



3a.

KAPACITA - kapacitní senzory

Přednášející: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

husak@fel.cvut.cz,

<http://micro.fel.cvut.cz>

tel.: 2 2435 2267

Cvičící:

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Ing. Alexandr Laposa, Ph.D.

Ing. Tomáš Teplý

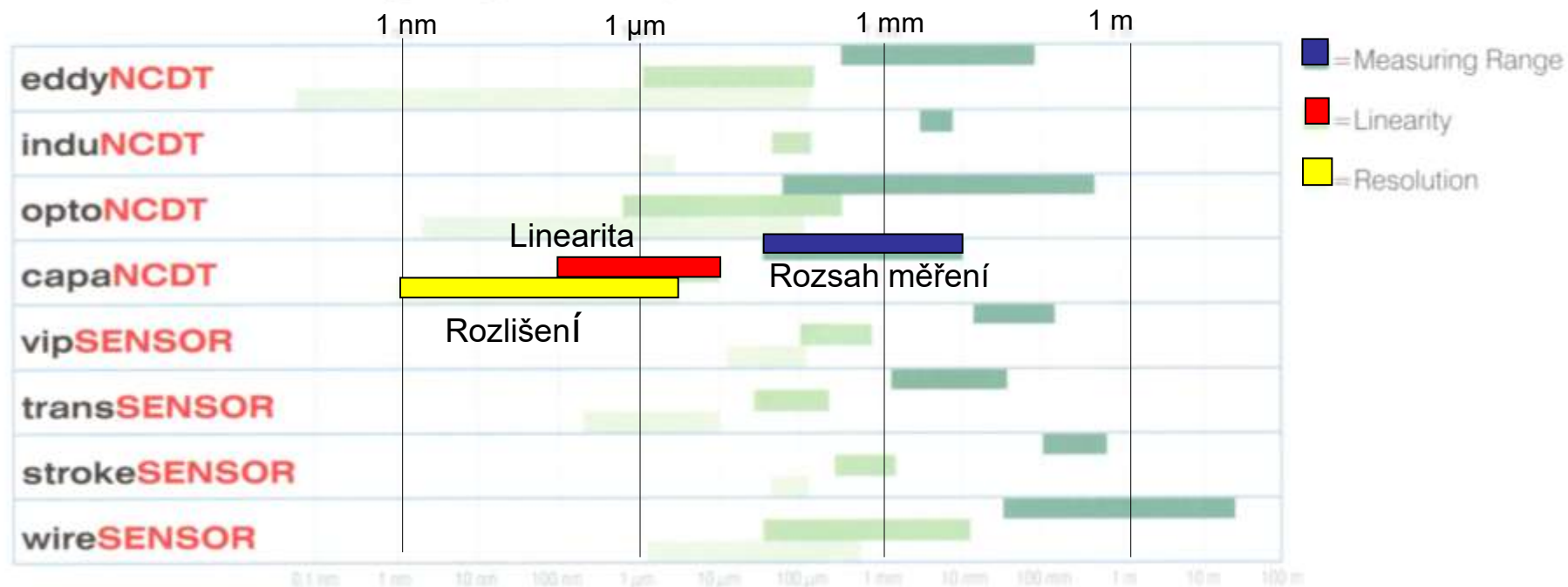


Kapacitní senzory



Kapacitní senzory – parametry měření

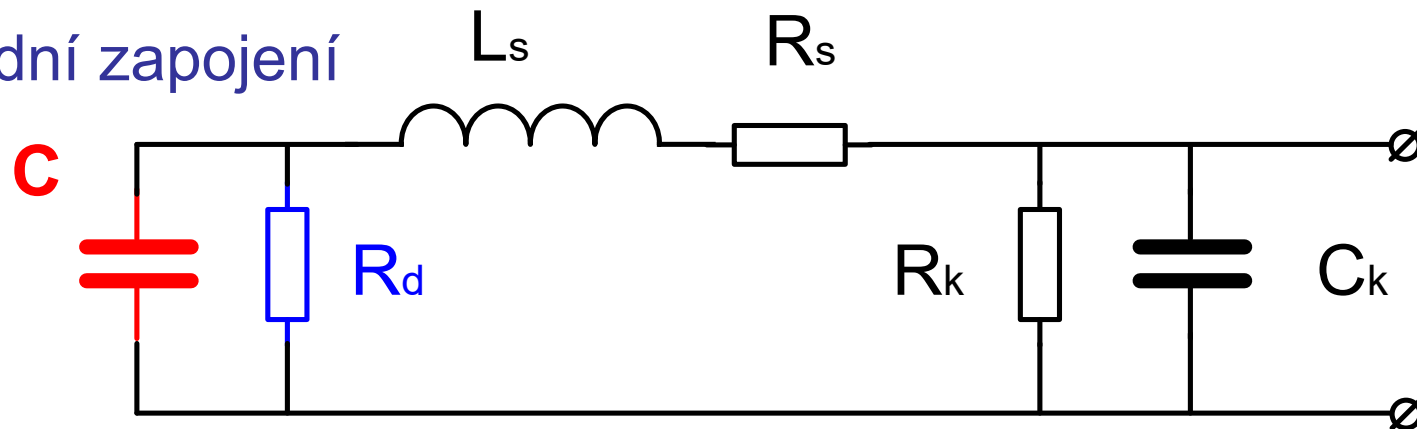
Displacement and position sensors: measuring ranges from 50 μm to 30 m - short overview of measuring range, linearity and resolution



Kapacitní senzory – princip činnosti

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} \rightarrow dC = \frac{\partial C}{\partial S} dS + \frac{\partial C}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial C}{\partial d} d(d)$$

Náhradní zapojení



Pracovní kmitočet

$$R_s, \omega L_s \ll \frac{1}{\omega C} \ll R_d, R_k, \frac{1}{\omega C_k}$$

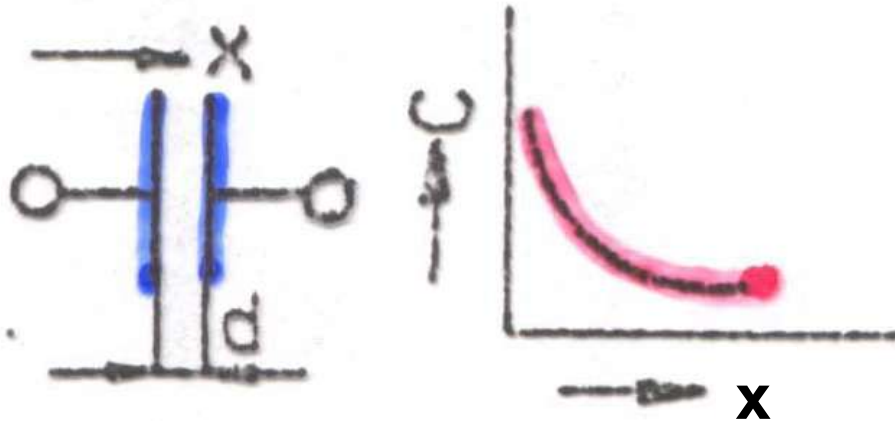
? Kapacitní senzor: Napište základní rovnici pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru a k ní napište diferenciální rovnici popisující změnu kapacity, Nakreslete náhradní zapojení pro připojení kapacitního senzoru k měřicímu obvodu, K náhradnímu obvodu napište nerovnici pro určení frekvence napájecího signálu



