

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Měření frekvence a fázového posuvu

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

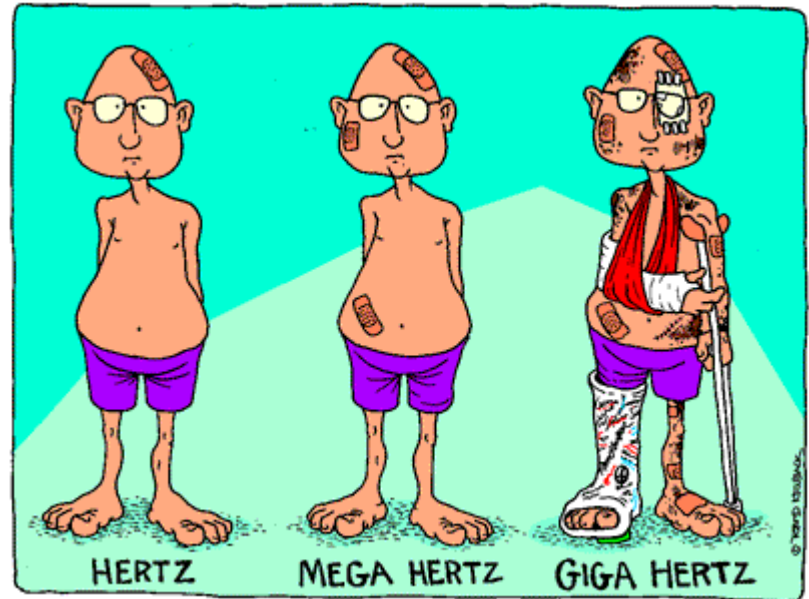


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Měření frekvence a fázového posuvu

Obsah

- Etalony frekvence
- Čítač frekvence
- Analogové měřiče frekvence
- Měření frekvence osciloskopem
- Fázový posuvu – základní vztahy
- Elektronické fázoměry
- Měření fázového posuvu osciloskopem
- Měření fázového posuvu čítačem
- Měření fázového posuvu v silovém obvodu
- Literatura



(http://www.educatorscorner.com/images/cartoon_hertzlg.gif
HP Electronic Cartoons by Rand Kruback)

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

Termostatované krystalové oscilátory

Dosažitelná stabilita:

10^{-6} /rok až 10^{-9} /rok

Příklad: FTS1130-10,
Frequency and Time
Systems Inc. (USA)

- Výstupy: 5 MHz, 10 MHz
(sinus)
- Úroveň výstupů: 1 V_{RMS}
- Stabilita: $<10^{-10}$ /den



*FTS1130-10, Frequency and Time
systems Inc.*

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

Cesiový etalon frekvence (atomové hodiny)

Dosažitelná stabilita:
 10^{-14} /rok

$$E_2 - E_1 = hf$$

(Bohrova rovnice)

E_1 ...energie atomu
v počátečním stavu

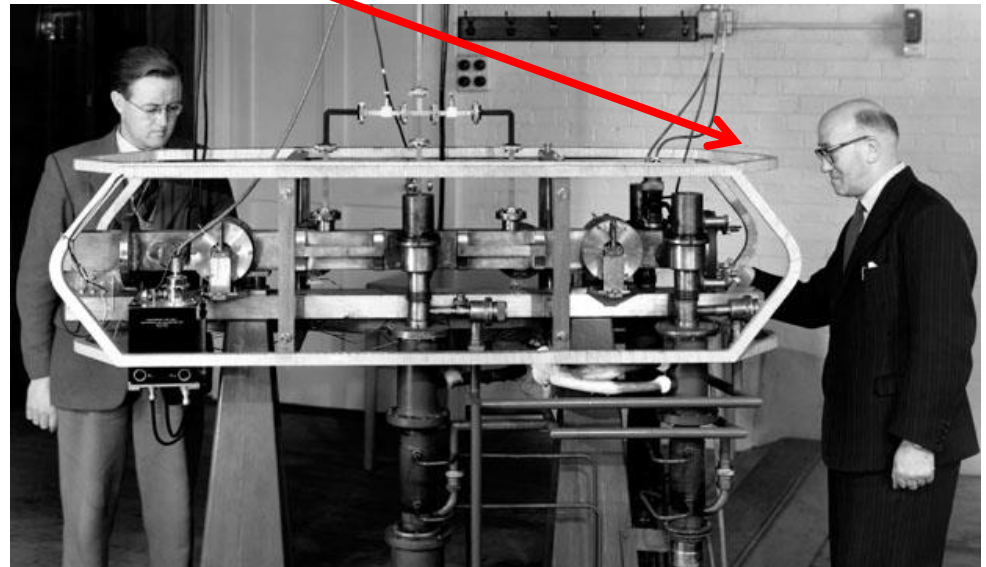
E_2 ...energie atomu
v excitovaném stavu

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
(Planckova konstanta)

f ...frekvence

V případě izotopu ^{133}Cs je pro
přechod na vyšší energetickou
hladinu potřeba dodat frekvenci
9,192631770 GHz.

Louis Essen - 1955



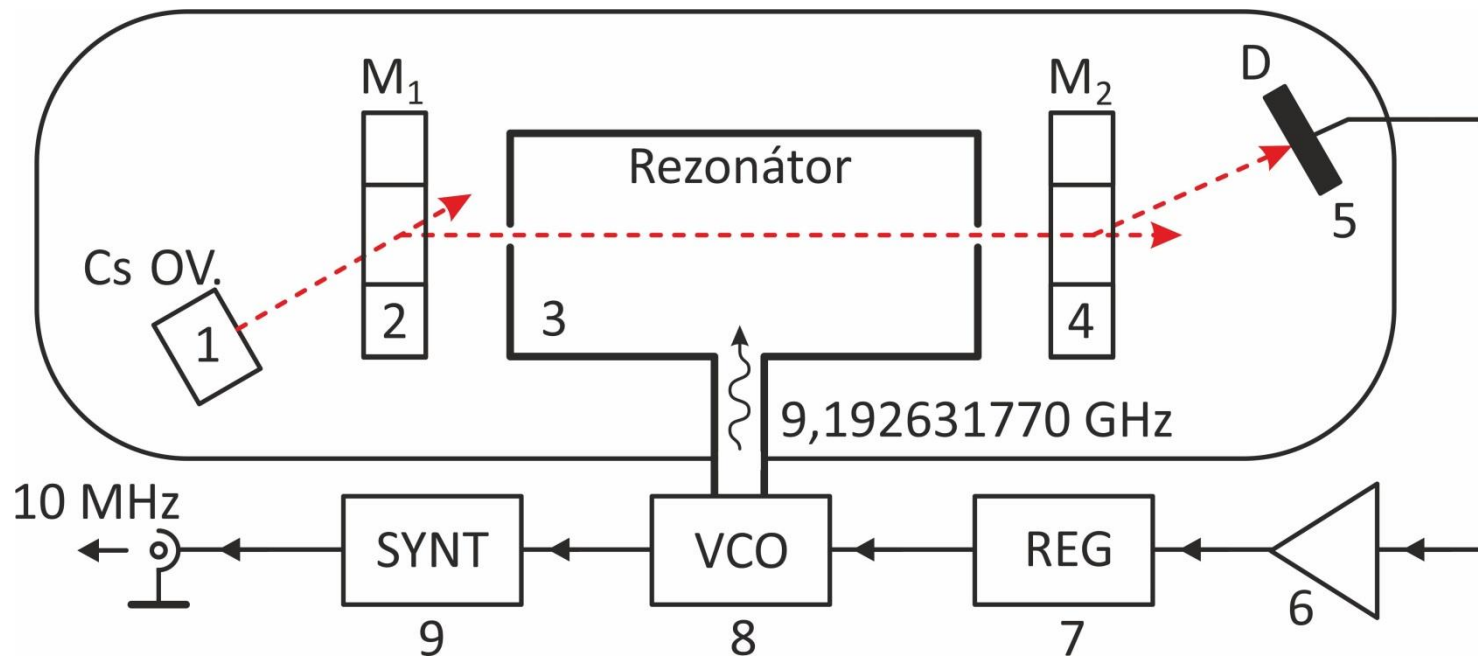
*První cesiové atomové hodiny (National
Physical Laboratory UK, 1955)
(https://en.wikipedia.org/wiki/Louis_Essen)*

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

Cesiový etalon frekvence (atomové hodiny)

Princip: Do dutiny rezonátoru je přiváděn vf signál cca 9,192631770 GHz. Frekvence je doladována zpětnou vazbou tak, aby na detektor dopadalo co nevíce excitovaných atomů cesia.



1-zdroj cesiových par, 2-třídící magnet M1, 3-rezonátor, 4-třídící magnet M2, 5-detektor, 6-zesilovač, 7-regulátor, 8-oscilátor, 9-syntezátor kmitočtu

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

Cesiový etalon frekvence (atomové hodiny)



*Cs Beam Tube, Microsemi
(www.microsemi.com)*

Příklad: HP5071A, HP, [2]

- Výstupy: 10 MHz, 5 MHz, 1 MHz, 100 kHz
- Úroveň výstupů: 1 V_{RMS}
- Stabilita: $< 10^{-14}$ /měsíc
- Životnost Cs trubice: 5-10 let



*Cesiový etalon frekvence HP5071A,
Hewlett-Packard*

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

Rubidiový etalon frekvence (atomové hodiny)

Dosažitelná stabilita:
 10^{-10} /rok

$$E_2 - E_1 = hf$$

(Bohrova rovnice)

E_1 ...energie atomu
v počátečním stavu

E_2 ...energie atomu
v excitovaném stavu

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
(Planckova konstanta)

f ...frekvence

- V případě izotopu ^{87}Rb je pro přechod na vyšší energetickou hladinu potřeba dodat frekvenci 6,8346826128 GHz.
- Základem etalonu je rezonanční komora naplněná parami ^{87}Rb .
- Páry jsou prosvěcovány rubidiovou výbojkou. Světlo prochází nejprve filtrem tvořeným parami ^{85}Rb .
- Pokud jsou páry ^{87}Rb excitovány na vyšší energetickou hladinu, dochází k poklesu intenzity procházejícího záření (rezonanční stav).

