpovídající frekvenční složkou budící síly. Laplaceův přenos síly, jako funkce komplexní proměnné s , působící na q -tý element z N módů kmitání nosníku na výchylku r -tého elementu je dán vztahem

$$H_{r,q}(s) = \sum_{n=1}^N \frac{k_n}{\omega_n^2 + 2\xi\omega\omega_0s + s^2}, \quad r, q = 1, 2, \dots, N.$$

Tvary kmitů určuje residuum $k_n = v_{nr}v_{qn}$, které je označováno také jako modální konstanta. Pro collocated konfiguraci má residuum stejné znaménko pro všechny módy kmitání a regulátor je seřiditelný s použitím běžných metod. Zpětná vazba je pro všechny módy kmitání nastavena jako záporná a tudíž stabilizující. U konfigurace non-collocated nemají rezidua pro všechny módy kmitání stejné znaménko a proto se zpětná vazba pro regulaci jeví pro módy kmitání se záporným reziduem jako kladná, tudíž průběh regulace je destabilizující. Přenos charakterizují jeho póly, což jsou kořeny polynomu v proměnné s ve jmenovateli této funkce. Reálná soustava např. nosník, není samovolně rozkmitán, jelikož jeho póly leží ve stabilní polorovině komplexní roviny, tj. vlevo od imaginární osy. Zvyšováním zesílení regulátoru se některé póly přenosové funkce s kladným reziduem vzdalují od hranice stability, zatímco zbylé póly se záporným reziduem se k hranici stability přibližují a rezerva v přirozeném tlumení se vyčerpává a celkový efekt aktivního tlumení vibrací se snižuje. Kdyby byla reálná soustava bez přirozeného viskózního a strukturálního tlumení, pak nelze kmitání zastavit aktivním tlumením vůbec. Módy kmitání, které způsobují nestabilitu aktivního tlumení, nazveme nestabilní.

Velmi často jsou metody snižování vibrací využívány v automobilovém průmyslu. Jako příklad uvádíme ochranný dokument **US 2013131950**, který se zabývá hnacím systémem pro vozidla a metodou řízení mající výhody v efektivním snížení vibrací vozidla. Tento dokument však neřeší způsob umístění aktivního prvku a snímače. Dalším dokumentem z této oblasti může být **EP 2572983**, který se týká potlačování vibrací na vozidle, ale rovněž neřeší způsob umístění aktivního prvku a snímače a nevyužívá all-pass filtr. Tato problematika je však řešena i v jiných odvětvích, jak ukazuje ochranný dokument **US 2013085617**, který se zabývá potlačováním vibrací mechanické konstrukce, přičemž je tlumící prvek umístěn přímo na této konstrukci a využívá regulátor k aktivnímu potlačování vibrací. Řešeními, které se přímo zabývají návrhem all-pass filtru a nikoliv jeho funkcí při tlumení vibrací jsou ochranný dokument s číslem **US 2010077014** a také ochranný dokument **JP 2003152503**. V dokumentu je popsán all-pass filtr ve kterém je střední frekvence nezávisle stavitelná a pracující ve vysokém frekvenčním pásmu, ve kterém však nemůže být použit operační zesilovač. Dalším



ochranným dokumentem v této oblasti je US5687101, který se zabývá rychlým zpracováním signálů. Následující dokument US 5910904 využívá all-pass filtr ve zvukovém ekvalizéru a tak představuje jinou aplikaci než je tlumení vibrací. V ochranném dokumentu US2002196860 využívá all-pass filtr jako součást demodulátoru multiplexového signálu.

Podstata vynálezu

Uvedené nevýhody non-located konfigurace odstraňuje kompenzace závislosti fáze přenosu regulovaného systému na frekvenci. Pro módy kmitání s opačným znaménkem rezidua, tzv. nestabilní módy, je v určitém pásmu frekvencí změněna fáze akční veličiny do protifáze (posun o 180°). Ke změně fáze je použit korekční filtr typu all-pass filter druhého řádu, který je naladěný na frekvenci nestabilního módu, tj. módu s opačným znaménkem rezidua oproti ostatním módům kmitání, pro které má záporná zpětná vazba stabilizující účinek. All-pass filter je v odborné literatuře znám, avšak pro účely této přihlášky jsou jeho vlastnosti dále blíže definovány. Tento filtr má Laplaceův přenos s proměnnou s následující