Změna kapacity – změna vzdálenosti elektrod

Zkouška

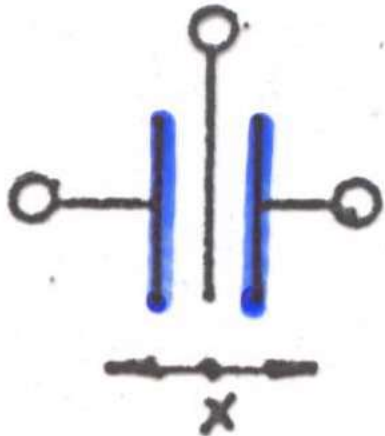
a) Vzdálenost elektrod – posunutí cca do 1 mm



$$C_o = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{S}{d}$$

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{S}{d \pm \Delta d}$$

Diferenciální zapojení



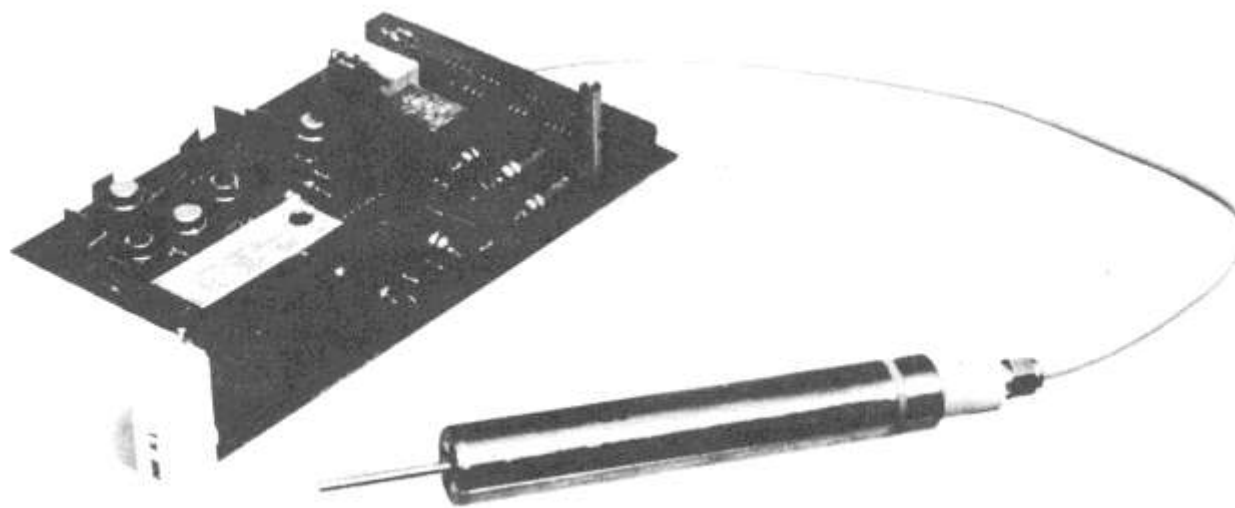
$$C = C_o \frac{1}{1 \pm \frac{\Delta d}{d}}$$

? Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity změnou vzdálenosti elektrod

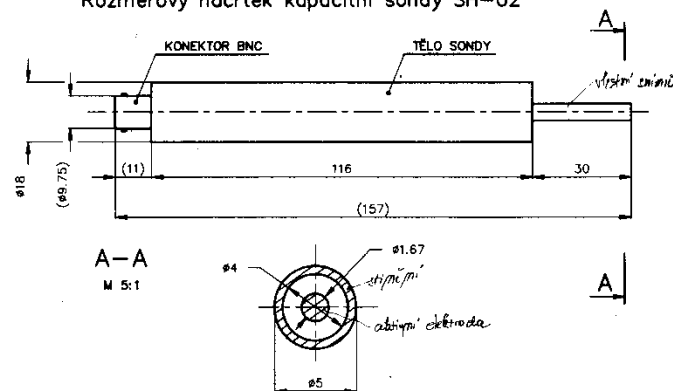
Změna kapacity – změna vzdálenosti elektrod

a) Vzdálenost elektrod – posunutí cca do 1 mm

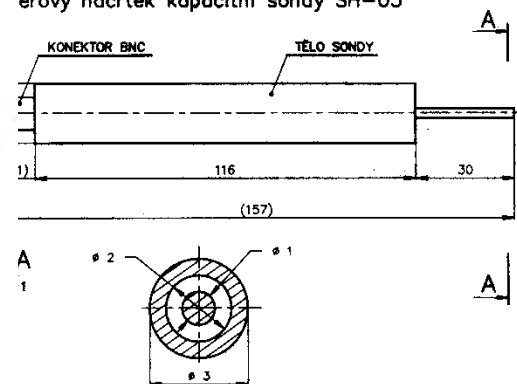
- měření hřzivosti rotujících částí
- měření vibrací rotujících i pevných částí
- měření posunutí (např. u deformačních členů) vlivem jiné mechanické veličiny
- měření úchylek od referenční plochy
- měření tloušťky elektricky vodivých i izolačních materiálů
- třídění součástek



Rozměrový náčrtek kapacitní sondy SH-02



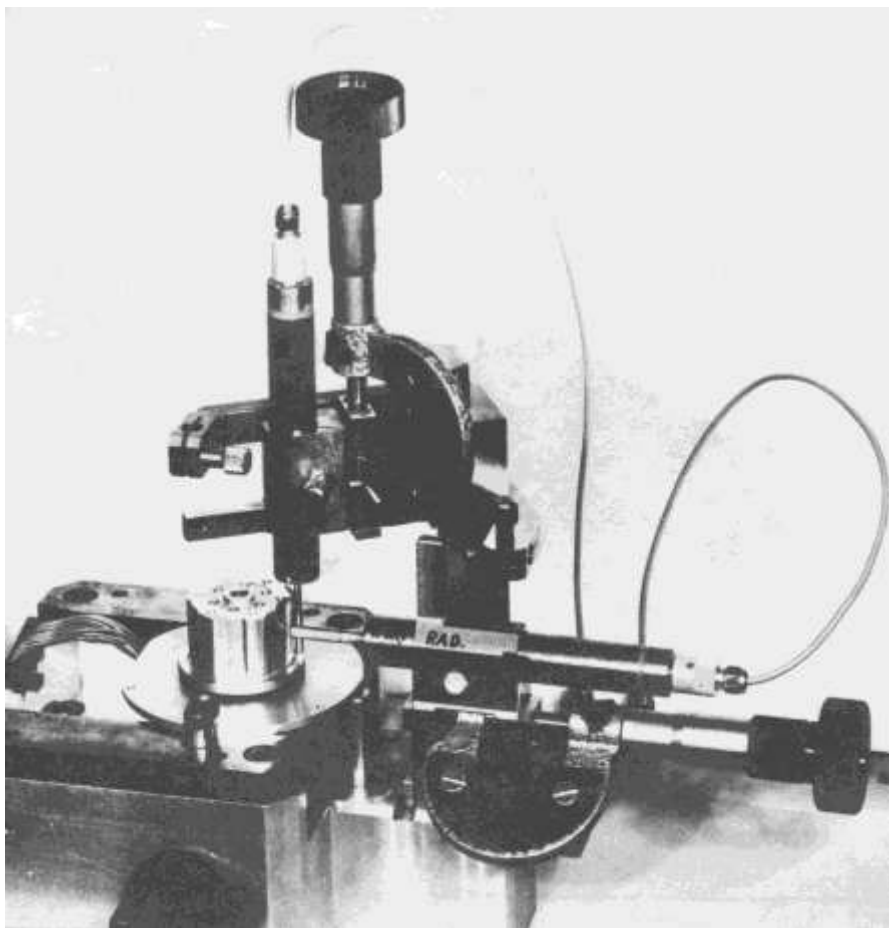
ěrový náčrtek kapacitní sondy SH-03



KA BRNO s.p., Lazaretní 7, 656 17 Brno, ČSFR, odd. výzkum-vývoj
tel. 692 696/408 (Nečas), telex 82260, fax 876791

Změna kapacity – změna vzdálenosti elektrod

a) Vzdálenost elektrod – posunutí cca do 1 mm



parametr	typ sondy	
	SH-02	SH-03
Průměr aktivní plochy sondy	1,67 mm	1 mm
Délka hrotu sondy	30 mm	
Průměr hrotu sondy	5 mm	3 mm
Vzdálenost hrany měřené plochy od podélné osy sondy	min. 2 mm	min. 1 mm
Délka kabelu sondy	asi 1 m	
Jmenovitá vzdálenost sondy od měřené plochy	200 μ m	
Měřicí rozsah	1–10 μ m	
Výstupní napětí	± 1 V/ μ m	
Nelinearita výstupního napětí (bez linearizace)	$\pm 0,5$ %/ μ m	
Rozlišovací schopnost	dána šířkou (řádově 20 nm)	
Teplotní rozsah	(23 \pm 5) °C	
Relativní vlhkost	(50 \pm 10) %	
Teplotní nestabilita	max. 0,5 μ m/°C	max. 1 μ m/°C
Teplotní gradient	max. 5 °C/hod.	
Frekvenční rozsah	do 10 kHz	
Napájecí napětí (zvlnění), odběr	± 15 V ($\pm 1\%$), 50 mA + 5 V ± 5 %, 20 mA	
Teplota skladování	(-10 až +50) °C	
Relativní vlhkost při skladování	(30 až 70) %	
Možnost doladění	-viceotáčkovým trimrem -osmibitovým slovem -s úrovní TTL	
Vyhodnocovací část	deska 100 x 170 x 30 mm s konektorem FRB 62 kontaktů	
Váha sondy	130 g	125g
Rozměry sondy	viz rozměrový náčrtek	

