

Seismografy a Seismické pozorovací sítě mají pro seismologii tak zásadní důležitost jakou mají teleskopy pro astronomii či urychlovače pro fyziku. Bez nich bychom věděli jen pramálo o tom, jak vypadá nitro naší Země a jaké procesy se v něm odehrávají.

Seismografy

Seismografy jsou přístroje, které zaznamenávají pohyby půdy neboli seismické signály vyvolané přirozenými a umělými seismickými zdroji jako tektonickými zemětřeseními, sopečnou činností, podzemními jadernými výbuchy, odstřely v kamenolomech apod. Vývojem seismografů a zdokonalením seismických měřicích metod se zabývá seismometrie. Moderní seismograf se skládá ze seismometru s příslušnými elektronickými obvody a z analogového nebo digitálního záznamového zařízení. Záznam seismografu se nazývá seismogram. Analogový seismogram je záznam v podobě souvislé stopy, např. na papírovém pásu, digitální seismogram jsou číselné hodnoty časových vzorků analogového signálu uložené na počítačově kompatibilním mediu, např. na magnetické pasce, pevném disku nebo CD. Podle kmítočtového pásma zachycených seismických signálů rozlišujeme čtyři základní třídy seismografů: krátkoperiodické (konvenční označení SP), širokopásmové (BB), dlouhoperiodické (LP) a velmi širokopásmové seismografy (VBB).

Seismické signály

Seismické signály patří k nejsložitějším třírozměrným signálům, se kterými se v přírodě setkáváme. Každý seismický rozruch vyzářený seismickým zdrojem je při svém šíření nesourodou vrstevnatou Zemí odrážen, lámán, ohýbán, tlumen a štěpen na různé seismické vlny šířící se různými rychlostmi. Na různých místech zemského povrchu tak vznikají velmi složité vlnové obrazy, jejichž dominantní frekvence se pohybují od stovek sekund (povrchové vlny silných světových zemětřesení) až po desítky Hertz (prostorové vlny lokálních mikrozemětřesení). Vlnové obrazy slabých seismických jevů jsou přitom s rostoucí vzdáleností od zdroje stále více překrývány všudypřítomným seismickým neklidem. Amplitudový rozsah seismických signálů, který musí moderní seismografy být schopny zachytit a zaznamenat, je obrovský: sahá od desítek nanometrů (setin vlnové délky světla) až pohodnoty blízké se zemskému zrychlení $g \sim 10 \text{ m/s}^2$, tj. liší se o více než jedna k miliardě. Seismické signály se monitorují pomocí globálních, regionálních a lokálních seismických pozorovacích sítí.

Seismické pozorovací sítě

Seismické signály jsou průběžně monitorovány tisíci seismických stanic rozmístěných na všech kontinentech světa včetně antarktidy, podmořskými stanicemi na dně oceánů, mnoha desítkami lokálních a regionálních seismických pozorovacích sítí a několika globálními sítěmi se stanicemi napojenými přes standardní komunikační prostředky či satelity na mezinárodní datová centra. Podle daného účelu (globální, regionální, lokální pozorování) jsou seismické stanice vybaveny nejrůznějšími typy seismografů, od krátkoperiodických až po ultradlouhoperiodické. Seismické pozorovací sítě mají pro seismologii tak zásadní důležitost jakou mají teleskopy pro astronomii či

urychlovače pro fyziku. Bez nich bychom věděli jen pramálo o tom, jak vypadá nitro naší Země a jaké procesy se v něm odehrávají.