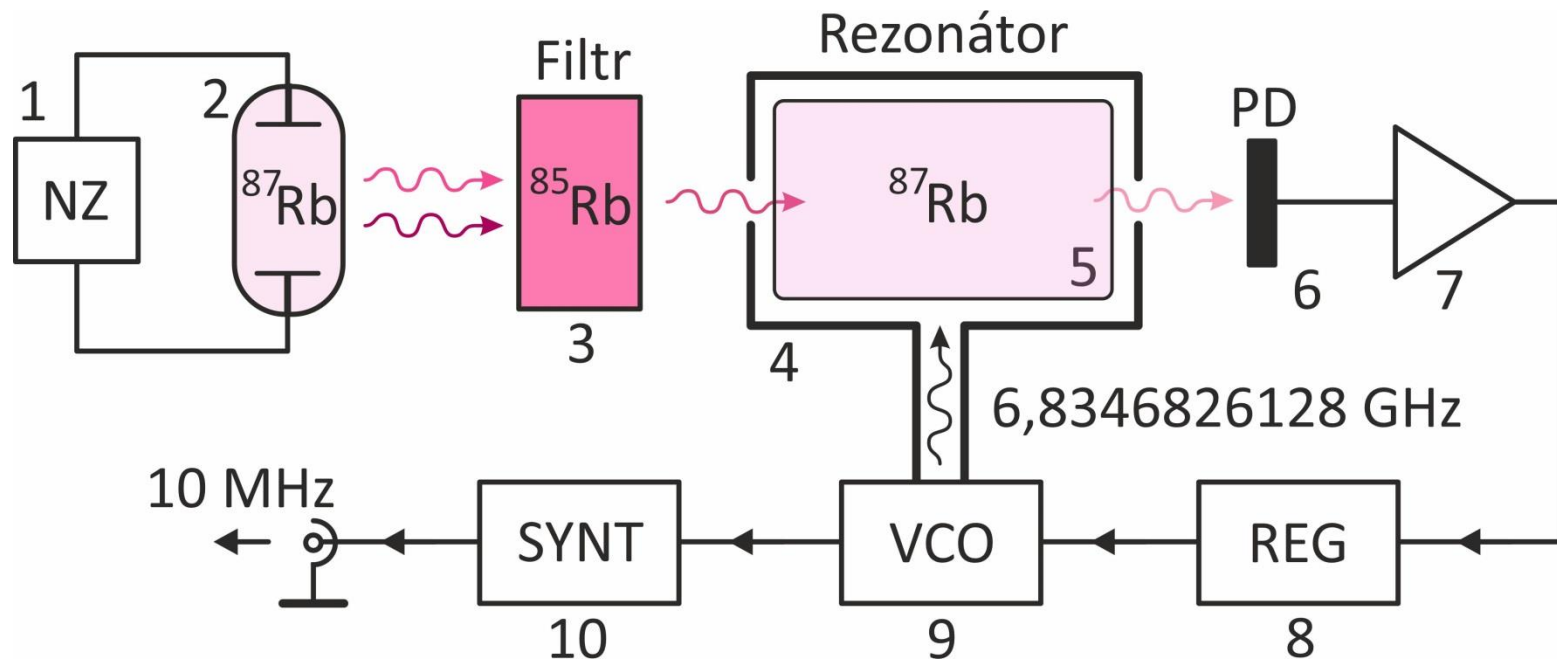
Použití: Lab. reference, telekom. systémy, družicová navigace (GPS...)

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

Rubidiový etalon frekvence (atomové hodiny)

Princip: Pokud jsou páry ^{87}Rb v rezonanční komoře vystaveny záření o frekvenci 6,8346826128 GHz, dochází k zeslabení intenzity světla dopadajícího na fotodetektor. Signálem z detektoru je řízeno doladování oscilátoru (min. na detektoru).



1-napájecí zdroj, 2-rubidiová lampa, 3-filtr, 4-rezonátor, 5-páry rubidia ^{87}Rb , 6-detektor, 7-zesilovač, 8-regulátor, 9-oscilátor, 10-syntežátor kmitočtu

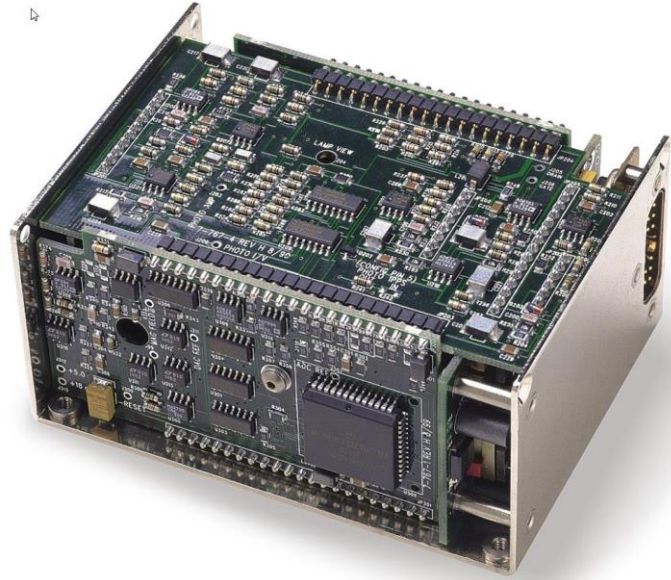
Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence

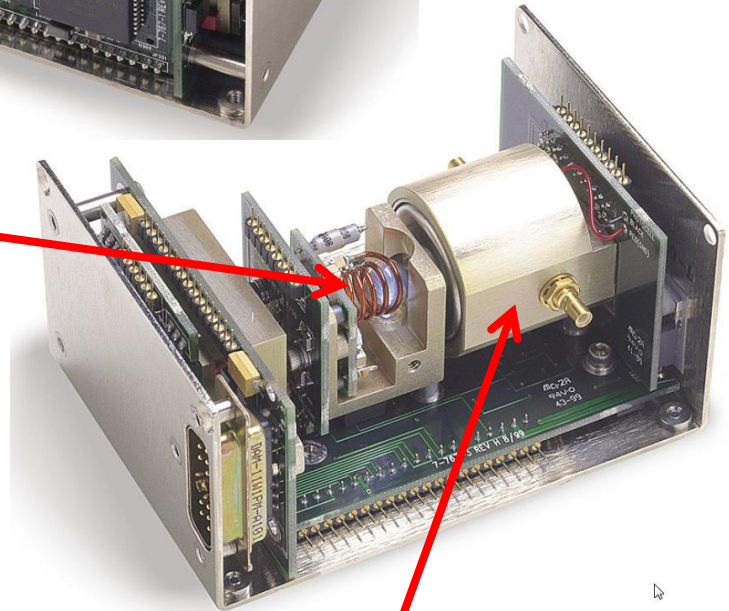
Rubidiový etalon frekvence

Příklad: PRS10, SRS, [3]

- Výstup: 10 MHz (sinus)
- Výstupní úroveň: 0,5 V_{RMS}
- Stabilita: $< 5 \cdot 10^{-10}$ /rok
- Životnost Rb lampy: 20 let



PRS10, Stanford Research Systems, [3]

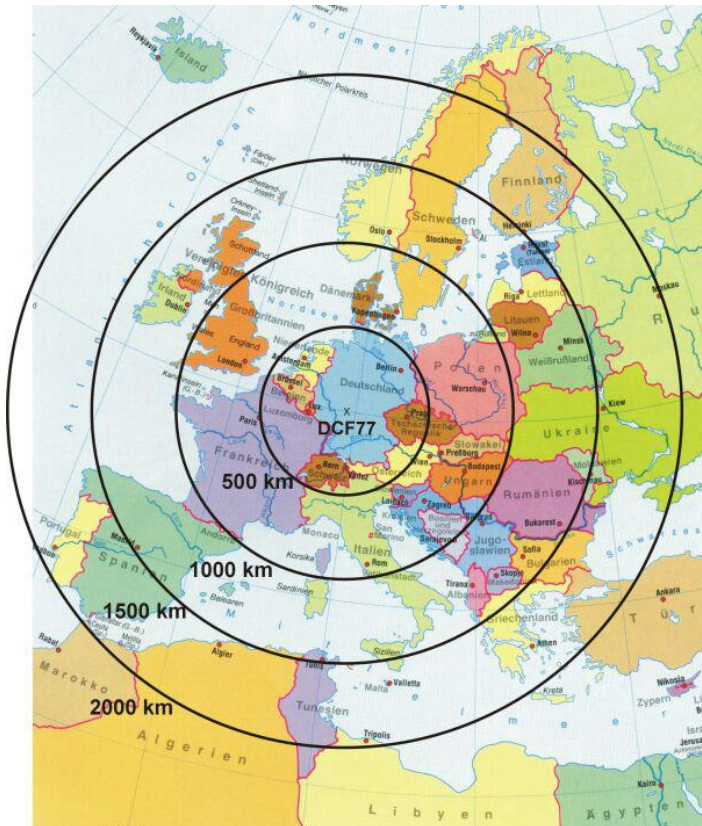


PRS10, Stanford Research Systems: řídicí elektronika a Rb lampa s rezonanční komorou, [3]

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence odvozené z radiových signálů

DCF77: 77,5 kHz/50 kW (dosah cca 2000 km), od r. 1970, Mainflingen u Frankfurtu nad Mohanem, zdroj časových značek: Cesiumový etalon ve Fyzikálně-technolog. institutu v Braunschweigu



DCF77 - dosah (www.ptb.de)



DCF77 – antény (www.ptb.de)

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence odvozené z radiových signálů

DCF77



*DCF77 - koncový stupeň vysílače
(www.ptb.de)*



*DCF77 - generátor vysílaného signálu
se zdrojem nosné - HP5071A (www.ptb.de)*

OMA50: 50 kHz/50 kW, od r. 1958, vysílač: Liblice, zdroj signálu: Cesiový etalon v ÚRE AVČR), komerčně neúspěšný – vypnut 1995