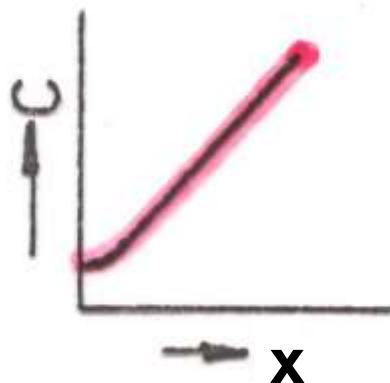
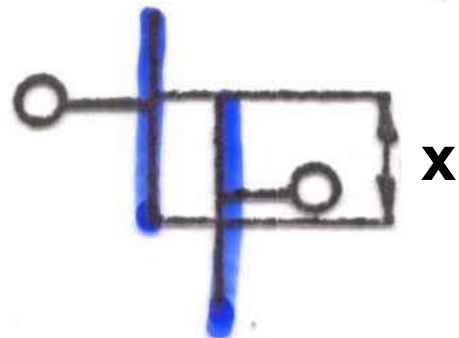
Změna kapacity – vzájemné posunutí elektrod

b) Posunutí elektrod – nad 1 mm

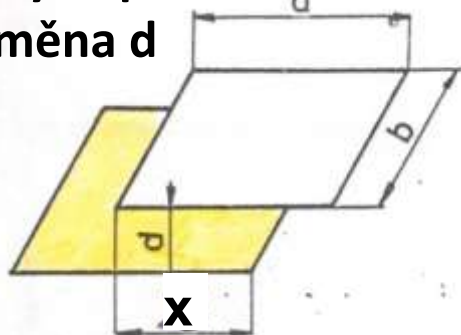
Zkouška

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{bx}{d}$$
$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{ba}{d}$$

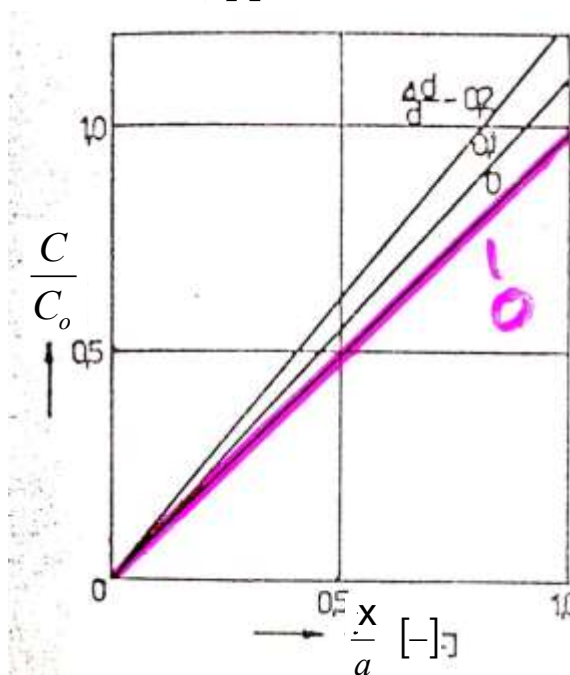
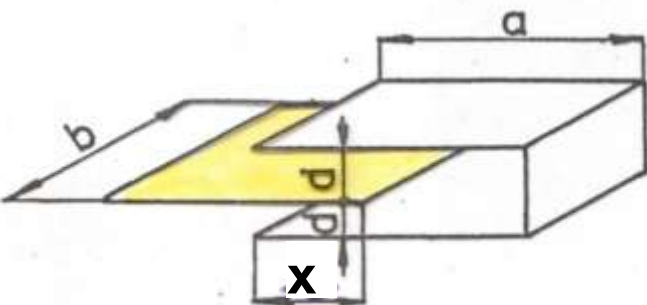
$$C = C_0 \frac{x}{a}$$



Chyba posuvem desek
změna d



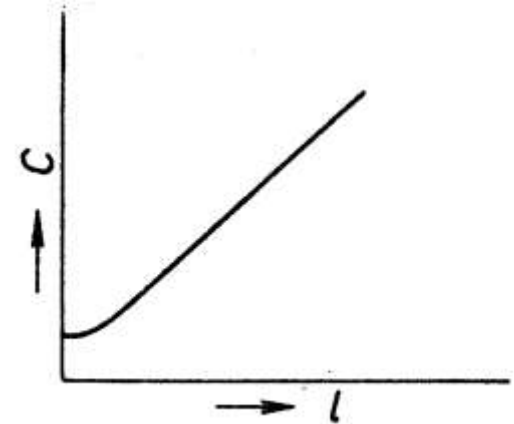
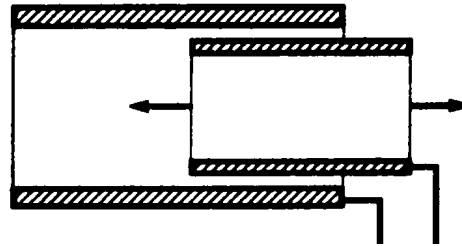
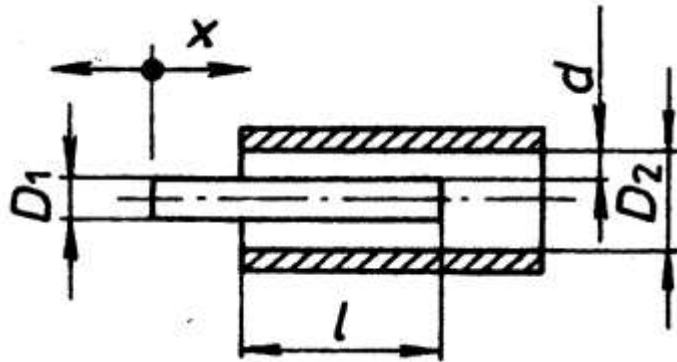
Diferenciální uspořádání



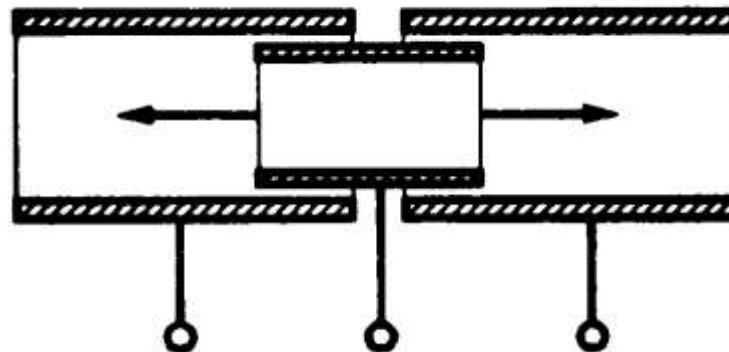
? Nakreslete princip
činnosti a převodní
charakteristiku pro změnu
kapacity vzájemným
posuvem elektrod

Změna kapacity – vzájemné posunutí elektrod

Příklad: válcový kapacitní senzor k měření posunutí



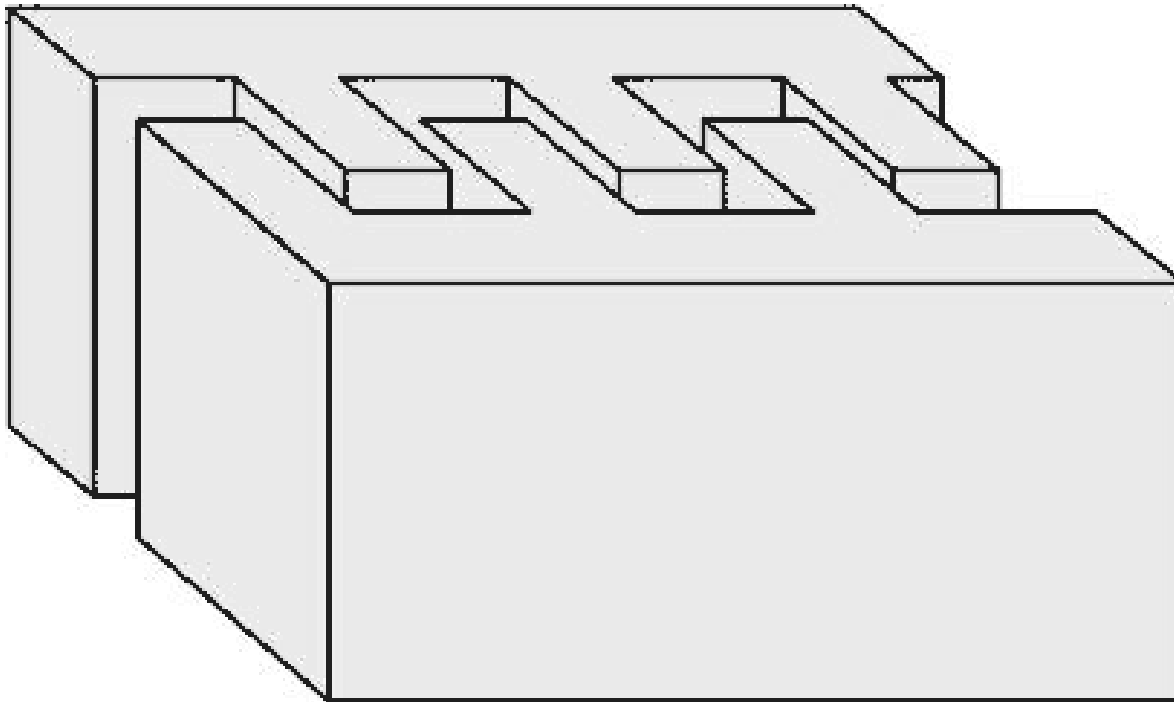
Příklad: válcový kapacitní senzor k měření posunutí, diferenciální uspořádání