Seismometry

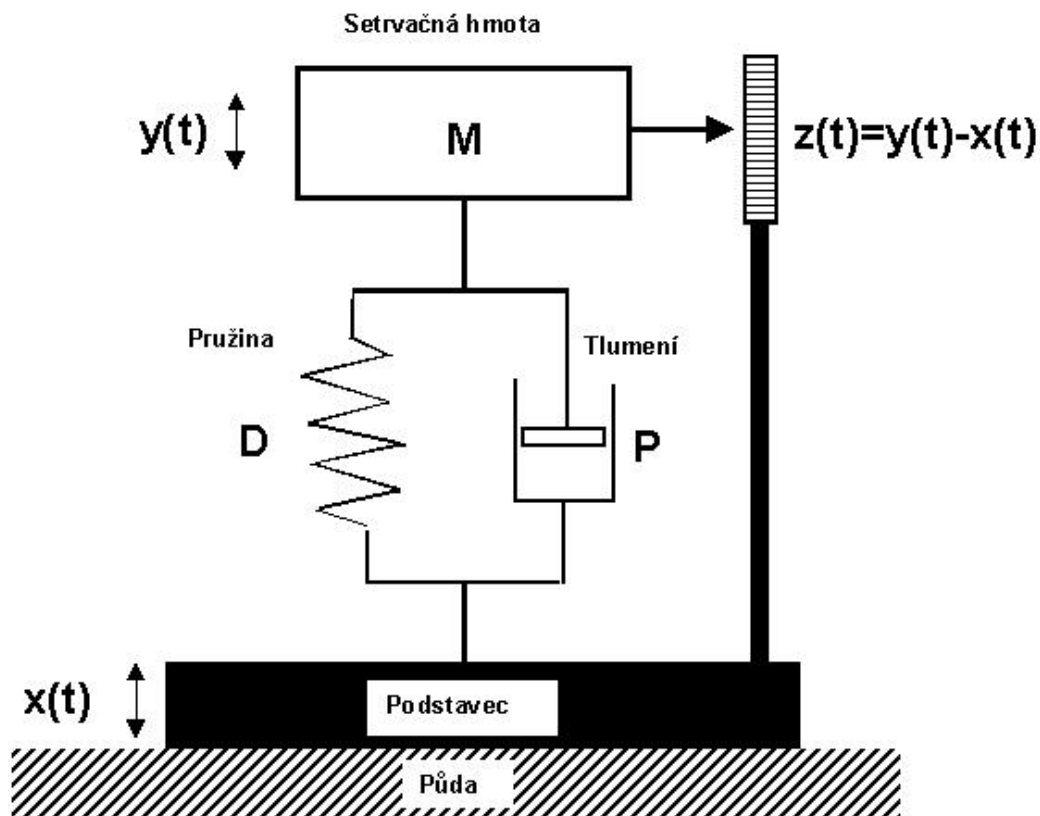
Seismometr (také seismický senzor, v seismickém průzkumu geofon) je elektromechanické zařízení, které exaktně definovaným způsobem přeměňuje pohyby půdy na elektrický signál.

Pohyby půdy lze v principu měřit dvěma způsoby: buď jako relativní posunutí mezi dvěma body, nebo v daném bodě jako relativní pohyb půdy vůči volně s ní spřažené setrvačné hmotě. Přístroje založené na prvním principu nazýváme strainmetry, v druhém případě mluvíme o setrvačných seismometrech. Protože relativní pohyb půdy vůči setrvačné referenci je ve většině případů mnohem větší než vzájemný pohyb dvou bodů v měřicích prostorách (seismických sklepích, podzemních štolách) rozumných rozměrů, jsou setrvačné seismometry zpravidla mnohem citlivější než strainmetry. Na velmi nízkých frekvencích se však udržování stabilní setrvačné reference stává velmi obtížným, takže pro pozorování velmi dlouhoperiodických signálů (např. nižších módů vlastních kmitů zemského tělesa nebo slapových pohybů) lze strainmetrem někdy získat kvalitnější záznamy než velmi širokopásmovým či ultradlouhoperiodickým setrvačným seismometrem. Co do principu jsou strainmetry jednodušší než setrvačné seismometry, jejich technická realizace je však mnohem obtížnější a nákladnější.

Vztah mezi výstupním signálem seismometru a pohyby půdy libovolného typu popisuje matematicky exaktně jeho diferenciální pohybová rovnice nebo Laplacovská přenosová funkce. Jak seismometr reaguje na harmonické (sinusové) pohyby půdy, popisují jeho amplitudová frekvenční charakteristika a fázová frekvenční charakteristika. Amplitudové frekvenční charakteristice standardních seismografů s analogovým záznamem se také říká křivka zvětšení. Reakci seismometru na teoretický jehlový (nekonečně širokopásmový) impuls popisuje jeho impulzní odezva.

Setrvačný seismometr

Nejjednodušším fyzikálním modelem setrvačného seismometru je tlumený mechanický kmitavý systém (obr.1), jehož setrvačná hmota může kmitat jen v jediném směru.



Obr. 1. Tlumený mechanický oscilátor: princip setrvačného seismometru.