Měření frekvence a fázového posuvu

Etalony frekvence odvozené z radiových signálů

Signály satelitních navigačních systémů

- Dostupné signály:
(GPS, GLONAS, GALILEO)
- Přesnost a stabilita odpovídající Rb etalonu

Příklad: 910R,
Fluke Calibration, [4]

- Kalibrační zdroj kmitočtu řízený GPS signály
- Výstupy: 10 MHz; 5 MHz
($0,5 V_{\text{RMS}}$)
- 1PPS (TTL)
- Stabilita: $< 10^{-12}/\text{den}$



910R, Fluke Calibration, [4]

Měření frekvence a fázového posuvu

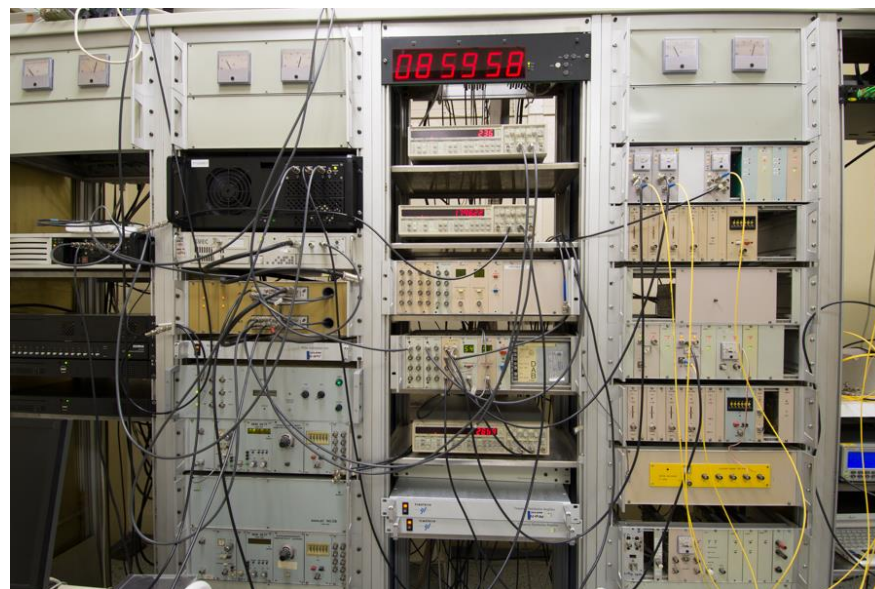
Etalony frekvence

Státní etalon frekvence a času ČR

Umístění: ÚFE AVČR Praha



*Státní etalon frekvence a času ČR,
zdroj signálu – HP5071A
(převzato z: www.cmi.cz)*



*Státní etalon frekvence a času ČR,
zpracování signálu (převzato z:
www.cmi.cz)*

Měření frekvence a fázového posuvu

Čítač

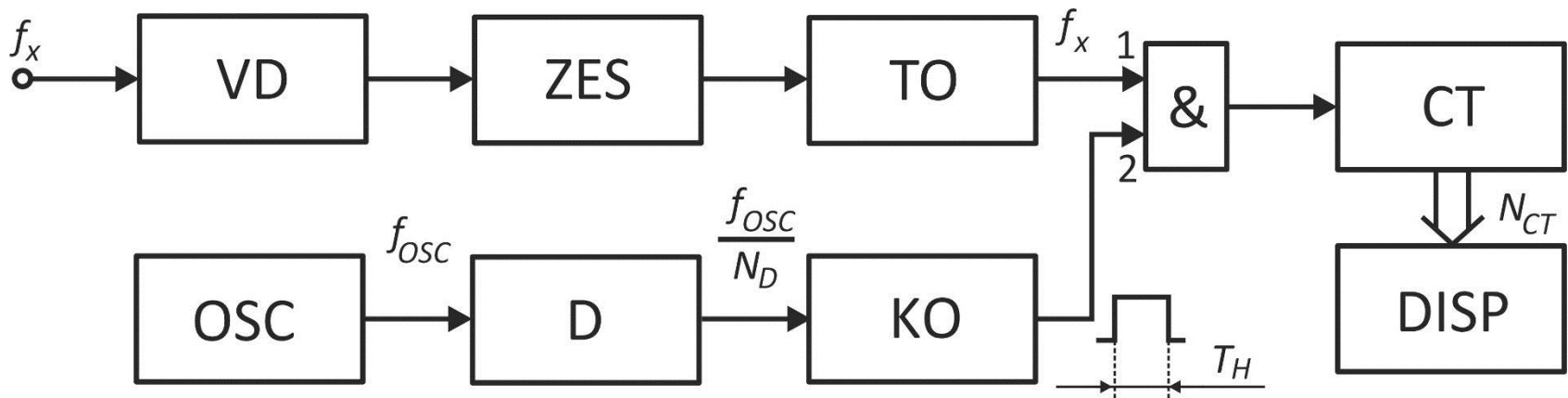
Měření frekvence čítačem (Freq. Mode)

Vstup 1 (měřený signál f_x) je hradlován signálem na vstupu 2 (impulz hradlovací doby o délce T_H). T_H se volí v dekadických násobcích a určuje dosažitelné rozlišení čítače Δf_x .

$$f_x \gg \frac{1}{T_H}, \quad T_H = \frac{1}{f_{OSC}} N_D, \quad f_x = \frac{N_{CT}}{T_H}, \quad \Delta f_x = \frac{1}{T_H}$$

N_D ... dělicí konstanta frekvenčního děliče D

N_{CT} ... počet načítaných impulsů



VD-vstupní dělič, ZES-zesilovač, TO-tvarovací obvod, &-součinné hradlo, OSC-krytalový oscilátor, D-frekvenční dělič, KO-klopný obvod, CT-čítač, DISP-displej

Měření frekvence a fázového posuvu

Čítač

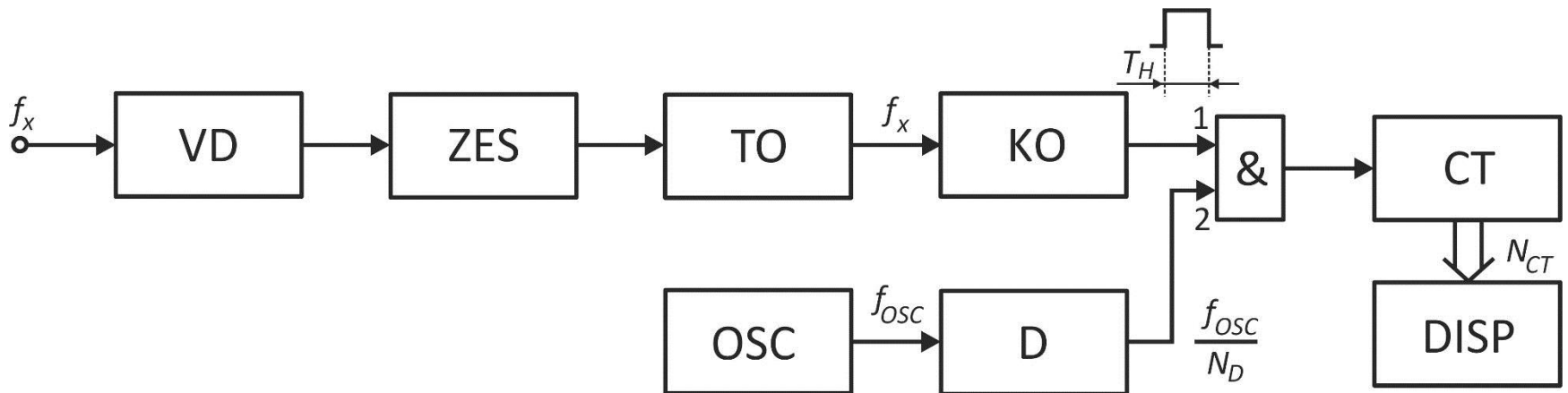
Měření periody čítačem (Period Mode)

Vstup 2 (signál f_{OSC}/N_D) je hradlován signálem na vstupu 1 (tj. impulzem délky T_H odpovídajícím měřené periodě).

$$T_H = \frac{1}{f_x}, \quad T_x = T_H = \frac{N_{CT}}{f_{OSC}} N_D, \quad \text{podm.: } T_x \gg \frac{N_D}{f_{OSC}}$$

N_D ... dělicí konstanta frekvenčního děliče D

N_{CT} ... počet načítaných impulsů



VD-vstupní dělič, ZES-zesilovač, TO-tvarovací obvod, &-součinné hradlo, OSC-krytalový oscilátor, D-frekvenční dělič, KO-klopný obvod, CT-čítač, DISP-displej

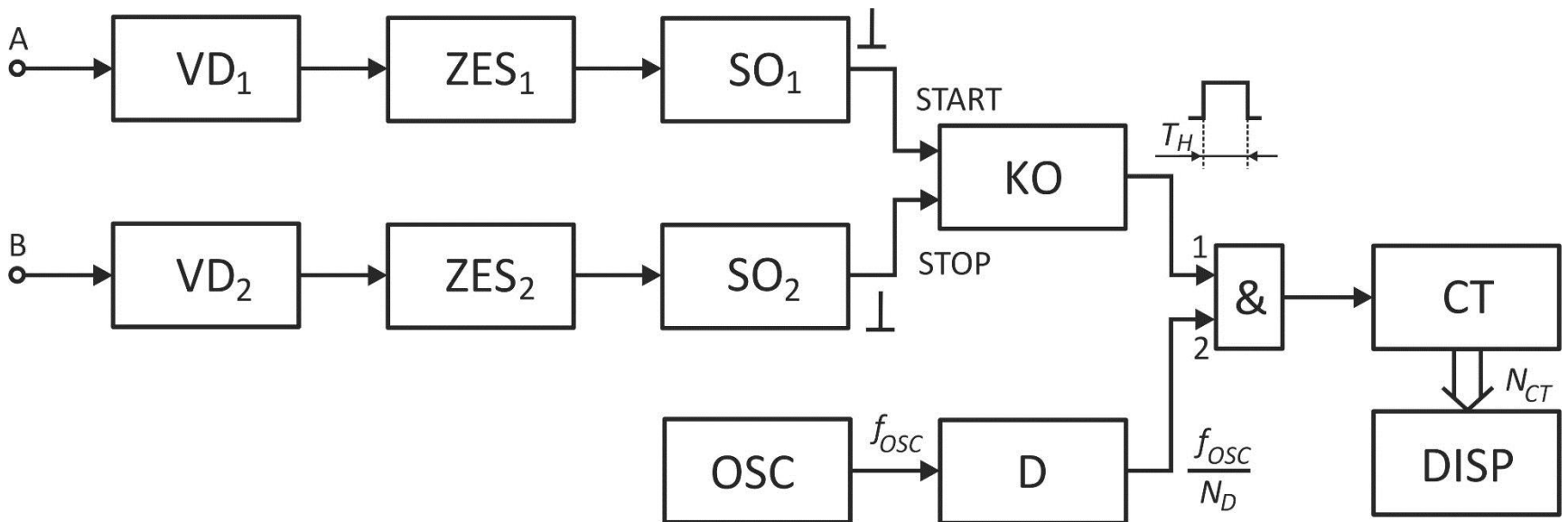
Měření frekvence a fázového posuvu

Čítač

Měření časových intervalů pomocí čítače (Time Interval Mode)