$$G_{APF}(s) = \frac{T^2 s^2 - 2\xi_{APF} T s + 1}{T^2 s^2 + 2\xi_{APF} T s + 1}.$$

s komplexně sdruženými póly. Parametr T je časová konstanta a parametr ξ_{APF} má význam tlumení s obdobným významem jako u kmitavého článku. Zesílení filtru je pro všechny frekvence jednotkové $|G_{APF}(j\omega)| = 1$, avšak fáze přenosu $\angle G_{APF}(j\omega)$ se mění v závislosti na frekvenci. Pro úhlovou frekvenci $\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/T$ je fázové zpoždění rovno $-\pi$ radiánů. Od nulové frekvence až do frekvence f_0 roste fázový posun od nuly do π a pak od této frekvence se rozbalená fáze zvětšuje až do -2π . Šířka frekvenčního pásma s výraznou změnou fáze se nastavuje poměrným tlumením ξ_{APF} filtru. Výhodou all-pass filtru druhého řádu oproti dvěma all-pass filtrům prvního řádu v sérii, je volitelnost šířky frekvenčního pásma, ve kterém se mění fáze do intervalu kolem fáze $-\pi$ radiánů. Závislost fáze na frekvenci pro poměrné tlumení ξ_{APF} o velikosti 0,707 a 0,2 je znázorněna na obrázku 1. Velikost poměrného tlumení je volena tak, aby filtr byl robustní a málo citlivý na případnou změnu rezonanční frekvence.

Podstatou vynálezu je to, že časová konstanta all-pass filtru T je nastavena tak, že je rovna převrácené hodnotě úhlové frekvence ω_0 nestabilního módu kmitání, jehož destabilizační efekt je třeba kompenzovat. Počet korekčních filtrů v sérii je stejný, jako počet módů s opačným znaménkem rezidua ve zvoleném frekvenčním pásmu poruchové budící síly.



Korekční all-pass filtr má určité frekvenční pásmo podstatné změny fáze, které je nastaveno tak, aby tento korekční filtr neovlivňoval módy kmitání s nejbližší vyšší a nižší frekvencí.

Korekční filtr může být řešen jako číslicový nebo analogový. Pro číslicový regulátor je vhodný číslicový all-pass filtr, jehož blokové schéma je na obrázku 4. Protože je filtr druhého řádu, zpracovává posloupnost vstupních vzorků signálu $x(k)$ o pořadí k na posloupnost výstupních vzorků signálu $y(k)$ podle vzorce

$$y(k) = (bx(k) + cx(k-1) + ax(k-2) - cy(k-1) - by(k-2))/a, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

kde koeficienty filtru a, b, c jsou dány vzorcem $a = ((c + \xi_{APF})^2 + 1 - \xi_{APF}^2)$, $b = (d - \xi_{APF})^2 + 1 - \xi_{APF}^2$ a $c = 2(1 - d^2)$, přičemž parametr d je pro vzorkovací frekvenci f_s a frekvenci f_n nestabilního módu kmitání dán vzorcem $d = 1/\tan(\pi f_n/f_s)$. Filtr druhého řádu plní funkci posouvače fáze při nejmenším možném fázovém zpoždění.

V případě analogového korekčního filtru lze použít aktivní filtr s operačním zesilovačem se zapojením, které je v odborné literatuře známo a příklad zapojení je na obrázku 5.

Pro účely této přihlášky se rozumí akčním členem – lineární piezoaktuátor, plošný piezoaktuátor apod.

Přehled obrázků na výkresech

Vynález je blíže osvětlen pomocí obrazové dokumentace. Obrázek 1 obsahuje frekvenční přenos all-pass filtru druhého řádu. Graf je kreslen s rozbalenou fází, která propojuje obě větve fáze. Závislost zesílení filtru na frekvenci není znázorněna, protože je v celém frekvenčním rozsahu jednotkové. Obrázek 2 znázorňuje příkladné provedení (příklad 3) sériového umístění all-pass filtrů druhého řádu v regulačním obvodu aktivního tlumení vibrací. Obrázek 3 znázorňuje účinek aktivního řízení v praxi. Pro úplnost uvádíme na obrázku 4 blokové schéma číslicového all-pass filtru druhého řádu a na obrázku 5 schéma zapojení analogového all-pass filtru druhého řádu s operačním zesilovačem. Obrázky 4 a 5 zobrazují známá zapojení, která nejsou předmětem ochrany této přihlášky.