Při pohybu půdy $x(t)$ se setrvačná hmota M (fyzikální rozměr kilogramy) snaží zachovat svou klidovou polohu. Tak vznikne relativní pohyb půdy vůči setrvačné hmotě, $z(t) = y(t) - x(t)$. Pružina vyvine protisílu úměrnou $z(t)$, a tlumící zařízení vyvine protisílu úměrnou rychlosti neboli první derivaci tohoto pohybu, tj. sílu úměrnou $-\dot{z}(t)$. Označme příslušné konstanty úměrnosti písmeny D (tuhost, fyzikální rozměr Newton na metr) a P (viskozní tření, fyzikální rozměr Newton na metr za sekundu). Setrvačná síla tuhého tělesa je dána součinem jeho hmoty a zrychlení, a podle věty o pohybu tuhého tělesa podél pevné osy musí být tato síla rovna součtu všech působících sil. Ekvivalentem účinku pohybu půdy $x(t)$ na setrvačnou hmotu je vnější síla $-M\ddot{x}(t)$ působící na setrvačnou hmotu, takže musí platit

$$M\ddot{z}(t) = -Dz(t) - P\dot{z}(t) - M\ddot{x}(t) \quad (1)$$

Pro přeměnu pohybu $z(t)$ na elektrický signál se v nejjednodušším případě používá elektrodynamický měnič v podobě cívky pohybující se mezi póly permanentního magnetu. Výstupní napětí (fyzikální rozměr volty) elektrodynamického měniče je úměrné rychlosti relativních pohybů s opačným znaménkem, tj.

$$e(t) = -G\dot{z}(t) \quad (2)$$

Konstanta úměrnosti G (fyzikální rozměr volt na metr za sekundu) se nazývá elektrodynamická nebo též generátorová konstanta. Dosazením (2) do (1) obdržíme po

jednoduchých úpravách diferenciální rovnici elektrodynamického setrvačného seismometru ve tvaru

$$\ddot{e}(t) + 2h\omega_0 \dot{e}(t) + \omega_0^2 e(t) = G\ddot{x}(t), \quad (3)$$

ve kterém $\omega_0 = \sqrt{D/M}$ je vlastní frekvence seismometru (je to kmitočet, na kterém by setrvačná hmota kmitala, kdyby její pohyb nebyl tlumen) a $h = P/2\sqrt{MD}$ je bezrozměrná konstanta tlumení (hodnota $h = 1$ odpovídá "kritickému" tlumení; je to tlumení, při kterém se setrvačná hmota po vychýlení vrátí do své klidové polohy bez překmitu na opačnou stranu).

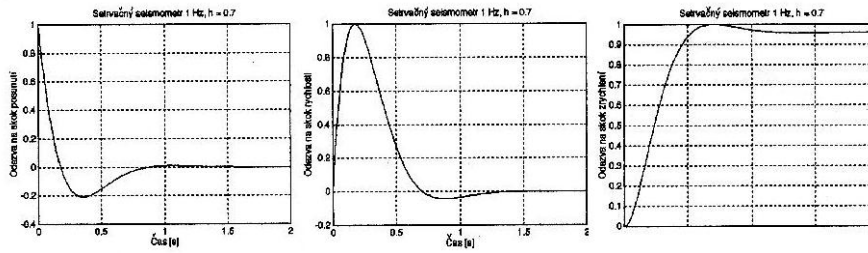
Použitím pravidel operátorového počtu lze diferenciální rovnici (3) přímo přepsat do operátorového tvaru $E(s)s^2 + 2h\omega_0 E(s)s + \omega_0^2 E(s) = G X(s)s^3$ (n -té derivaci signálů $e(t)$ a $x(t)$ odpovídá vynásobení jejich operátorových obrazů $E(s)$ a $X(s)$ n -tou mocninou komplexního, tak zvaného Laplaceovského operátoru s) neboli

$$\frac{E(s)}{X(s)} = H(s) = G \frac{s^3}{s^2 + 2h\omega_0 s + \omega_0^2}. \quad (4)$$

Funkce $H(s)$ vyjadřuje vztah mezi Laplaceovskými obrazy výstupního a vstupního signálu daného systému a říká se jí proto Laplaceovská přenosová funkce systému.