Změna kapacity – vzájemné posunutí elektrod

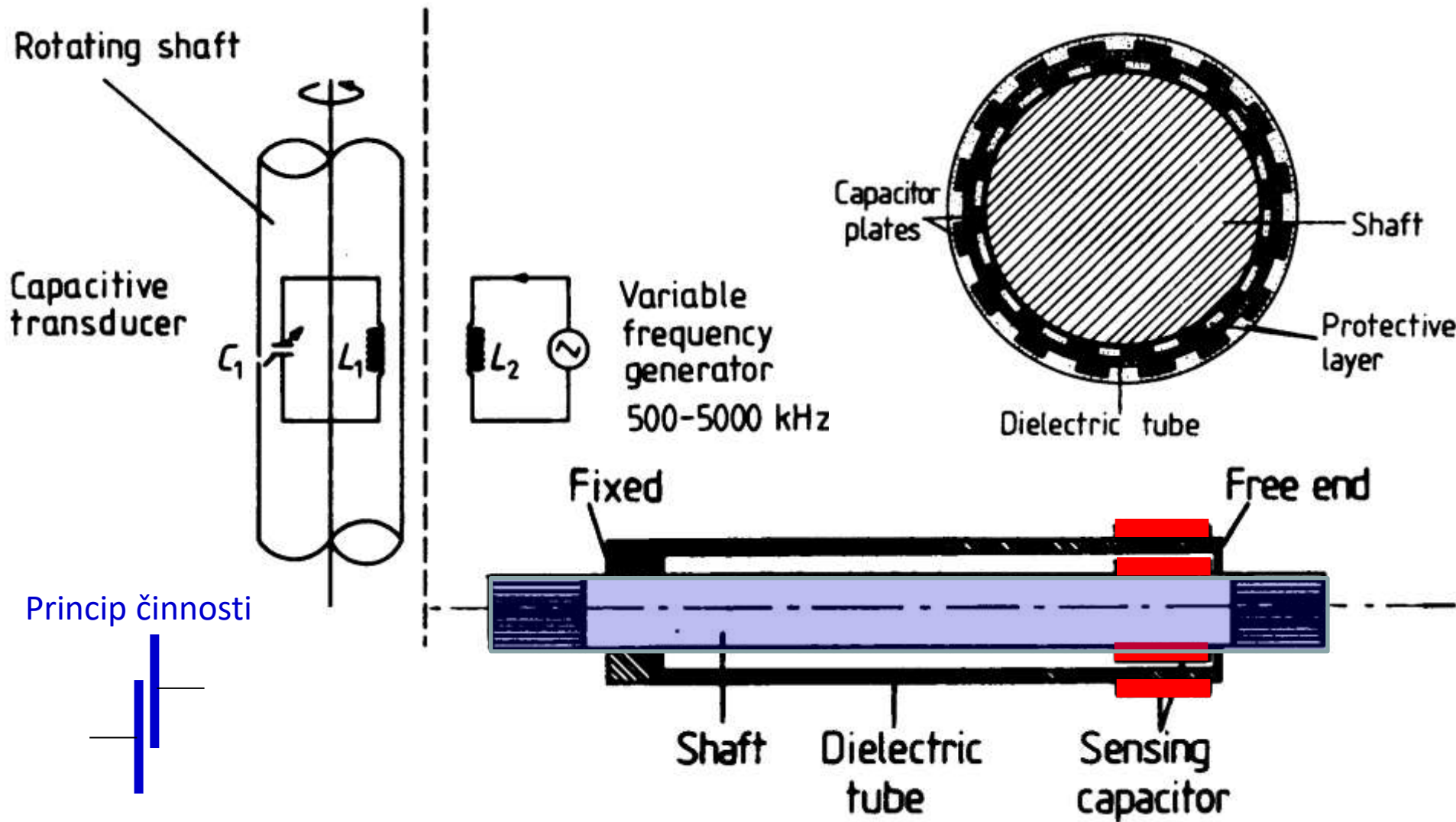
Příklad:

Interdigitální kapacitní struktura (lze jako akční člen, Coulomb. síly)

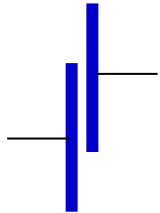


Změna kapacity – vzájemné posunutí elektrod

Příklad: Princip měření torze hřídele



Princip činnosti



Změna kapacity – změna objemu dielektrika

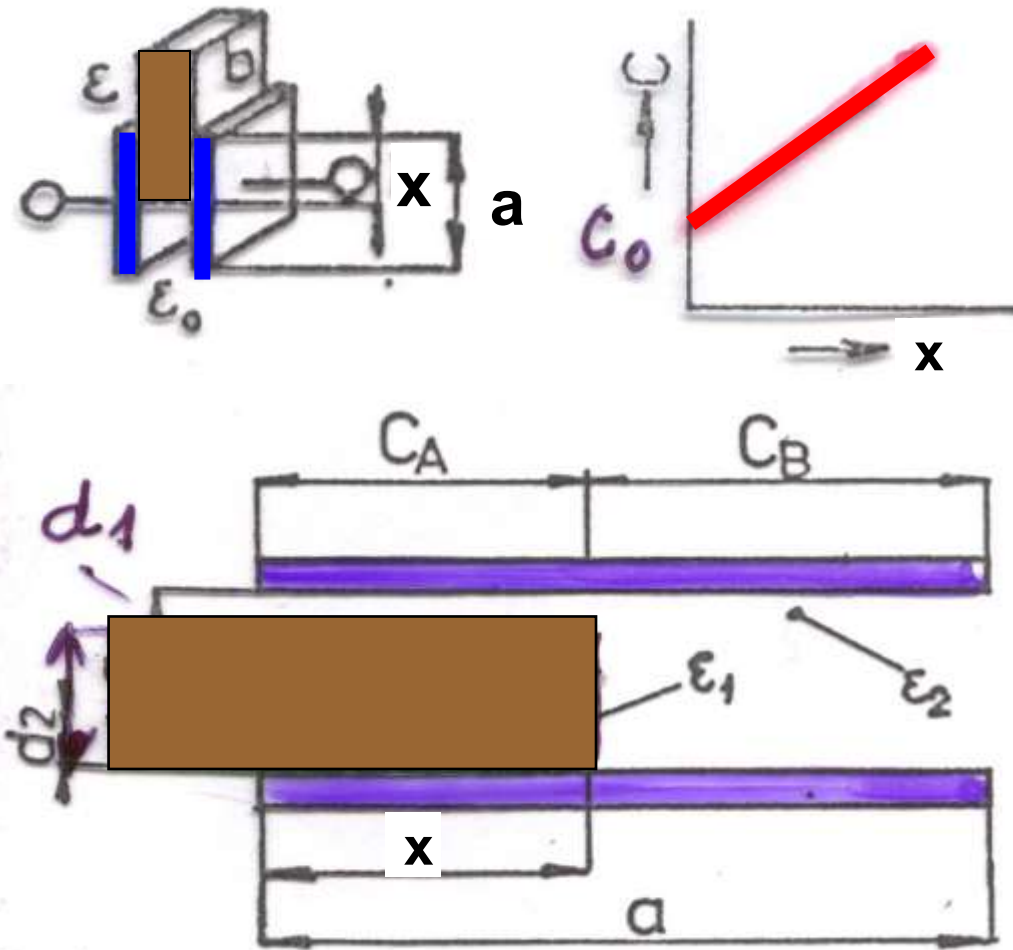
c) Změna objemu dielektrika

Zkouška

$$C = C_A + C_B$$

$$\frac{1}{C_A} = \frac{1}{\epsilon_1 \frac{bx}{d_2}} + \frac{1}{\epsilon_2 \frac{bx}{d_1}}$$