Příklady uskutečnění vynálezu

Příklad 1

Způsob aktivního tlumení vibrací vetknutého nosníku 1 pro umístění aktuátoru a snímače vibrací 3 v různých místech po délce nosníku 1 je prováděn tak, že do regulační smyčky je sériově zapojen takový počet korekčních filtrů, jaký odpovídá počtu módů kmitání s opačným znaménkem, v příslušném frekvenčním pásmu oproti ostatním módům. Korekční filtr je all-pass filtr 5 druhého řádu s frekvencí zlomu danou frekvencí nestabilního módu kmitání. Pro aktivní řízení kmitání je třeba měřit v tomto bodě vibrace buď snímačem výchylky, nebo snímačem rychlosti anebo akcelerometrem. Zapojení lineárního regulátoru 4 je takové, aby jeho výstup obsahoval složku proporcionálně závislou na okamžité rychlosti vibrací. V návaznosti na lineární regulátor 4 je all-pass filtr 5 druhého řádu buď číslicový podle obrázku 4, nebo analogový podle obrázku 5. Akčním členem 6 je v tomto případě lineární piezoaktuátor působící na nosník 1 ve stejném směru jako jsou měřeny vibrace.

Frekvence nestabilních módů kmitání je určena metodami experimentální modální analýzy. Tyto metody určují rezonanční frekvence poddajné soustavy a tvary kmitů, ze kterých jsou vypočtena rezidua. Záporná rezidua určují nestabilní módy kmitání, na jejichž frekvenci je naladěn all-pass filtr 5 druhého řádu tak, aby výstup tohoto filtru byl v protifázi vzhledem ke vstupnímu signálu.

Příklad 2

Příklad 2 se od příkladu jedna liší v tom, že akčním členem 6 je plošný piezoaktuátor, který je připevněn na plochu nosníku 1 a svým protahováním, resp. zkracováním způsobuje ohyb.

Příklad 3

Aktivní tlumení je použito pro nosník 1 délky 0,5 m a průřezu 40 x 5 mm, který je vetknutý do stěny 2. Tento nosník je tlumen silou ve vzdálenosti 50 mm od vetknutí ve směru kolmém na širší stranu průřezu. Kmitání volného konce nosníku 1 ve směru shodném se směrem tlumící síly je měřeno snímačem 3, jehož výstupní signál je přiveden do lineárního regulátoru 4. Výstup lineárního regulátoru 4 je veden do korekčních all-pass filtrů 5 druhého řádu, které jsou zapojeny sériově a jejichž počet a naladění odpovídá nestabilním módům kmitání



nosníku 1. Výstup z posledního korekčního all-pass filtru 5 druhého řádu je přiveden do akčního členu 6, který generuje sílu úměrnou velikosti akční veličiny.

Pro zvolené Rayleighovo tlumení je časová konstanta obálky dokmitání 4 sekundy. Aktivní tlumení vibrací seřizené podle stávajících známých metod zkrátí časovou konstantu doznívání přibližně osmkrát. Korekční all-pass filtr 5 druhého řádu ve výše uvedeném příkladu rozměrů nosníku zmenší časovou konstantu dokmitání až 40krát oproti stavu bez aktivního tlumení vibrací.