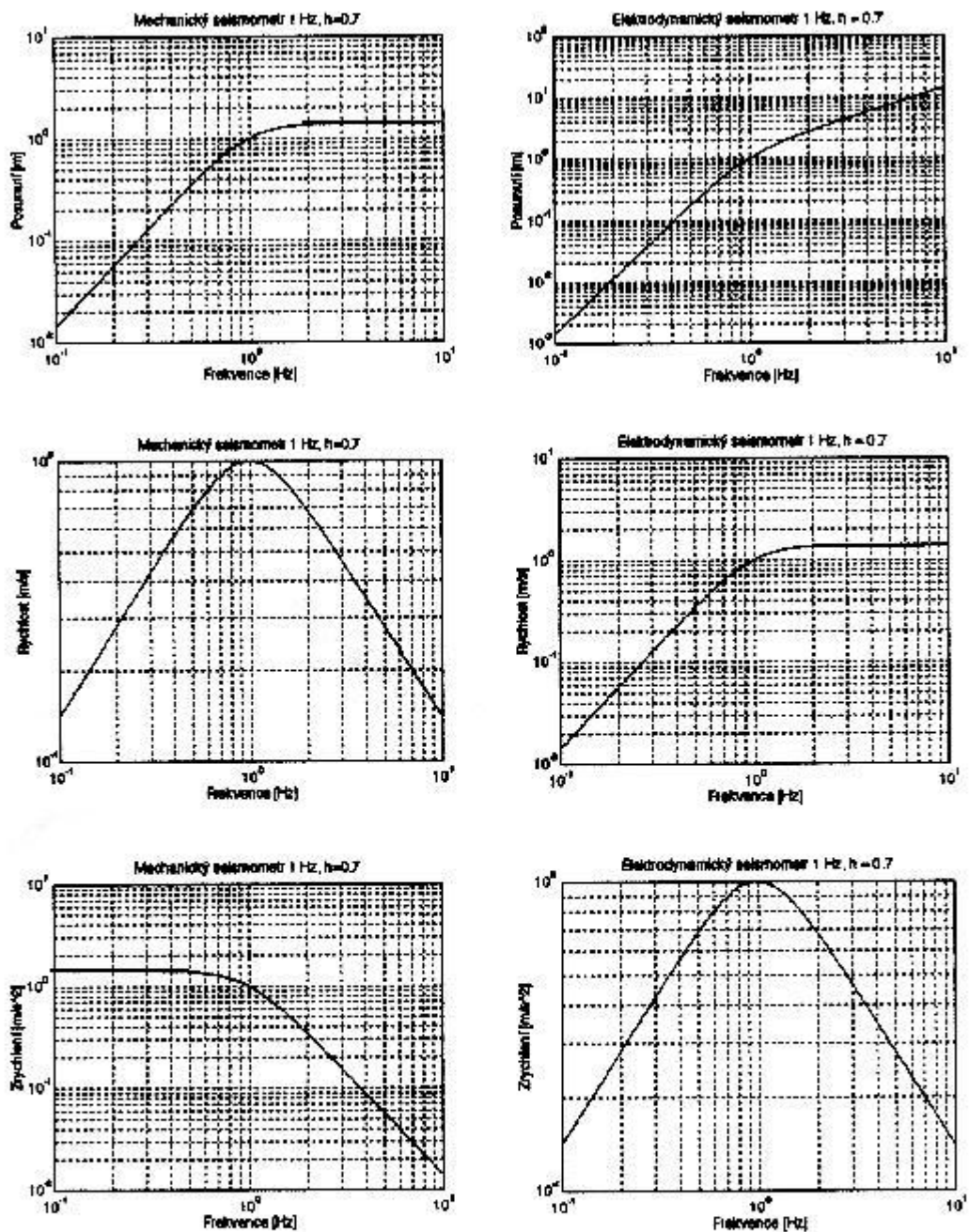
V případě setrvačného seismometru s měničem posunutí (v moderní seismometrii se pro tento účel používají vysoce citlivé kapacitní nebo induktivní měniče posunutí) bude v přenosové funkci (4) na místě generátorové konstanty G stát konstanta definující citlivost měniče posunutí (fyzikální rozměr volt na metr) a v čitateli bude s^2 místo s^3 (odpadá jedna derivace, čili mocnitel operátoru s se sníží o jedničku).

Impulsní odezva systému, tj. jeho reakce $e(t) = h(t)$ na jehlový impuls $x(t) = \delta(t)$ (jehlový impuls je signál, který je všude nulový kromě v čase $t = 0$; jeho operátorovým obrazem je jednička), je dána zpětnou Laplaceovou transformací přenosové funkce $H(s)$, a odezva $e(t)$ systému na libovolný vstupní signál $x(t)$ je dána konvolucí tohoto signálu s impulsní odezvou, tj. $e(t) = x(t) * h(t)$. Obr. 2 ukazuje pro ilustraci odezvy setrvačného seismometru se snímačem posunutí na tři případy pohybu půdy impulsního charakteru: skok posunutí, skok rychlosti (lineárně narůstající posunutí) a skok zrychlení půdy (kvadraticky narůstající posunutí).



Obr. 2. Odezvy mechanického kmitavého systému s vlastní periodou 1 sekunda a s tlumením $h = 0,7$ na skok posunutí, skok rychlosti a skok zrychlení půdy.