$$C_B = \epsilon_2 \frac{b(a-x)}{d_1 + d_2}$$

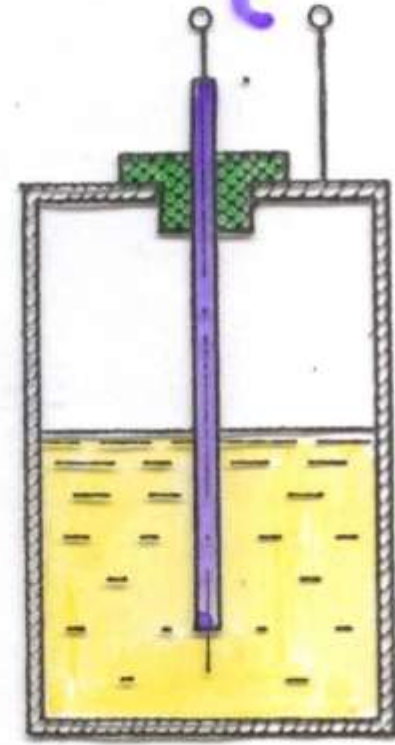
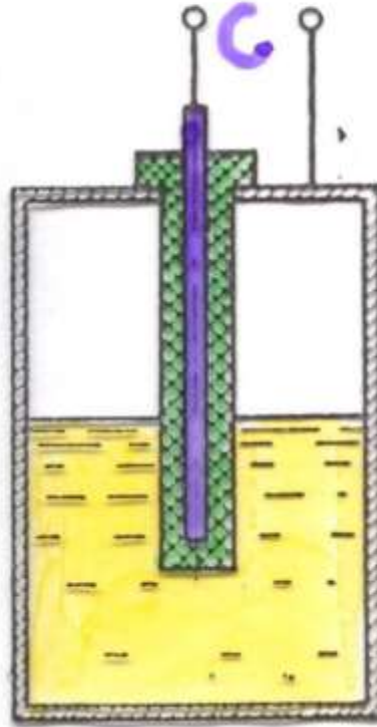
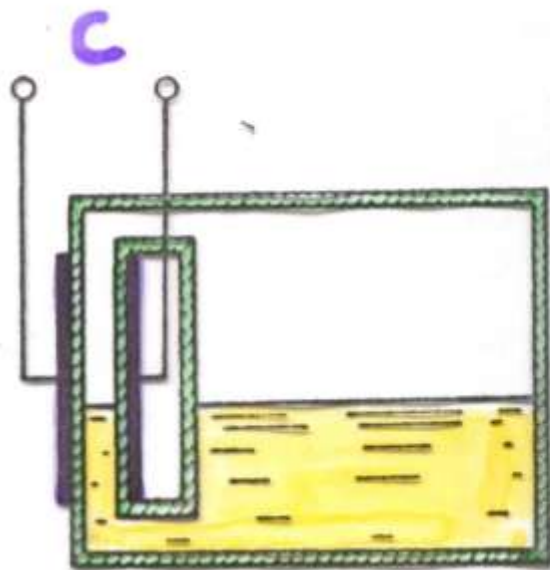
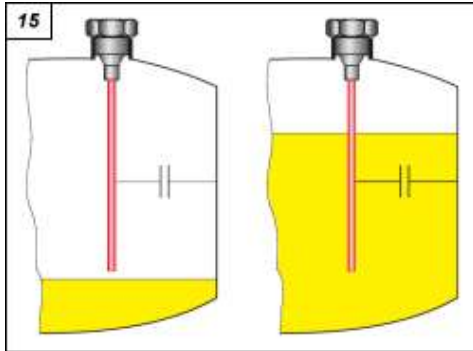


? Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity zasouváním dielektrika



Změna kapacity – změna objemu dielektrika

Příklad: Měření výšky obilí, kapaliny, atd. v zásobníku (změna výšky dielektrika)



vodiva' l.

nevodiva' l.

Změna kapacity – změna objemu dielektrika

Příklad: Kapacitní limitní senzor výšky

Kompenzovatelná počáteční kapacita měřicí sondy

0 až 400 pF

Maximální vybavovací citlivost pro I., II. a III. rozsah měřicí sondy

I. rozsah: cca 1,5 pF

II. rozsah: cca 5 pF

III. rozsah: cca 30 pF

Zvýšená citlivost

Délky elektrod

- tyčové neizolované
- tyčové izolované
- závěsné neizolované
- závěsné izolované

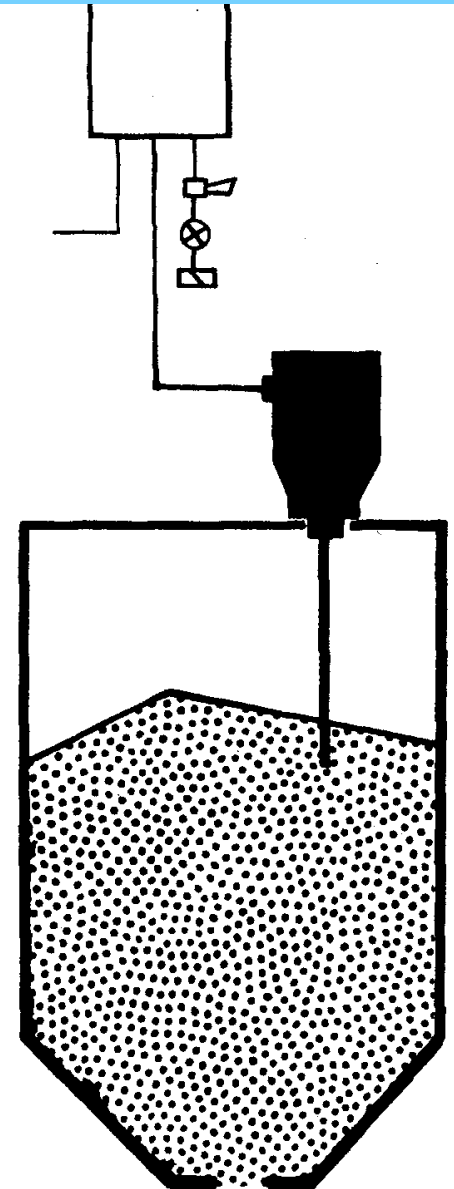
cca 0,5 pF (na I. rozsahu)

0,03 až 3m

0,5 až 2 m

0,5 až 40 m

0,5 až 40 m



Změna kapacity – změna objemu dielektrika

Kapacitní limitní senzor výšky hladiny

Limitní kapacitní měřič výšky hladiny je určen jako limitní spínač pro signalizaci nebo regulaci jedné úrovně výšky hladiny (např. minimální nebo maximální) elektricky vodivých i nevodivých zrnitých, sypkých a kapalných látek v různých typech zásobníků, bunkrů, sil, nádrží, tanků, cisteren, na volných skládkách, dopravních pasech apod.

Měřič pracuje na kapacitním principu a lze jej použít pro limitní měření výšky hladiny různých látek v celé řadě oborů jako je hornictví, těžba rud, těžba a zpracování kamene, uranový průmysl, hutnictví, slévárenství, výroba cementu a cementářských výrobků, keramický průmysl, sklářský průmysl, výroba stavebních hmot, stavebnictví (panelárny, betonárky), výstavba silnic a dálnic, strojírenství, lodní průmysl (klasická a technická plavidla), energetika (tepelné a vodní elektrárny), výroba a rozvod tepla (teplárny, vytopny, spalovny), chemie, petrochemie, gumárenský průmysl, plastikářský průmysl, zpracování dřeva, papírny, potravinářství (mlékárny, pivovary, sladovny, cukrovary, mlýny a pekárny, pečivárny, čokoládovny, lihovary, draždárny, škrobárny, výroba tuků, vinařské závody, konzervárny, mrazírny), farmaceutický průmysl, vodní hospodářství (úpravny vody, vodárny, čistící stanice, zdymadla, přehrady), zemědělství (obilní síla, krmivárny) apod.

Z látek, které lze měřit, jsou to např. uhlí, rudy, kámen (drcené frakce), rudné aglomeráty, koks, slévárenské písky, cement, slínek, drcený vápenec, vápno, struska, popílek, škvára, nafta, petrolej, olej, živice (asfalt), plyny v kapalně fázi, barvy, laky, kaučuky, dřevný prach, papírenská surovina, voda, mléko, sušené mléko, smetana, mouka, cukr, těstoviny, luštěniny, slad, pivo, víno, mošty, torula (droždí), obilí, kukuřice, brambory, řepa, krmné směsi a další.