Vstup 2 (sig. f_{OSC}/N_D) je hradlován signálem na vstupu 1 (doba T_H)
 t_{START} ...okamžik spuštění měření (\uparrow popř. \downarrow hrana signálu na vst. A)
 t_{STOP} ...okamžik zastavení měření (\uparrow popř. \downarrow hrana signálu na vst. B)

$$T_H = t_{START} - t_{STOP}, \quad T_x = T_H = \frac{N_{CT}}{f_{OSC}} N_D, \quad \text{podm.: } T_x \gg \frac{N_D}{f_{OSC}}$$



VD-vstupní dělič, ZES-zesilovač, SO-spuštěcí obvod, &-součinnové hradlo, OSC-krytalový oscilátor, D-frekvenční dělič, KO-klopný obvod, CT-čítač, DISP-displej

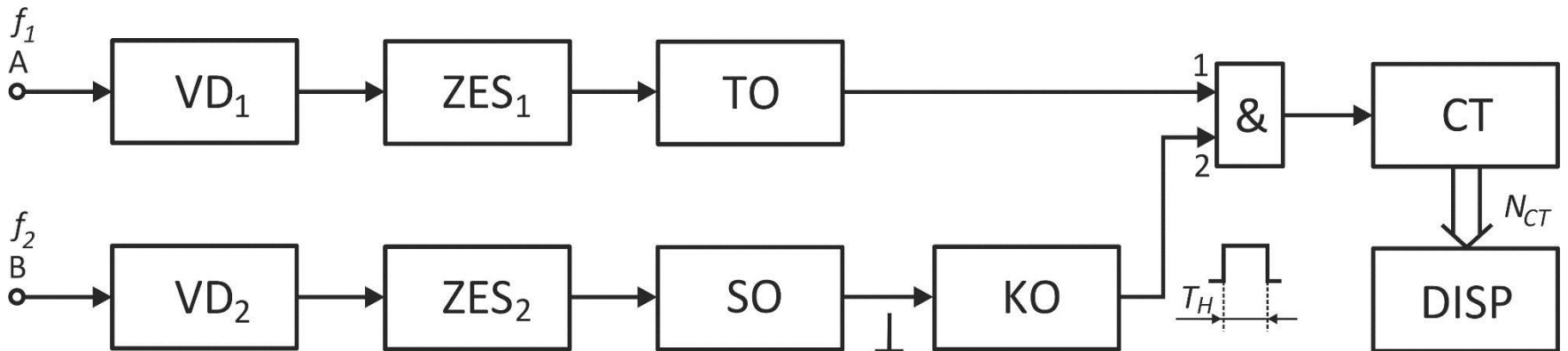
Měření frekvence a fázového posuvu

Čítač

Měření poměru dvou frekvencí pomocí čítače (Ratio Mode)

Vstup 1 (signál f_A) je hradlován signálem na vstupu 2 (impulz délky T_H odpovídající době periody signálu f_B). Načítaná hodnota N_{CT} odpovídá vzájemnému poměru frekvencí.

$$T_H = \frac{1}{f_2} = T_B, \quad N_{CT} = \frac{T_B}{T_A} = \frac{f_A}{f_B}, \quad \text{podm.: } f_A \gg f_B$$



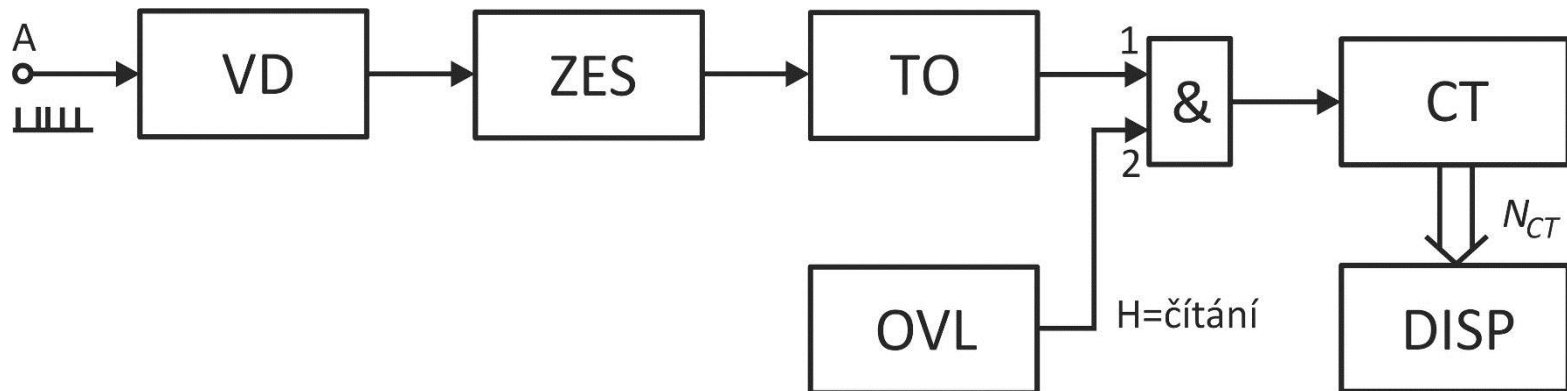
VD-vstupní dělič, ZES-zesilovač, TO-tvarovací obvod, SO-spouštěcí obvod, &-součinné hradlo, KO-klopný obvod, CT-čítač, DISP-displej

Měření frekvence a fázového posuvu

Čítač

Měření počtu impulzů pomocí čítače (Total. Mode)

Hradlo je otevřené (vstup 2 v úrovni H). Pulzy přivedené na vstup A jsou čítány čítačem CT. Ukončení čítání je řízeno manuálně z čelního panelu čítače (blok OVL).



VD-vstupní dělič, ZES-zesilovač, TO-tvarovací obvod, &-součinnové hradlo, CT-čítač, DISP-displej, OVL-ovládání

Měření frekvence a fázového posuvu

Čítač

Příklad: Čítač **1823A**,
BK Precision, [6]

- Režimy: Freq.; Period; Ratio, Time Intervals; Total

- Vstup C: do 2,4 GHz (3 V max.)

- Vstupy A, B: do 100 MHz (250 V_{pp} max.)

Vazba AC/DC

ATTN: 1/1 nebo 10/1

LPF: ON/OFF

- Nastavitelná spouštěcí úroveň vstupu A
- Hradlovací doba volitelná: 10 ms; 0,1 s; 1 s; 10 s

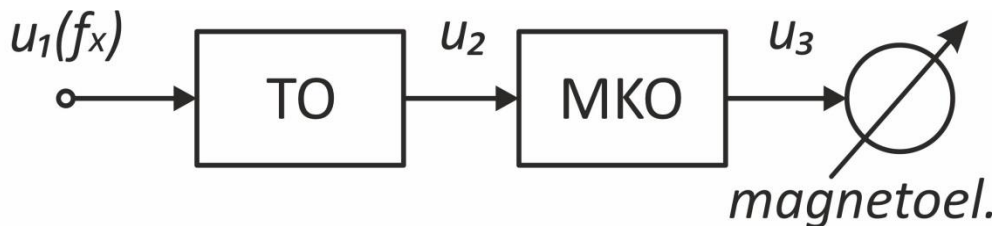


Čítač 1823A, BK Precision (převzato z:
www.bkprecision.com)

Měření frekvence a fázového posuvu

Analogové měřiče frekvence

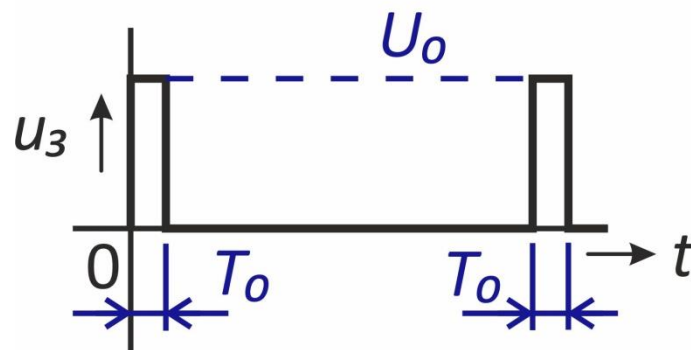
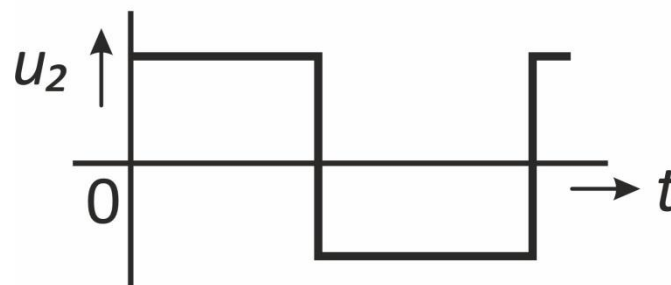
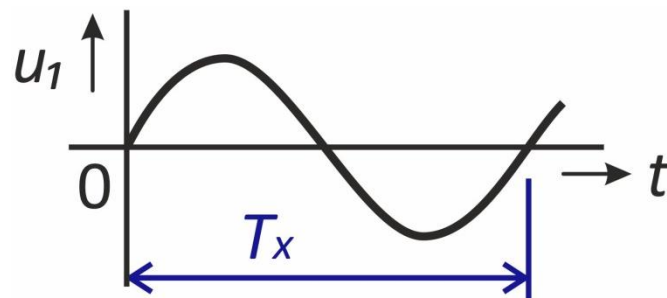
Frekv. signálu je dána četností kladných impulzů definovaného tvaru. Četnost pulzů je určena měřením střední hodnoty průběhu (magnetoel. systém).