Mnoho seismických signálů má kvaziharmonický charakter (blíží se svým průběhem sinusovým kmitům). Seismologa proto především zajímá, o kolik seismometr, jehož záznam má interpretovat, zesílil a fázově posunul harmonické signály různých frekvencí, tj. jakou měl amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku. Obě tyto charakteristiky lze získat přímo z přenosové funkce: amplitudová frekvenční charakteristika je absolutní hodnota přenosové funkce pro $s = j\omega$ (j = imaginární jednotka, $j\omega$ = kruhová frekvence), tj. $A(\omega) = |H(j\omega)|$ (absolutní hodnota funkce $H(j\omega)$ je odmocnina ze součtu čtverců její reálné a imaginární části) a fázová frekvenční charakteristika je dána argumentem přenosové funkce pro $s = j\omega$, tj. $\Phi(\omega) = \arg H(j\omega)$ (argument funkce $H(j\omega)$ je arkustangens podílu její imaginární a reálné části). V klasické analogové seismometrii se amplitudové frekvenční charakteristice konvenčně říká křivka zvětšení (anglicky *magnification curve*). Křivky zvětšení setrvačného seismometru s měničem posunutí a s rychlostním měničem pro ustálené harmonické posunutí, rychlost a zrychlení půdy ukazuje obr. 3.



Obr. 3. Normalizované křivky zvětšení setrvačného seismometru s vlastní frekvencí 1 Hz a s tlumením 0,7 pro ustálené harmonické posunutí půdy (nahore), rychlost půdy (uprostřed) a zrychlení půdy (dole); levá trojice: setrvačný seismometr s měničem posunutí, pravá trojice: setrvačný seismometr s rychlostním měničem (elektrodynamický seismometr).

Samotný setrvačný systém či seismometr se snímačem posunutí reaguje na harmonické posunutí půdy jako hornofrekvenční propust (přenáší rovnoměrně

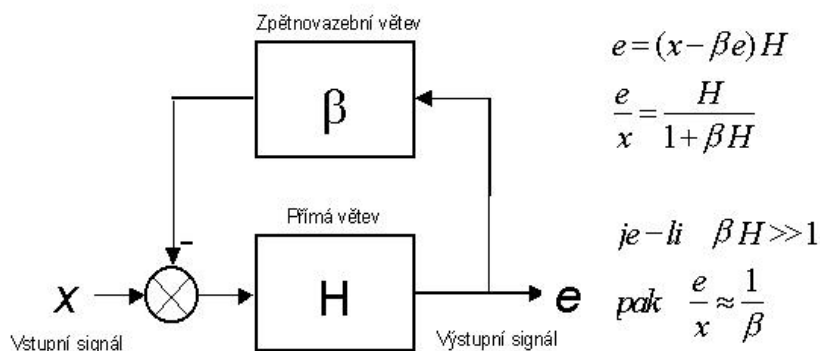
všechny signály s frekvencí vyšší než vlastní frekvencí f_0), na rychlost jako pásmová propust (přenáší selektivně signály s frekvencemi okolo f_0) a na zrychlení jako dolnofrekvenční propust (přenáší rovnoměrně všechny signály s frekvencí nižší než f_0). Výstupní signál elektrodynamického seismometru je první derivací relativních pohybů půdy vůči setrvačné hmotě, takže jeho křivka zvětšení pro rychlost půdy je totožná s křivkou zvětšení samotného setrvačného systému pro posunutí (horní propust) a jeho křivka zvětšení pro zrychlení je totožná s křivkou zvětšení samotného setrvačného systému pro rychlost (pásmová propust).

Z obr. 2 a 3 je zřejmé, že setrvačný seismograf zdaleka nezaznamenává skutečné pohyby půdy, nýbrž jeho záznam reprezentuje skutečná posunutí, rychlosti nebo zrychlení půdy vždy jen v určitém frekvenčním pásmu závislém na vlastní frekvenci a tlumení seismometru a na typu měniče. Vzhledem k velké rozmanitosti [seismických signálů](#) se proto používají desítky nejrůznějších modifikací setrvačných seismometrů, od elektrodynamických [geofonů](#) se setrvačnými hmotami řádu desítek gramů a vlastními frekvencemi řádu desetin sekundy pro záznam vysokofrekvenčních signálů v seismickém průzkumu až po silně přetlumené dlouhoperiodické seismografy se setrvačnými hmotami až několik kilogramů a měniči posunutí pro záznam povrchových vln silných zemětřesení a vyšších módů vlastních kmitů Země.