Změna kapacity – změna vlastností dielektrika

d) Změna vlastností dielektrika (změna ϵ_r)

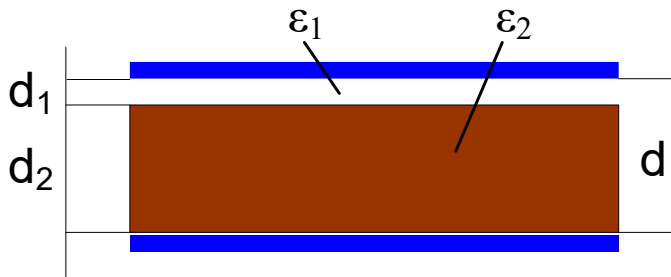
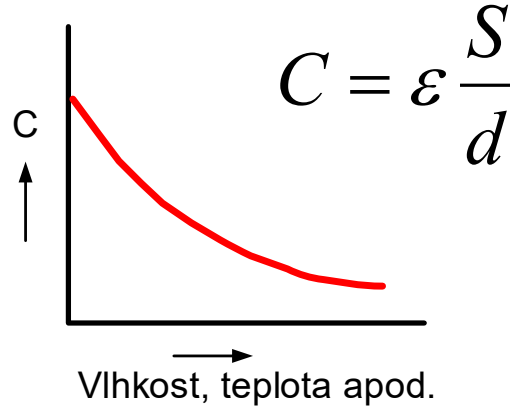
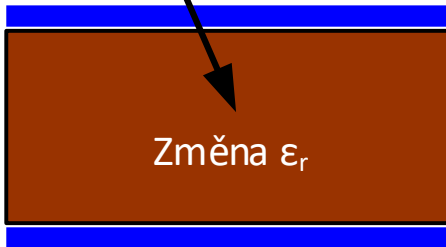
Změna ϵ_r (vlhkost, teplota, mechanická deformace apod.)

Zkouška

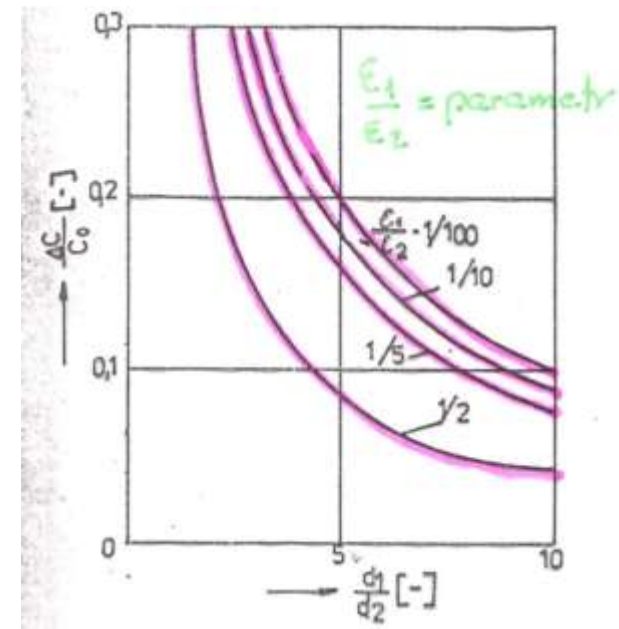
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{\epsilon_2 \frac{S}{d_2}} + \frac{1}{\epsilon_1 \frac{S}{d_1}}$$

Vlhkost, teplota,
mechanické vlivy apod.



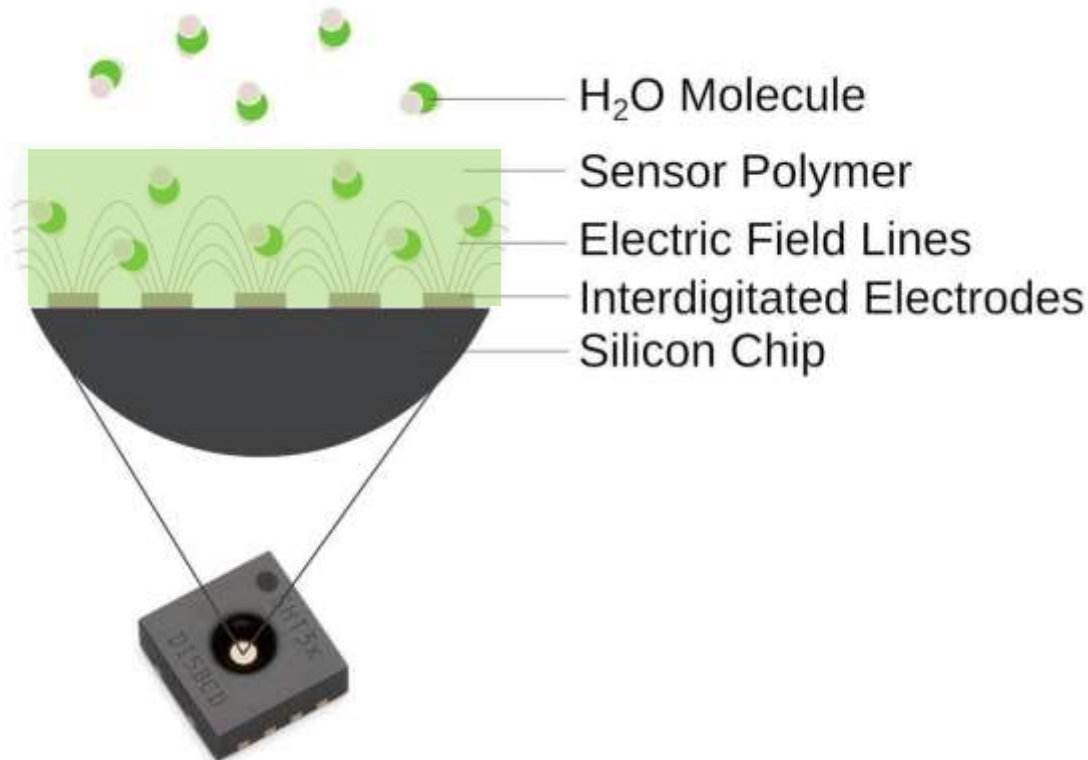
? Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity změnou vlastností dielektrika



Změna kapacity – změna vlastností dielektrika

Příklad: Senzor relativní vlhkosti SHT3x

Princip je založený na měření kapacity mezi elektrodami umístěnými v porézní polymerní membráně. Vodní páry pronikají do membrány a mění kapacitu mezi elektrodami.



RH Range: 0 % to 100 %

RH Accuracy: +/- 2 %

Mounting Style: SMD/SMT

Output Type: Digital

Interface Type: I2C

Resolution: 16 bit

Full Temp Accuracy: +/- 0.3 C

Operating Supply Current: 800 uA

Supply Voltage - Min: 2.4 V

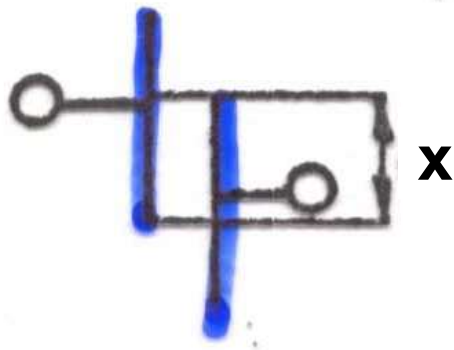
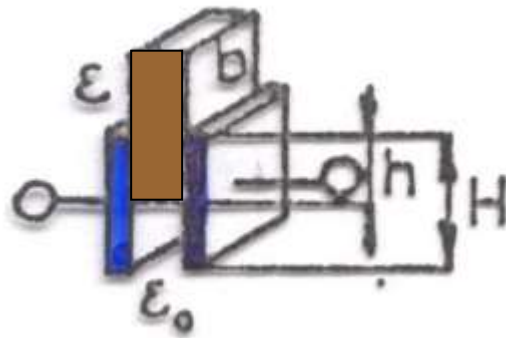
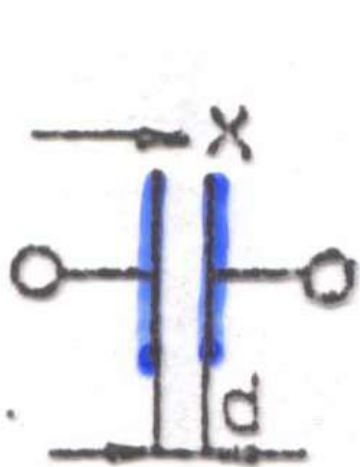
Supply Voltage - Max: 5.5 V

Minimum Operating Temperature: - 40 C

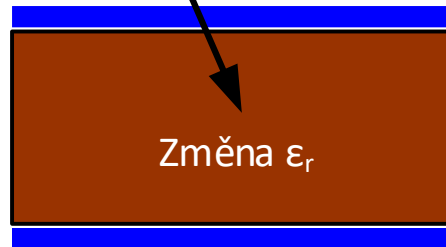
Maximum Operating Temperature: + 125 C



Změna kapacity – shrnutí mechanismů změn



Vlhkost, teplota,
mechanické vlivy apod.