TO...tvarovací obvod

MKO...monostabilní klopný obvod

$$U_{av} = \frac{1}{T_x} \int_0^{T_x} u_3(t) dt =$$
$$= \frac{1}{T_x} \int_0^{T_0} U_o dt = f_x U_o T_0 = k f_x$$

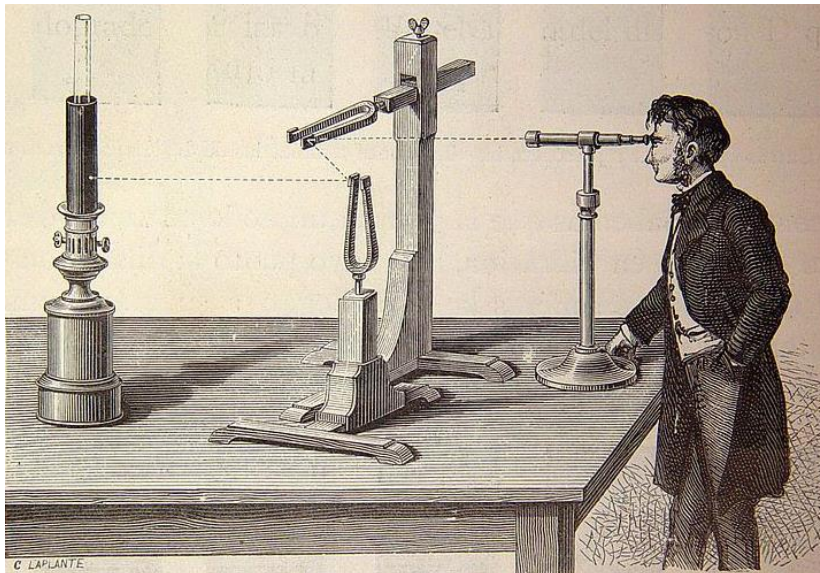


Použití: otáčkoměry v automobilech

Měření frekvence a fázového posuvu

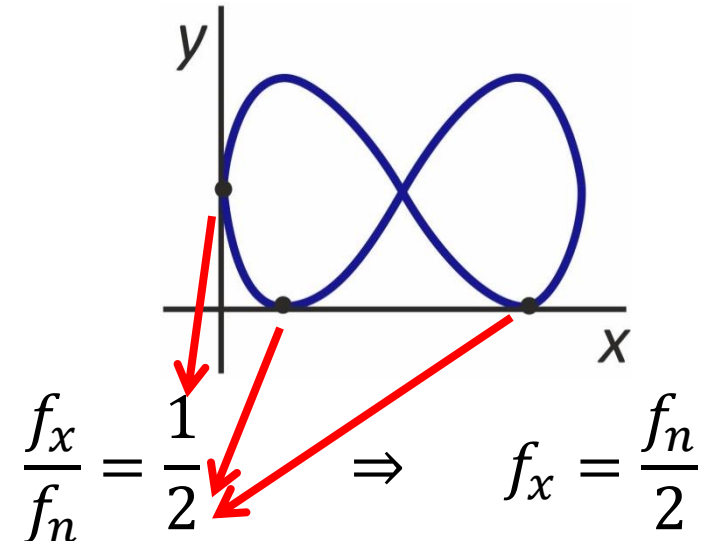
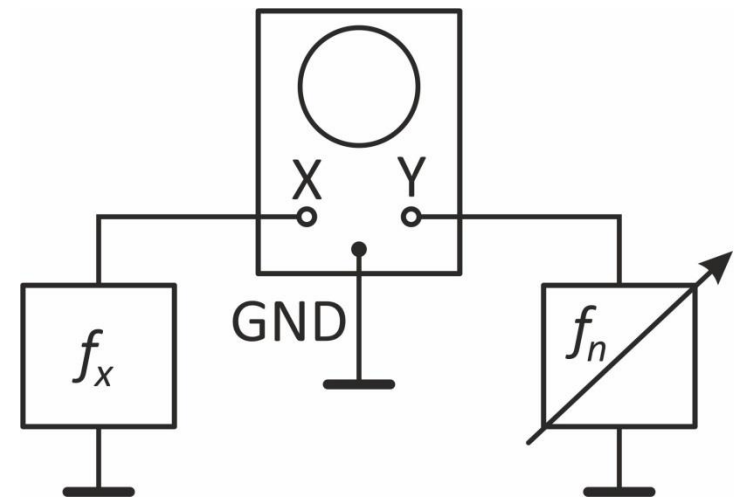
Porovnávání frekvencí metodou Lissajousových obrazců

- Nathaniel Bowditch (1773-1838) matematik, astronom, navigátor, 1815 popis L. obr.
- Jules Antoine Lissajous (1833-1880) matematik, 1857 - optické zařízení na vykreslování L. obrazců



(převzato z: <https://mathematica.stackexchange.com>)

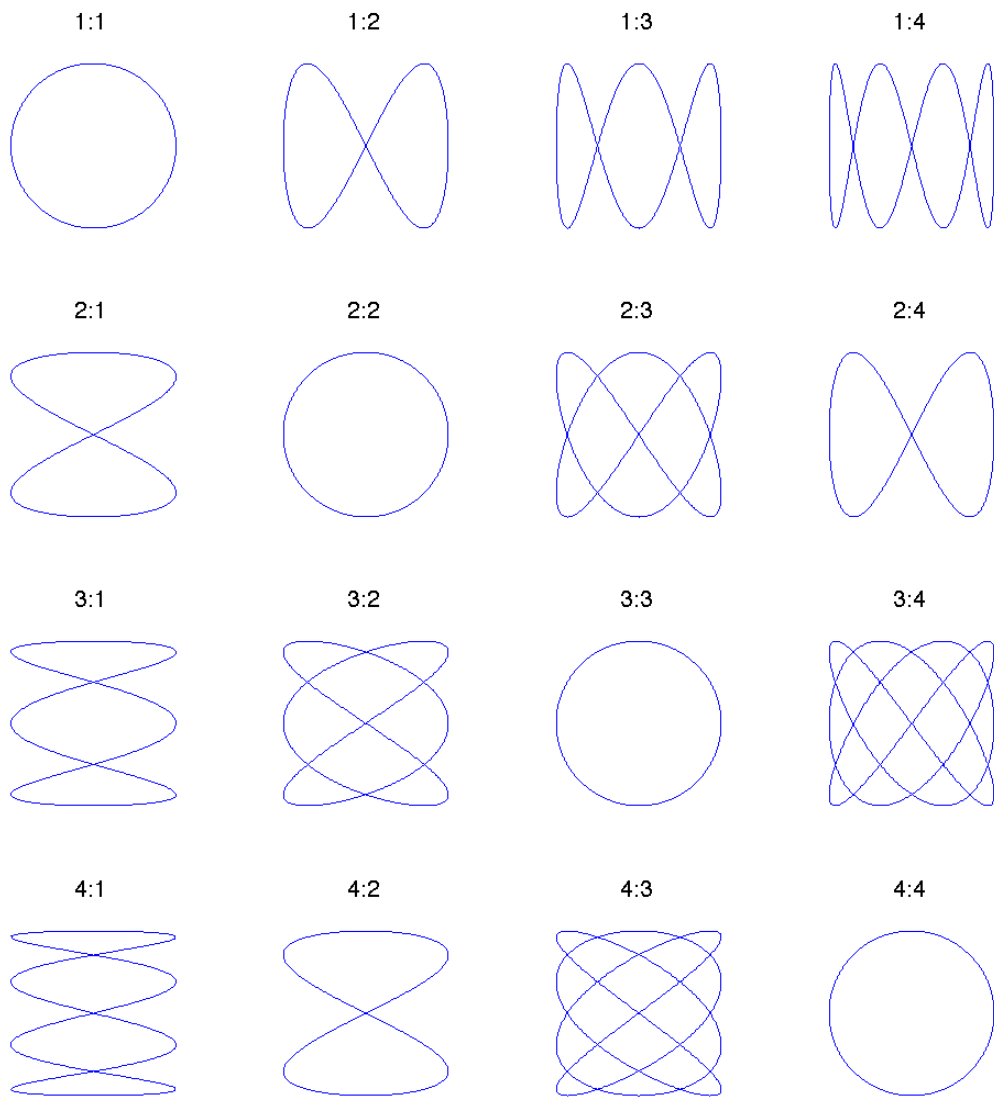
- Osciloskop v režimu XY



Měření frekvence a fázového posuvu

Porovnávání frekvencí metodou Lissajousových obrazců

- Vzájemný poměr frekvencí je dán převráceným poměrem počtu styčných bodů křivky s osami x , y
- Pokud poměr frekvencí neodpovídá poměru dvou celých čísel, obrazec "rotuje".
- Přesnost měření je dána přesností etalonového zdroje frekvence.