V posledních dvaceti letech směřuje vývoj instrumentální seismologie k širokopásmové seismometrii, tj. k [širokopásmovým zpětnovazebním seismometrům](#) (kompaktním setrvačným seismometrickým servosystémům) schopným zachytit všechny [seismické signály](#) nad úrovní globálního seismického neklidu v celé jejich amplitudové a frekvenční šíři - od krátkoperiodických signálů slabých blízkých otřesů až po vlastní kmity Země vyvolané nejsilnějšími světovými zemětřeseními.

Širokopásmový zpětnovazební seismometr

Mechanickým způsobem lze zlepšit přenosové vlastnosti (zmenšit nelinearity, zvýšit lineární dynamický rozsah, rozšířit [pracovní frekvenční pásmo](#), zvýšit stabilitu) seismometrů jen s velkými obtížemi a do určité hranice. S rozvojem polovodičové elektroniky, zejména nízkošumových operačních zesilovačů a vysoce citlivých snímačů posunutí, vznikla proto snaha použít v seismometrii stejnou techniku jako v servosystémech, tj. zlepšit dynamické chování daného elektromechanického systému pomocí elektronické záporné zpětné vazby. Princip systému se zápornou zpětnou vazbou znázorňuje obr. 4.



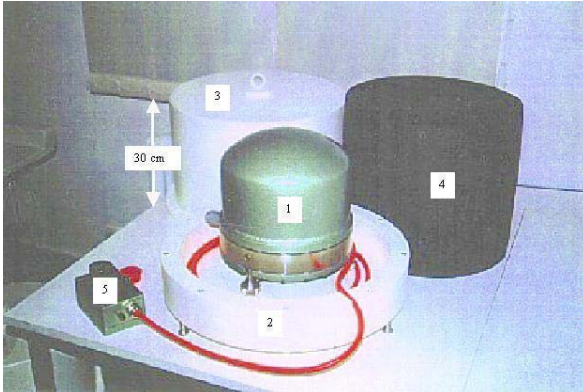
Obr. 4. Systém se zápornou zpětnou vazbou: princip zpětnovazebního seismometru.

V případě seismometrického servosystému (anglicky "force-balance seismometer") sestává přímá větev z [mechanického kmitavého systému](#) s měničem posunutí; část výstupního signálu se přes elektronickou zpětnovazební větev přivádí zpět na vstup tak, že na setrvačnou hmotu působí opačně než pohyb půdy. Ve frekvenčním pásmu, ve kterém je součin přenosů zpětnovazební a přímé větve $\beta H \gg 1$, jsou pak přenosové vlastnosti systému prakticky určeny jen zpětnou vazbou. Tím jsou problémy linearity, stability, dynamického rozsahu a [frekvenční charakteristiky](#) systému přeneseny do elektronické zpětnovazební větve, kde je lze zvládnout nepoměrně snadněji než mechanicky. Obdobně jako v servosystémech se pro to používá zpětná vazba typu PID (proporcionálně-integrálně-derivační). Proporcionální složka působí jako přídavná direktivní síla zvyšující linearitu, stabilitu a vlastní frekvenci mechanického kmitavého systému, integrální složka udržuje setrvačnou hmotu pro velmi dlouhoperiodické signály v nulové (klidové) poloze a derivační složkou lze kmitavý systém libovolně tlumit, např. silně přetlumit. Nastavením intenzity jednotlivých zpětnovazebních složek lze modifikovat citlivost a frekvenční charakteristiku systému v širokých mezích. Typickým představitelem velmi širokopásmového (VBB) seismometru tohoto typu je přístroj Wielandt/STS-1 švýcarské firmy Streckeisen, kterým lze nezkresleně zachytit všechny seismické signály nad úroveň globálního [seismického neklidu](#) v pásmu period od 0,03 do 300 sekund. Proti stavu seismometrie před necelým stoletím představují moderní force-balance seismometry obrovský kvalitativní skok.