Elektronické vyhodnocovací obvody pro kapacitní senzory

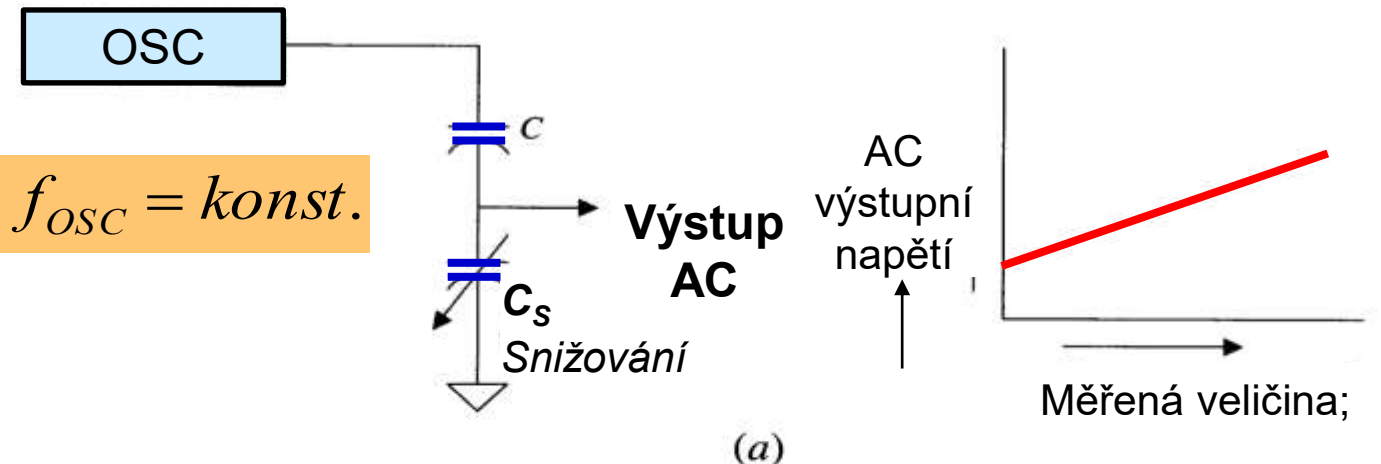
Typicky se používá:

- a) napěťový kapacitní dělič
- b) zesilovač se zpětnovazební měřicí kapacitou
- c) kapacitní můstek
- d) oscilátorové obvody



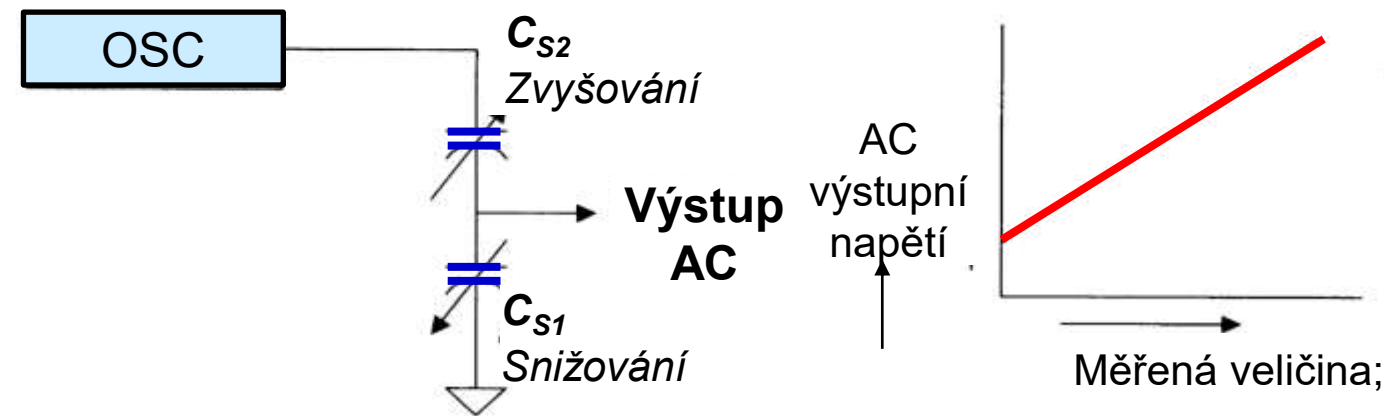
a) Napět'ový kapacitní dělič

a) střídavý výstup



$$u_{výst} = fce(C_s)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$



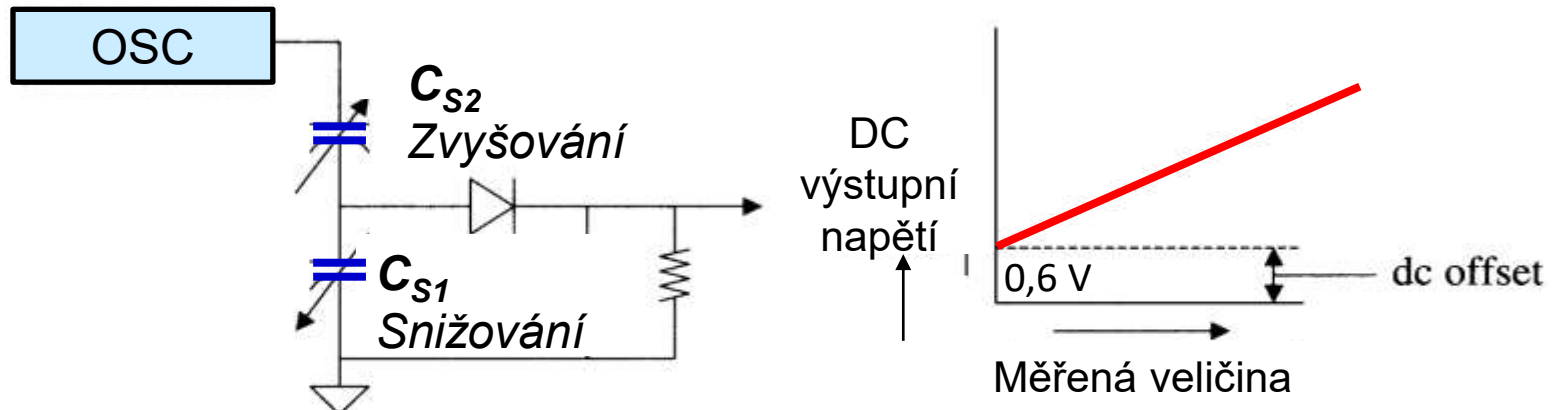
Poznámky:

- Frekvence oscilátoru je konstantní, mění se C_s
- Výstupní střídavé napětí lze převést na stejnosměrné

? Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s napět'ovým kapacitním děličem a střídavým a stejnosměrným výstupním signálem