Lissajousovy obrazce pro různé poměry frekvencí

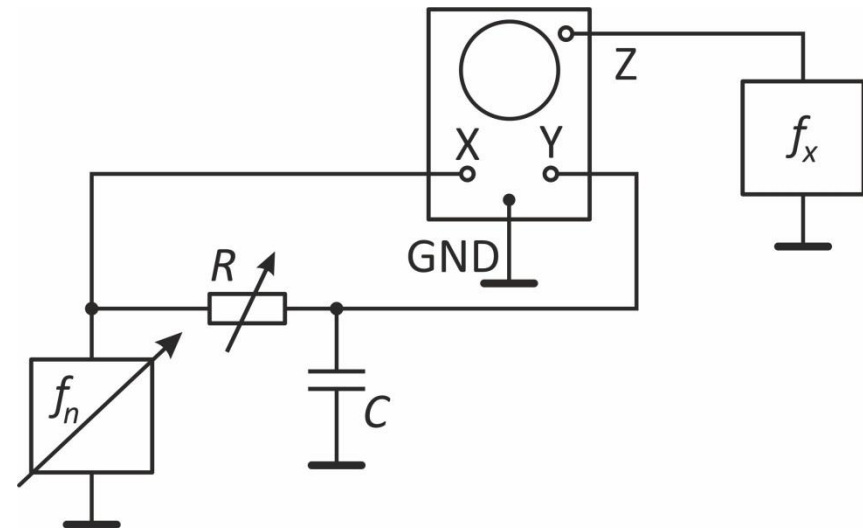
Měření frekvence a fázového posuvu


Porovnávání frekvencí metodou modulace jasu

- Osciloskop pracuje v režimu XY. Pomocí externího fázovacího článku (např. RC obvod) a etalonového generátoru je vytvořena elipsa (Lissajous 1:1).
- Modulace jasu se provádí vstupem Z osciloskopu.




Vstup Z osciloskopu DSOX2002A, Agilent Technologies (převzato z: www.agilent.com)





$f_x = 2 f_n$

A blue Lissajous figure consisting of two vertical loops, representing a 2:1 frequency ratio. Below it is the equation $f_x = 2 f_n$.



$f_x = 3 f_n$

A blue Lissajous figure consisting of three vertical loops, representing a 3:1 frequency ratio. Below it is the equation $f_x = 3 f_n$.

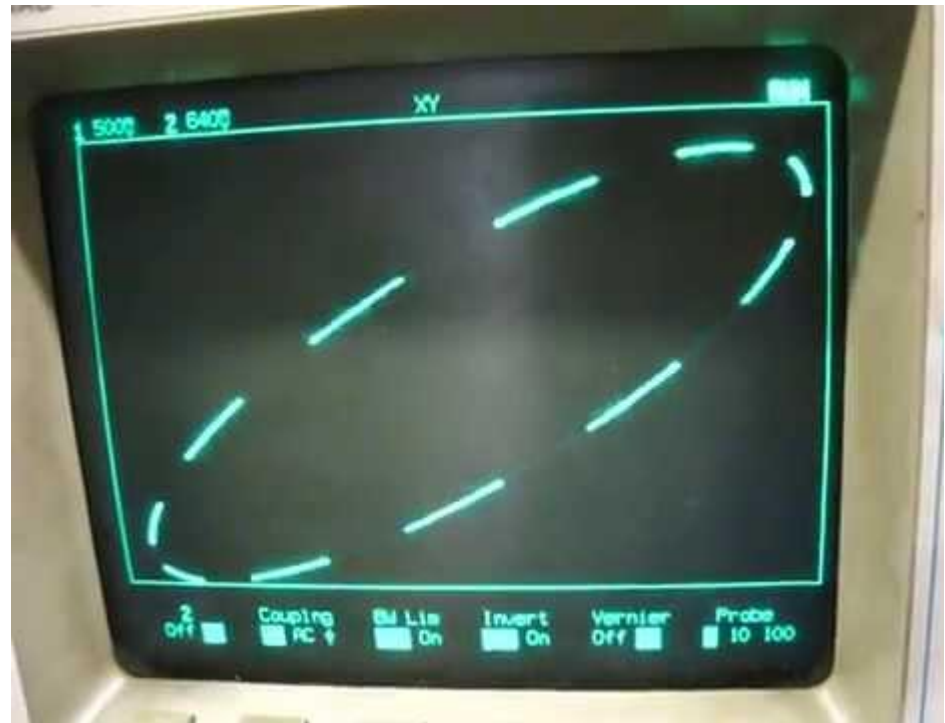
$$f_x = k f_n$$

k ...počet přerušení obrazce

Měření frekvence a fázového posuvu

Porovnávání frekvencí metodou modulace jasu

- Počet přerušení obrazce určuje, kolikrát je neznámý kmitočet větší než etalonový.
- Pokud k není celé číslo, obrazec "rotuje".
- Přesnost měření je dána přesností etalonového zdroje frekvence.



Metoda modulace jasu (poměr kmitočetů 11:1)

Měření frekvence a fázového posuvu

Fázový posuv

- Fázový posuv vyjadřuje vzájemnou polohu dvou sinusových průběhů stejného kmitočtu.

$$u_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t)$$

$$u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\text{Fázový posuv } \varphi = ?$$

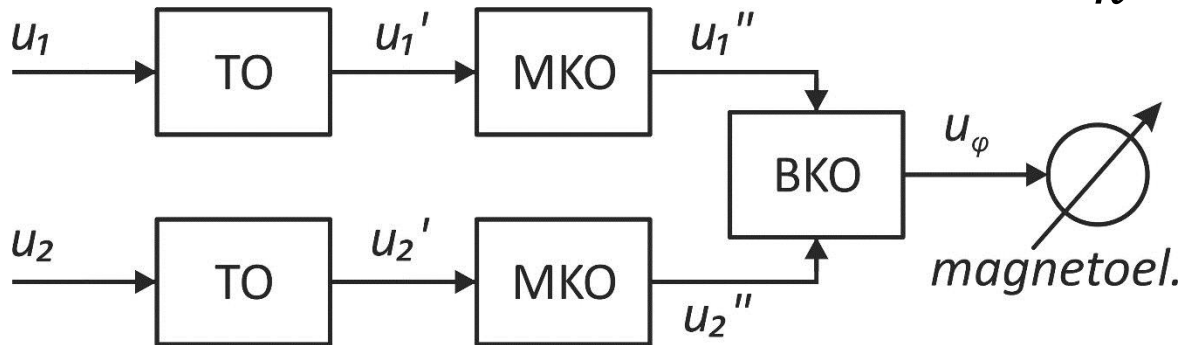
- Fázový posuv se udává ve stupních (1 perioda je 360°) nebo v radiánech (1 perioda je 2π radiánů).
- V principu jde o měření časových intervalů. Obvykle se měří posunutí mezi dvěma nejbližšími průchody nulou s kladnou derivací.
- V případě nesinusových průběhů (stejného tvaru a frekvence) lze posuv stanovit z průchodů nulou nebo z posuvu prvních harmonických složek (pozn.: při různém tvaru mohou dávat oba způsoby odlišné výsledky).

Měření frekvence a fázového posuvu

Analogové fázoměry

Fázový posuv odpovídá šířce impulsu T_0 konstantní výšky U_o .

Na výstupu BKO je signál $u_\varphi(t)$ složený z těchto impulsů. Střední hodnota signálu $u_\varphi(t)$ je úměrná fázovému posuvu.



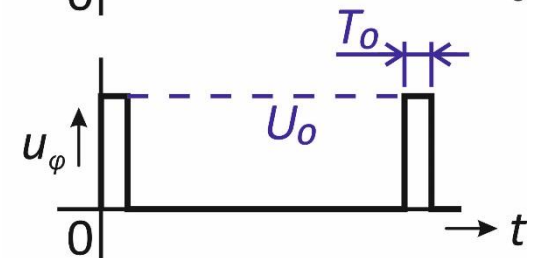
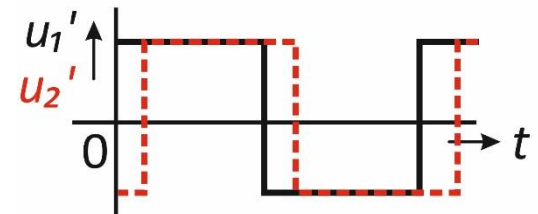
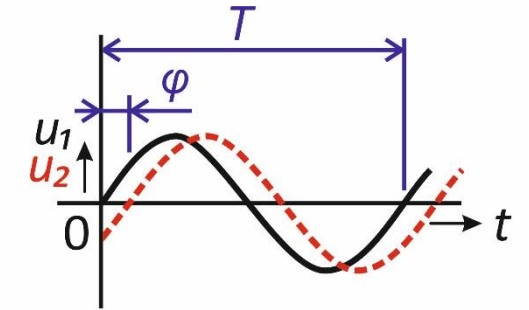
TO-tvarovací obv., MKO-monostab. klopný obv., BKO-bistab. klopný obv.

$$U_{\varphi av} = \frac{1}{T} \int_0^T u_\varphi(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_o dt =$$

$$= \frac{1}{T} U_o T_0 = \left| \frac{T_0}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \right| = \frac{U_o}{2\pi} \varphi = k\varphi$$