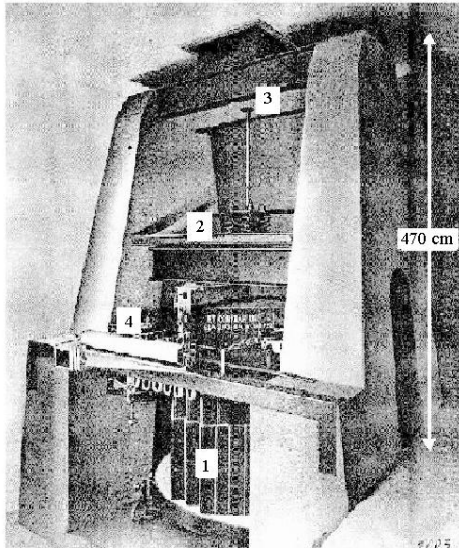
Seismometrie

Seismometrie je odvětví seismologie zabývající se vývojem [seismografů](#) a zdokonalením seismických měřících metod. V průběhu posledního století bylo americkými, japonskými, německými, italskými, ruskými, francouzskými, švýcarskými i českými a dalšími instrumentálními seismology vyvinuto mnoho desítek různých typů vertikálních a horizontálních setrvačných seismografů s mechanickou, optickou nebo galvanometrickou registrací, se setrvačnými hmotami řádu desetin kilogramu až 21 tun, s vlastními periodami 0,5 až 37 sekund a se zvětšeními 5 až více než 100000. Pro demonstraci, jakým obrovským vývojem prošla seismometrie od konce první světové války do dneška, porovnejme parametry třísložkového [velmi širokopásmového force-balance seismometru](#) STS-2 vyvinutého švýcarskou firmou Streckeisen v devadesátých letech dvacátého století (obr. 5) s parametry Quervain-Piccardova univerzálního seismografu konstruovaného v roce 1924 v Curychu (obr. 6):

- maximální rozměry 30/470 cm, tj. objemově 4000-krát menší;
- setrvačná hmota 0,5/21000 kg, tj. 40000-krát menší;
- efektivní vlastní perioda 120/3, tj. 40-krát širší propustné pásmo směrem k dlouhým periodám;
- rozlišovací schopnost 1,6/30000 nanometrů za sekundu, tj. 18000-krát větší citlivost;
- lineární dynamický rozsah záznamu 140/40 decibelů, tj. 100000-krát větší.



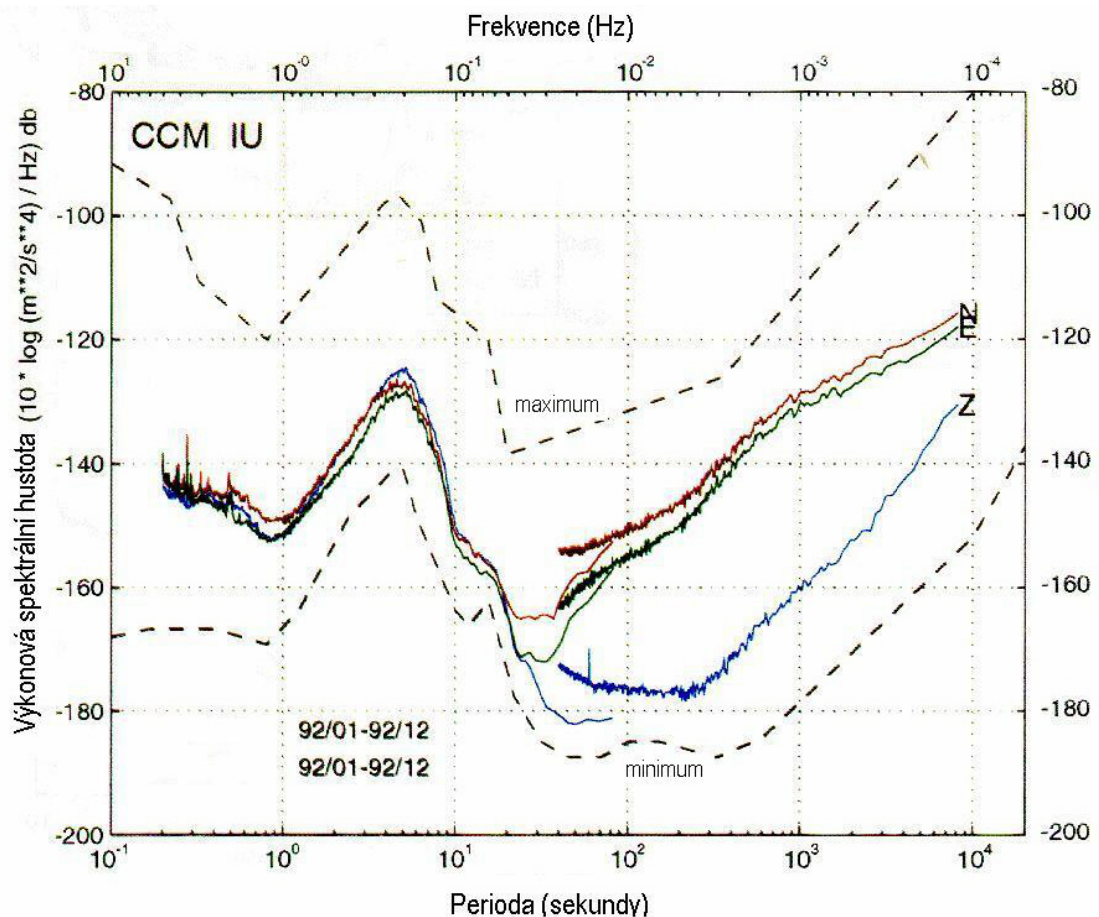
Obr. 5. Třísloužkový širokopásmový zpětnovazební seismometr Streckeisen STS-2, 1992.
 1 - vnitřní kryt z feromagnetického materiálu, pod nímž jsou v evakuovaném prostoru umístěny tři setrvačné systémy s příslušnou elektronikou, 2 a 3 - podstavec a vnější hermetický kryt s vnitřní tepelnou izolací; 4 - vnější tepelná izolace; 5 - řídicí box se vstupními a výstupními konektory. Evakuaci vzduchu, magnetickým odstíněním, dvojitou tepelnou izolací jsou setrvačné systémy tak dokonale chráněny od vnějších rušivých vlivů (fluktuací molekul vzduchu, změn magnetického pole, teplotních změn) a jsou použity tak citlivě měnitelé posunutí, že ve frekvenčním pásmu 0,008 - 30 Hz (0,03 - 120 sekund) dokáže tento seismometr ještě spolehlivě rozpoznat i signály pod úrovní zemského "šumu" na seismicky neklidnějších místech naší planety.