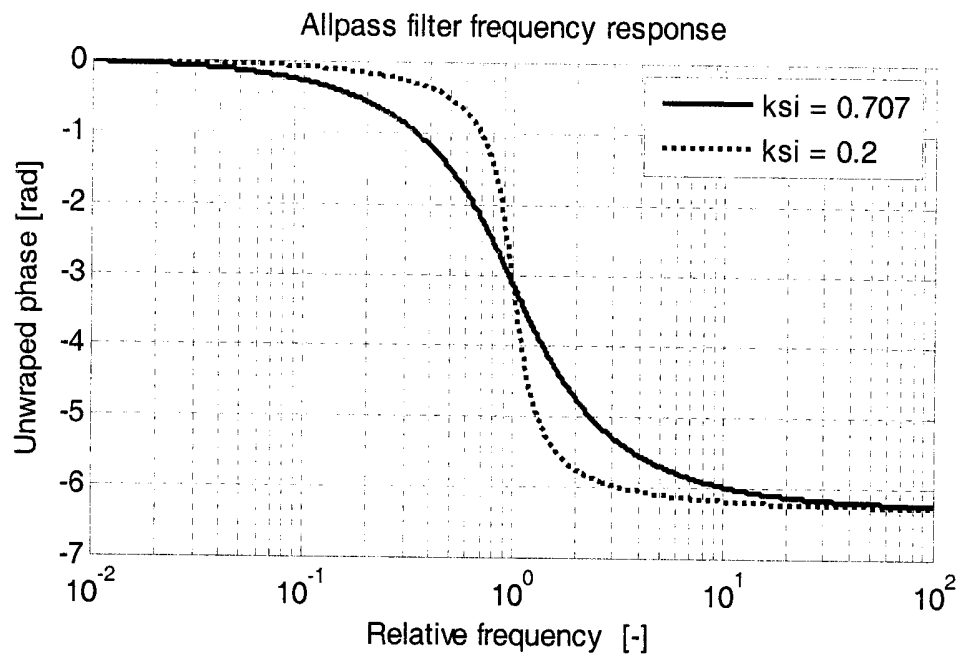
Průmyslová využitelnost

Způsob tlumení vibrací podle vynálezu je použitelný všude tam, kde je třeba vysoké účinnosti tlumení kmitání mechanického systému, například při aktivním tlumení kmitání soustružnického nože piezoaktuátorem, při konstrukci letadel (drak letadla, helikoptéry, křídla), konstrukce elektronických obvodů.