$$k = \frac{U_o}{2\pi}$$

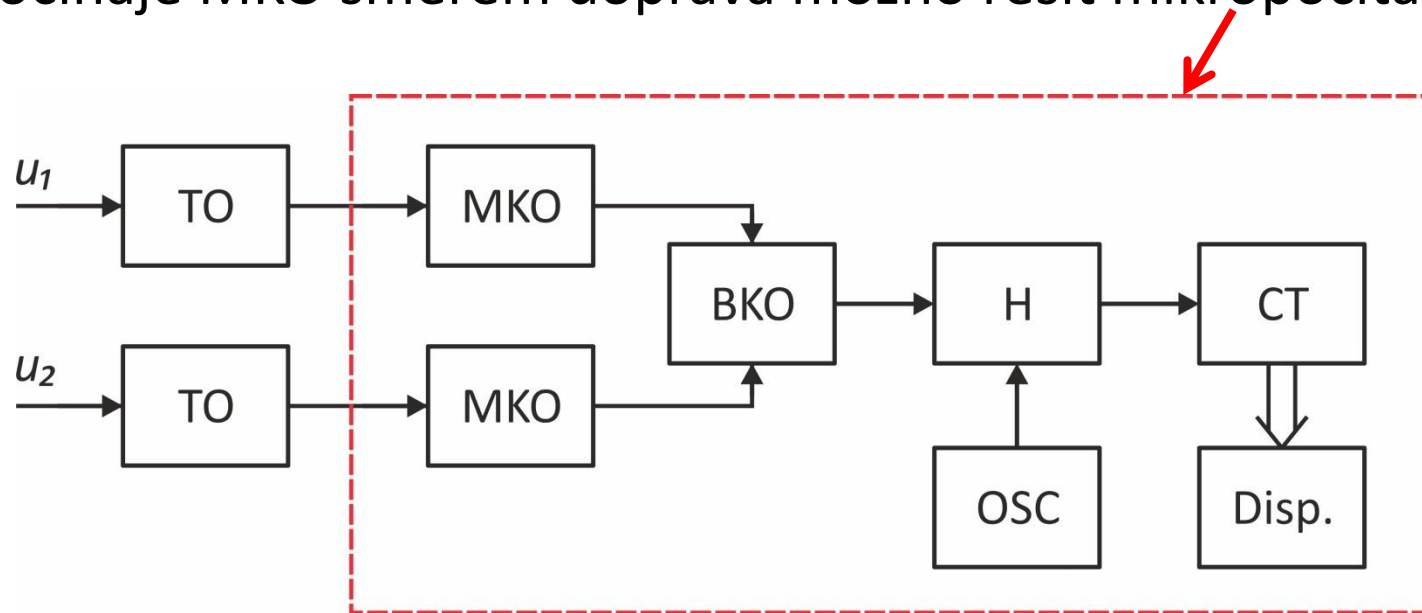
$$\varphi = \frac{U_{\varphi av}}{k}$$



Měření frekvence a fázového posuvu

Digitální fázoměry

Princip viz analogové fázoměry. Výstupem bistabilního klopného obvodu je hradlován signál z oscilátoru OSC. Pulzy oscilátoru jsou po dobu odpovídající fázovému posuvu čítány čítačem. Počet načítaných pulzů je pak úměrný fázovému posuvu. (Počínaje MKO směrem doprava možno řešit mikropočítačem.)



TO-tvarovací obvod, MKO-monostabilní klopný obvod, BKO-bistabilní klopný obvod, H-hradlo, CT-čítač, DISP-displej

Měření frekvence a fázového posuvu

Digitální fázoměry

Příklad: GF211, Gfuve, [7]

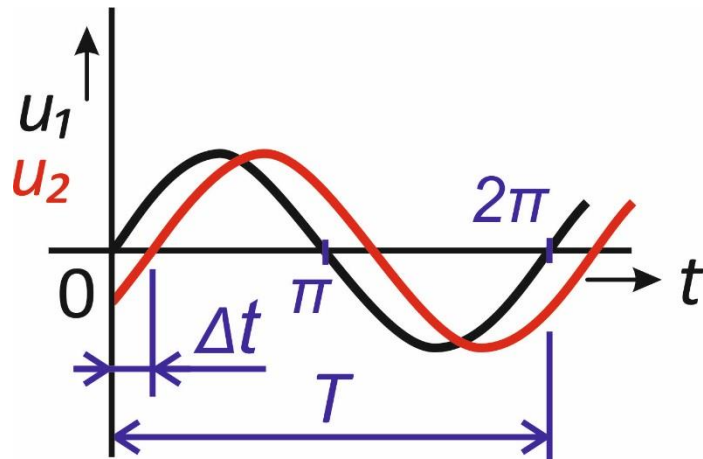
- Měření napětí, proudu a fázového posuvu
- Pracovní frekvence: 50/60 Hz \pm 2 Hz
- Dva proudové vstupy: (2x kleště)
- Dva napěťové vstupy
- Chyba měření fáze: \pm 1 %



Měřič fázového posuvu GF211, [7]

Měření frekvence a fázového posuvu

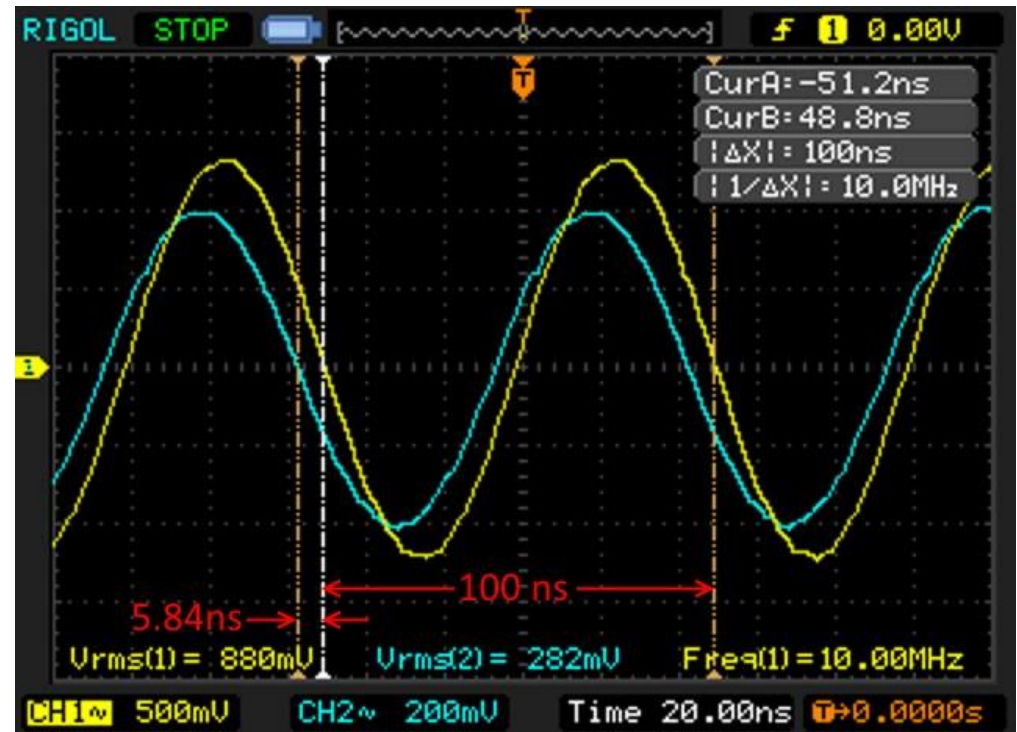
Měření fázového posuvu osciloskopem režimu Y-t



$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{\varphi}{2\pi} \Rightarrow \varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T}$$

- Časové intervaly Δt a T je možné odečítat pomocí rastru osciloskopu nebo s využitím kurzorů.

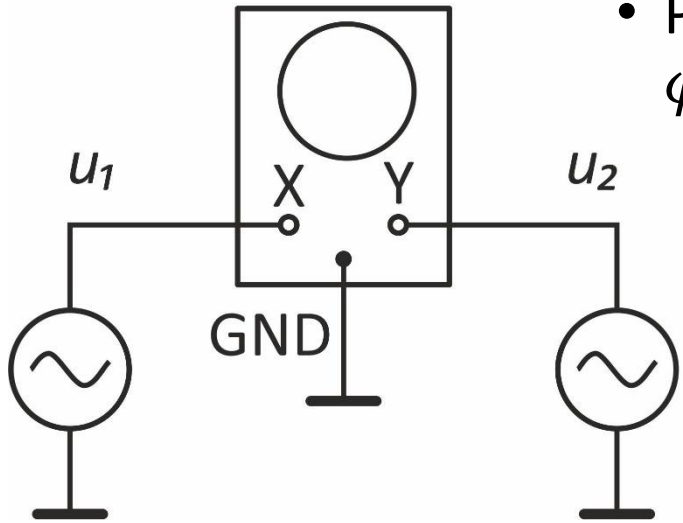
Příklad: měření fázového posuvu osciloskopem (signály $f = 100$ MHz)



$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = 360^\circ \frac{5,84 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^{-9}} = \underline{21,02^\circ}$$

Měření frekvence a fázového posuvu

Měření fázového posuvu osciloskopem režimu XY



- Pro elipsu s vrcholem v I. kvadrantu bude $\varphi \in (-90^\circ; 90^\circ)$ a platí:

$$|\sin\varphi| = \frac{a}{A} \Rightarrow \varphi = \pm \arcsin \frac{a}{A}$$

resp.

$$|\sin\varphi| = \frac{b}{B} \Rightarrow \varphi = \pm \arcsin \frac{b}{B}$$

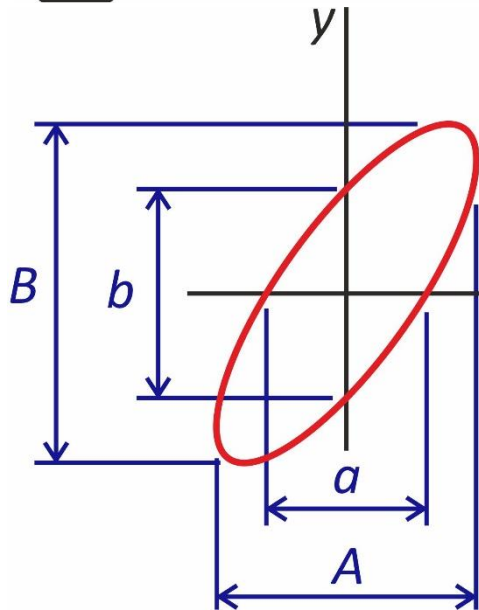
- Pro elipsu s vrcholem ve II. kvadrantu bude $\varphi \in (90^\circ; 270^\circ)$ a platí:

$$|\sin(\varphi - 180^\circ)| = \frac{a}{A} \Rightarrow \varphi = \pm \arcsin \frac{a}{A} + 180^\circ$$

resp.