Obr. 6. Dvacetiletinový univerzální seismograf profesorů A. de Quervaina a A. Piccarda, 1924.
 1 - setrvačná hmota, 2 - pružiny, 3 - závěs, 4 - pákové mechanismy zapisovacího systému se záznamovým válcem. I. stroj měl typické zvětšení 1600 ve frekvenčním pásmu 0,3 až přibližně 10 Hz (dolní mez byla dána vlastní periodou setrvačného systému, horní tloušťkou záznamové stopy). Pro porovnání parametrů tohoto ve své době špičkového třísloužkového seismografu s parametry soudobého špičkového systému STS-2 viz text.

Globální seismický neklid
 Kromě [seismických jevů](#) jako zemětřesení, důlních otřesů a pod. zaznamenávají citlivé [seismografy](#) i neustálé slabé pohyby zemského povrchu - tzv. seismický neklid. V pásmu period 0,1 až 10000 sekund (frekvence 0,0001 až 10 Hz) má frekvenční

spektrum seismického neklidu na celém světě podobný charakter, silně se neklid ale liší od místa k místu a v závislosti na roční době v amplitudě (úrovni). Průběh jeho výkonové spektrální hustoty v uvedeném frekvenčním pásmu v jednotkách zrychlení $[(m/s^2)^2]$ ukazuje obr. 7. Zdrojem krátkoperiodických složek s frekvencemi vyššími než 1 Hz je především lidská činnost (průmysl, doprava, energetika apod.), proto se mu také někdy říká průmyslový, antropogenní, technogenní nebo civilizační neklid. Ve středněperiodické oblasti, zejména v oblasti period 3 až 9 sekund, převládají tzv. oceánické mikroseismy, způsobené silnými meteorologickými poruchami nad oceány, především v zimních měsících. Minimum má globální seismický neklid v oblasti period kolem 30 sekund, směrem k dlouhým periodám pak jeho úroveň (výkonová spektrální hustota v jednotkách zrychlení) roste se strmostí o něco větší než asi 20 decibelů na dekádu (20 db/dekádu znamená nárůst na desetinásobek při desetkrát větší periodě). Hlavní příčinou dlouhoperiodického neklidu jsou účinky meteorologických jevů, zejména vzdušných proudů. Ty působí na zemský povrch nejsilněji v horizontálním směru; proto bývá dlouhoperiodický neklid na seismogramech horizontálních složek (N, E) podstatně větší než na složce vertikální (Z).



Obr. 7. Výkonová spektrální hustota globálního seismického neklidu v jednotkách zrychlení půdy. Minimum resp. maximum: generalizované průběhy pro seismicky nejklidnější resp. nejrušenější místa na naší planetě; N,E,Z - průběhy pro typickou kontinentální seismickou stanicí (N,E - horizontální složky, Z - vertikální složka). Průběhy mají vesměs podobný charakter, v úrovni se však liší o více než 60 decibelů, tj. více než tisíc k jedné.