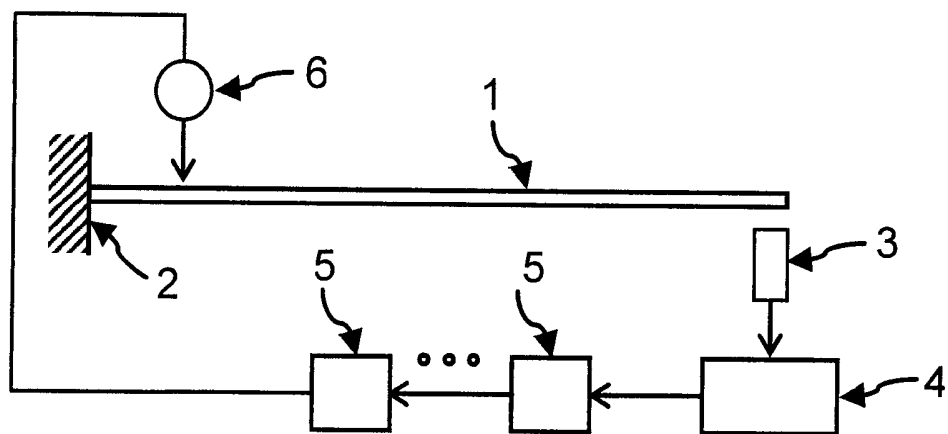
PATENTOVÉ NÁROKY

~~74 2013 687~~

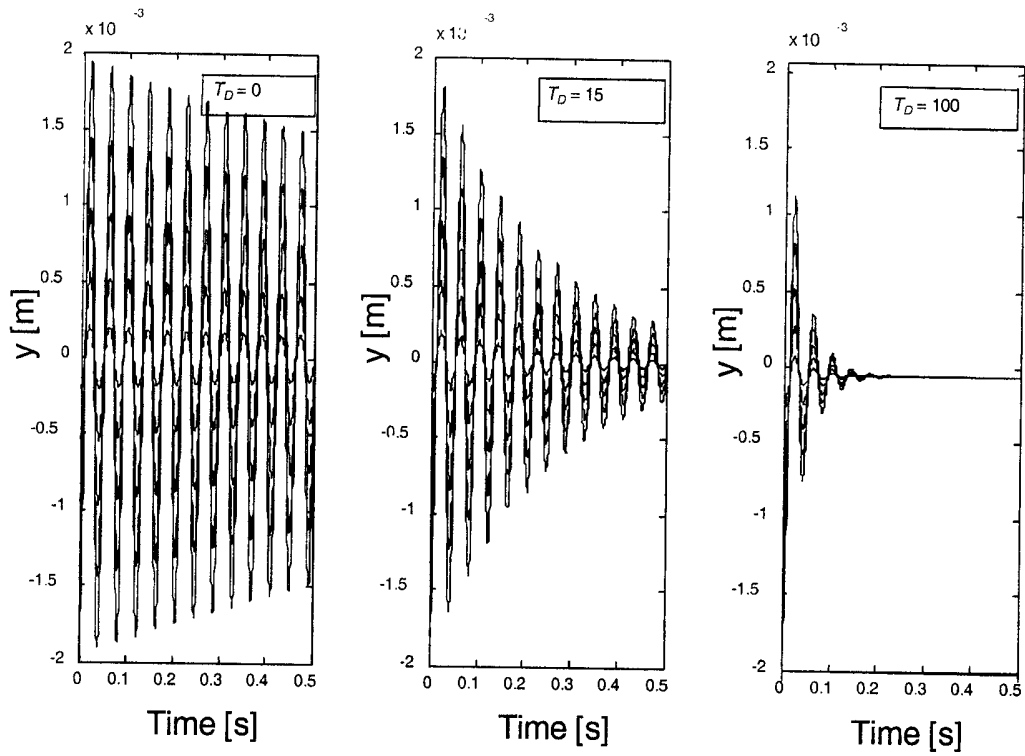
- K Způsob aktivního tlumení vibrací pružné mechanické struktury pro umístění akčního členu, all-pass filtru a snímače vibrací v různých místech této struktury **vyznačující se tím, že** akční veličina pro ovládání akčního členu (6) je jako signál korigována průchodem all-pass filtrem (5) druhého řádu, který je naladěn tak, že frekvence nestabilního módu kmitání je rovna frekvenci, při které je fázové zpoždění zmíněného filtru $-\pi$ radiánů, přičemž je v sérii použit takový počet all-pass filtrů (5) tohoto typu, který odpovídá počtu nestabilních módů kmitání v daném frekvenčním pásmu.



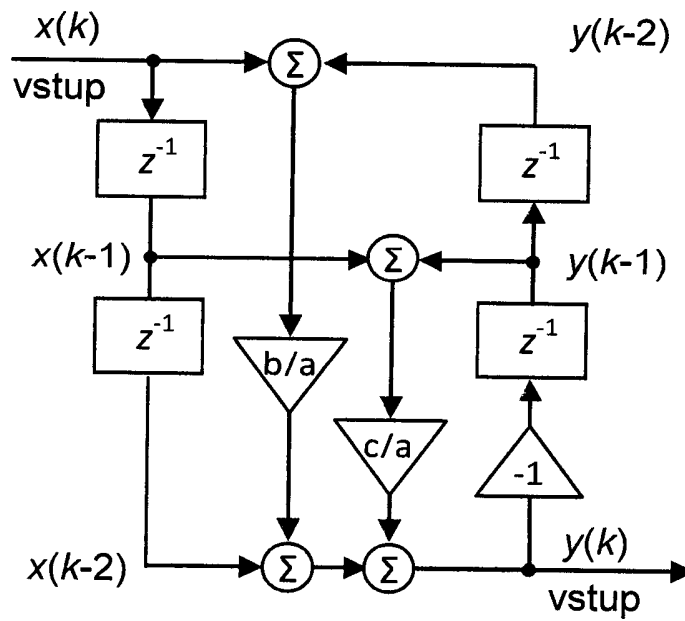
Obr. 1



Obr. 2



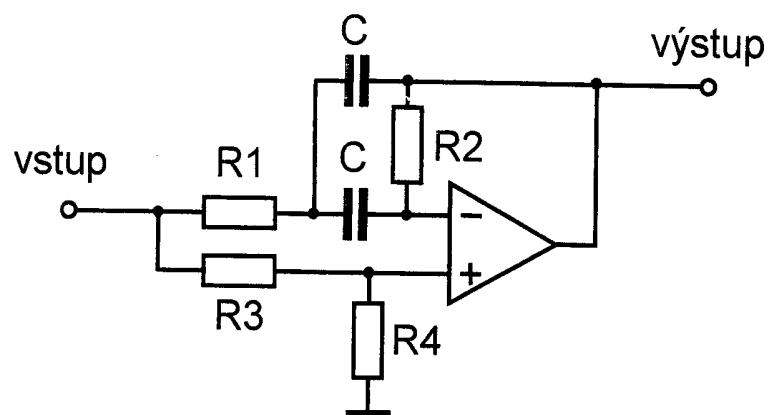
Obr. 3



Obr. 4

3/3

PV 2013-687



Obr. 5