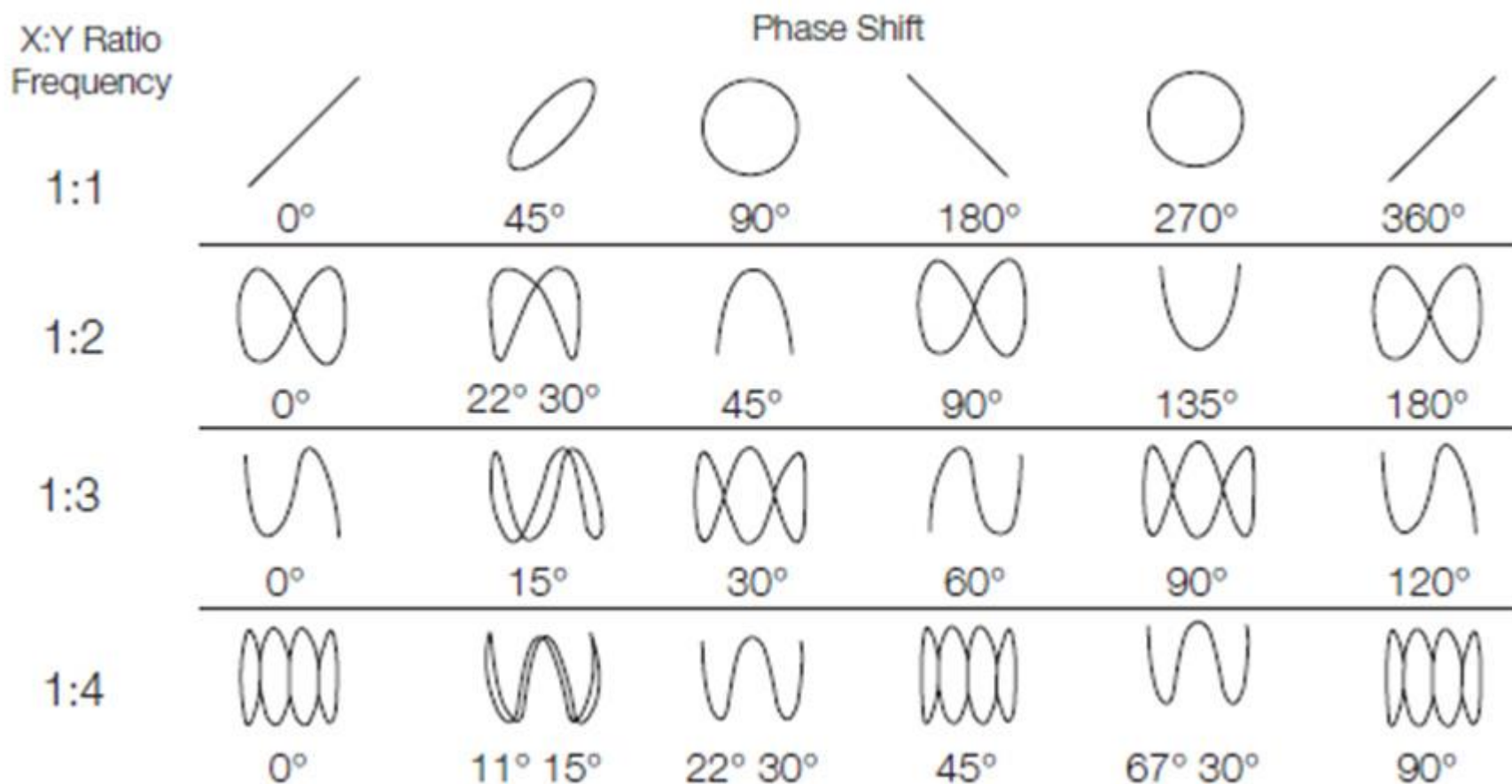
$$|\sin(\varphi - 180^\circ)| = \frac{b}{B} \Rightarrow \varphi = \pm \arcsin \frac{b}{B} + 180^\circ$$

- Znaménko úhlu φ lze stanovit v režimu Y-t.



Měření frekvence a fázového posuvu

Měření fázového posuvu osciloskopem režimu XY

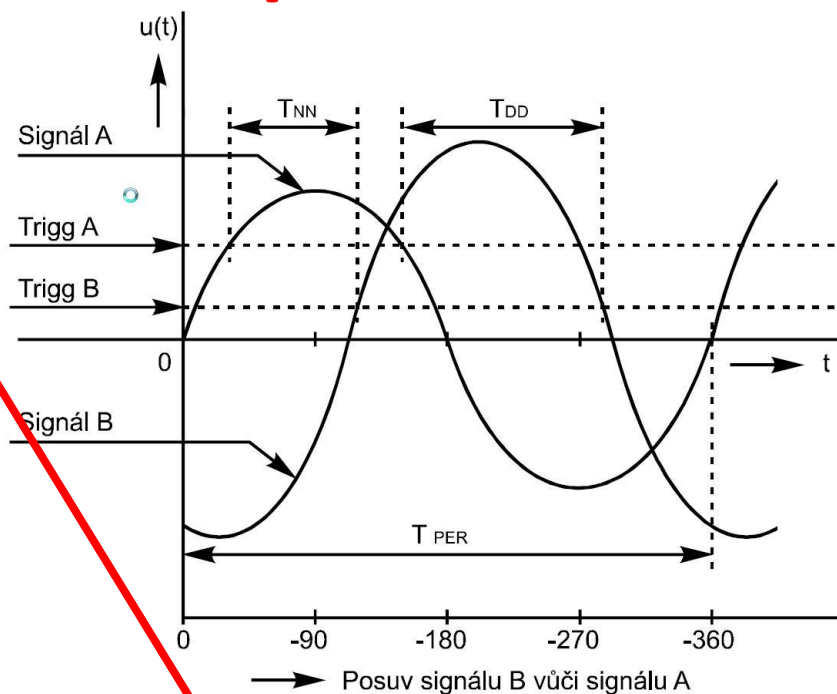


*Lissajousovy obrazce pro různé kombinace frekvencí a fázových posuvů
(převzato z: www.tek.com)*

Měření frekvence a fázového posuvu

Měření fázového posuvu čítačem

- Signály jsou přivedeny na vstupy A a B dvoukanálového čítače.
- V režimu PERIOD změříme dobu periody T signálu na vstupu A nebo B.
- V režimu T. I. změříme časové intervaly t_{nn} ($\uparrow A \rightarrow \uparrow B$) a t_{dd} ($\downarrow A \rightarrow \downarrow B$)
- Délka intervalů je t_{nn} a t_{dd} je ovlivněna nastavením spouštěcích úrovní vstupů A a B.
- Metoda kompenzace nenulové spouštěcí úrovně průměrováním předpokládá dokonalou symetrii signálů.



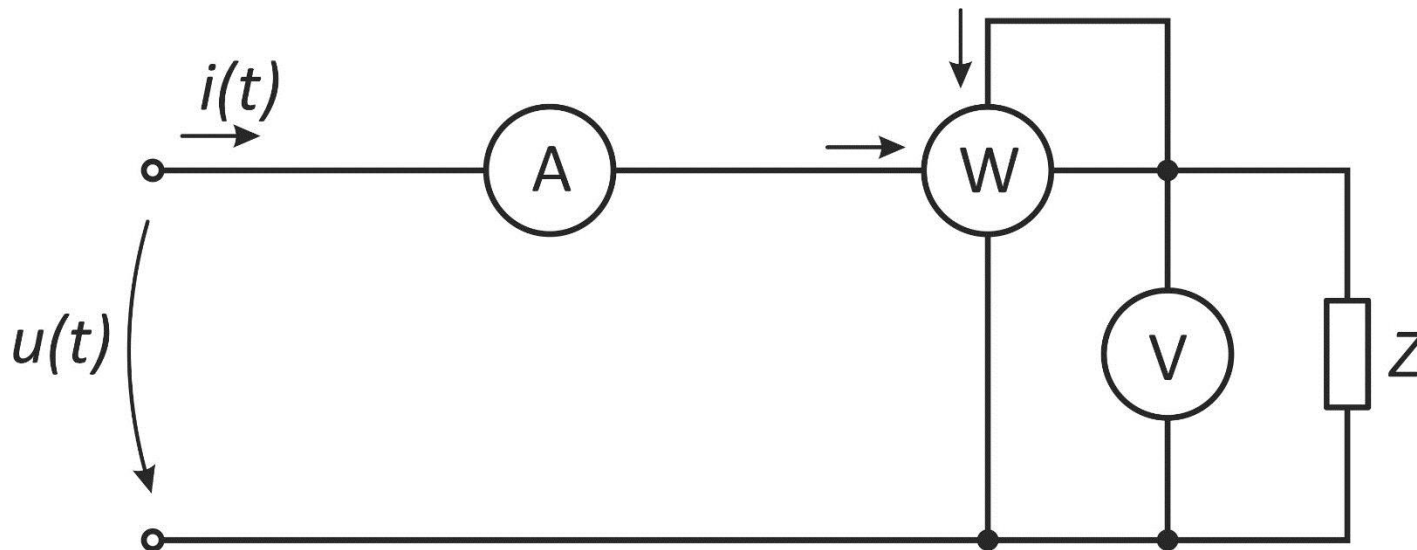
$$\Delta t = \frac{t_{nn} + t_{dd}}{2}$$

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta t}{T} = \pi \frac{t_{nn} + t_{dd}}{T}$$

Měření frekvence a fázového posuvu

Měření fáze mezi napětím a proudem v silovém obvodu

- V napájecí síti lze určit fázový posuv na zátěži prostřednictvím měřeného činného a zdánlivého výkonu.
- Při zanedbání vlastní spotřeby použitých přístrojů (přenášené výkony jsou řádově významnější) platí:



$$S = UI$$

$$P = k_w \alpha$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$\varphi = \arccos \frac{P}{S}$$

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018
- [2] Agilent Technologies: Agilent 5071A Frequency Standard, Product Overview, 5968-1862E, 2000, www.agilent.com
- [3] Stanford Research Systems: PRS10- Rubidium frequency standard with low phase noise, Data Sheet, www.thinkSRS.com
- [4] Fluke: 910/910R GPS Controlled Frequency Standards, Technical Data, 10780-eng Rev 03, 2013, www.flukecal.com
- [5] Agilent Technologies: Fundamentals of the Electronic Counters, Application Note 200 Electronic Counter Series, 5965-7660E, 1997, www.agilent.com
- [6] BK Precision: Model 1823A2.4GHz Universal Frequency Counter, Instruction Manual, 2004, www.bkprecision.com
- [7] GFUVE: GF211 Meter test equipment, Data Sheet, www.gfuve.com