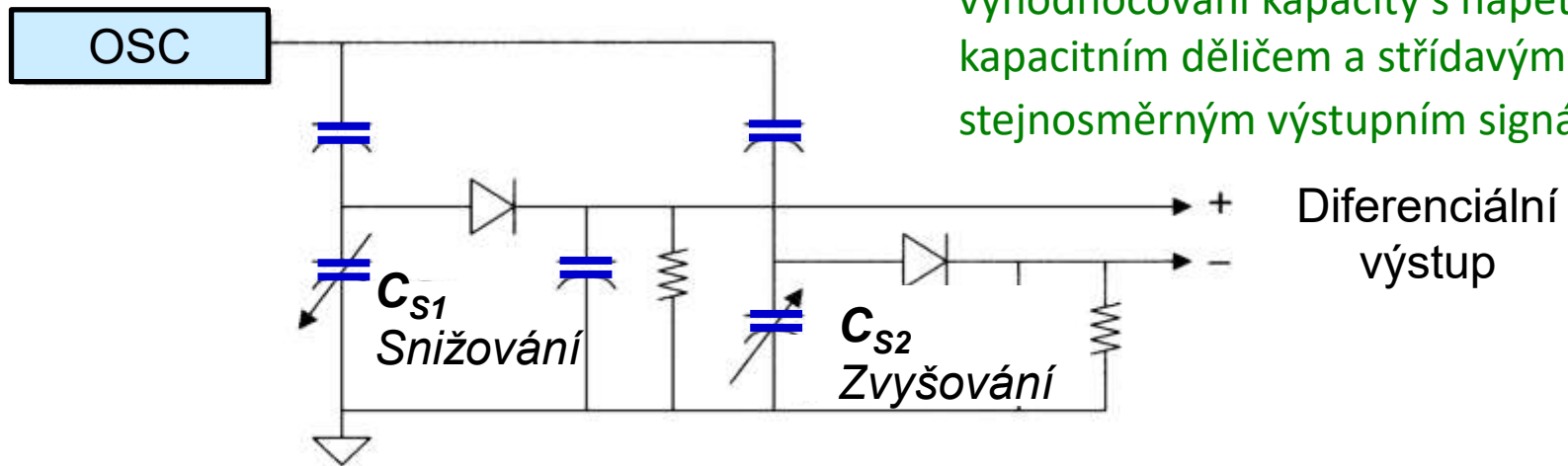
a) Napět'ový kapacitní dělič

a) střídavý výstup s usměrňovačem



(a)

? Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s napět'ovým kapacitním děličem a střídavým a stejnosměrným výstupním signálem



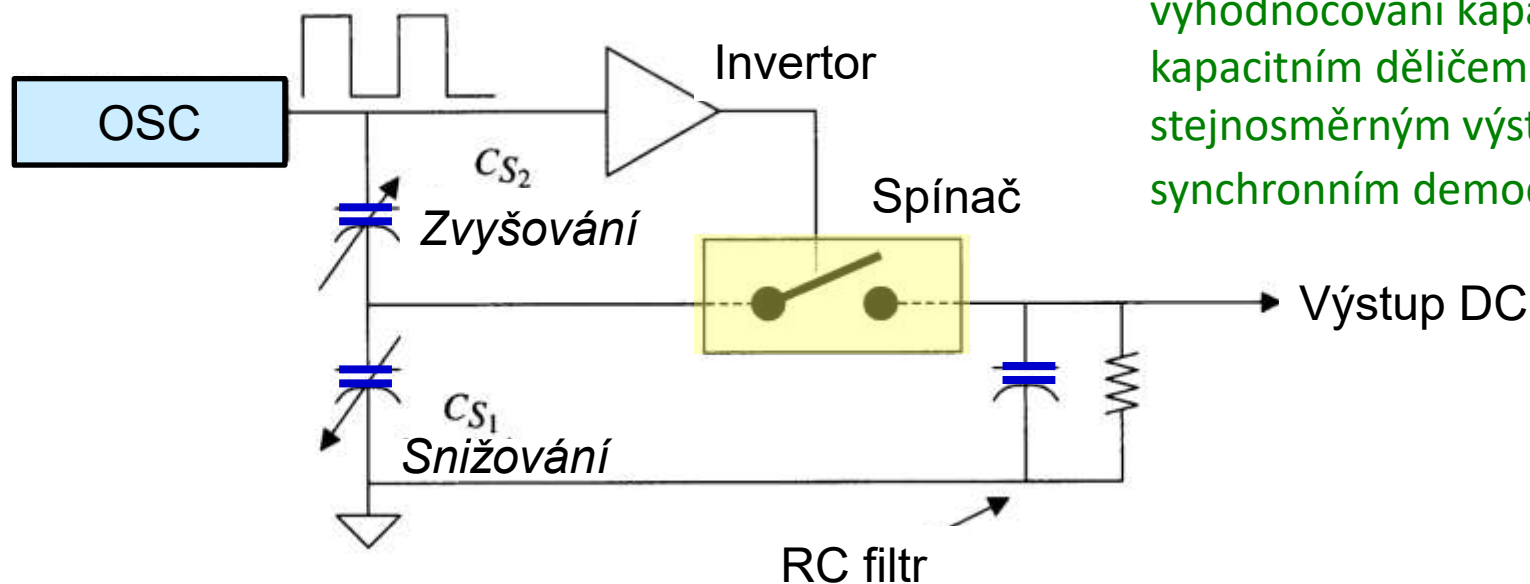
(b)



a) Napěťový kapacitní dělič

a) střídavý výstup + synchronní demodulátor

? Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s napěťovým kapacitním děličem a střídavým a stejnosměrným výstupním signálem, synchronním demodulátorem



Princip činnosti:

Elektronický spínač místo diody, synchronizace spínače s oscilátorem.

Sepnutí – vyšší napětí, filtrační C se nabíjí z děliče

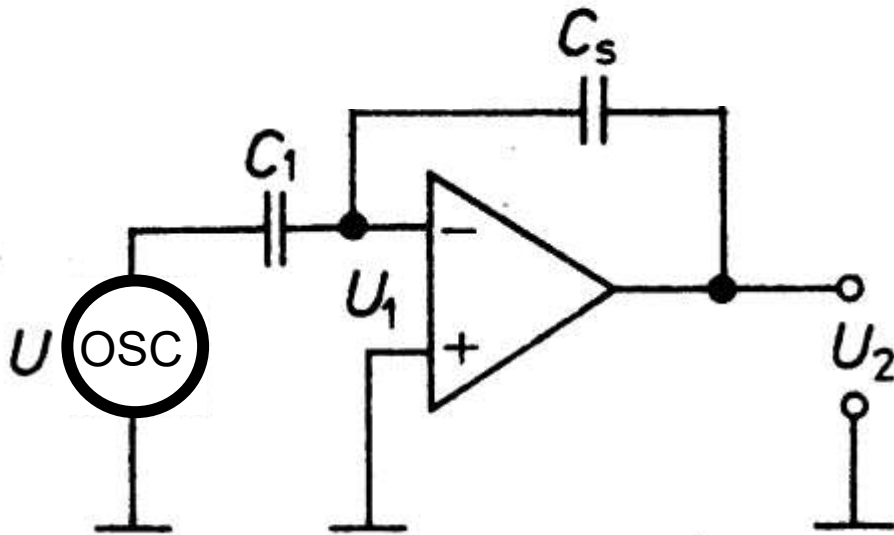
Rozepnutí – nižší napětí

Nabíjení filtrační C bez chyb, které vznikají u klasického usměrňovače

Zesilovač se zpětnou kapacitní vazbou

Zkouška

b) Zesilovač se zpětnou kapacitní vazbou



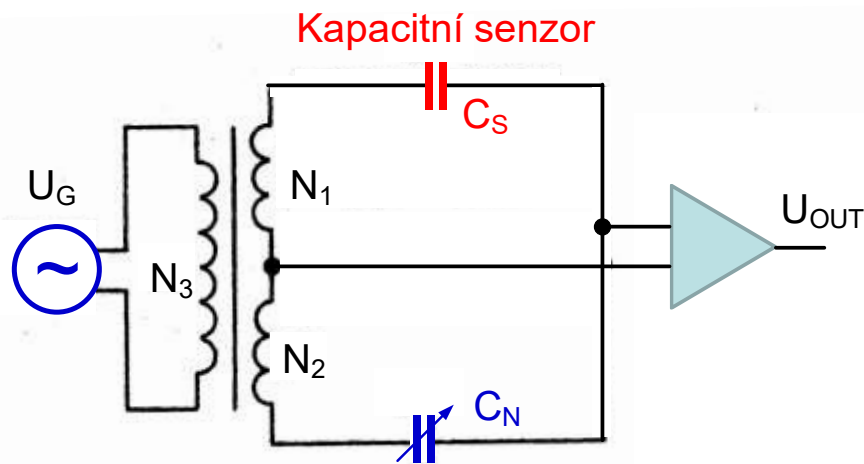
$$U_2 = -\frac{X_{C_s}}{X_{C_1}} U = -\frac{1}{\frac{\omega C_s}{1}} U$$

$$U_2 = -\frac{C_1}{C_s} U$$

? Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity se zesilovačem se zpětnou vazbou



c) Kapacitní můstek



$$\frac{1}{2\pi f C_s} = \frac{1}{2\pi f C_N}$$

$$\frac{1}{2\pi f L_{N1}} = \frac{1}{2\pi f L_{N2}}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_N}$$

$$\frac{1}{L_{N1}} = \frac{1}{L_{N2}}$$

Odvození vztahu

$$L \approx N$$

? Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s kapacitním můstkem

$$\frac{X_{C_s}}{X_{N_1}} = \frac{X_{C_N}}{X_{N_2}}$$

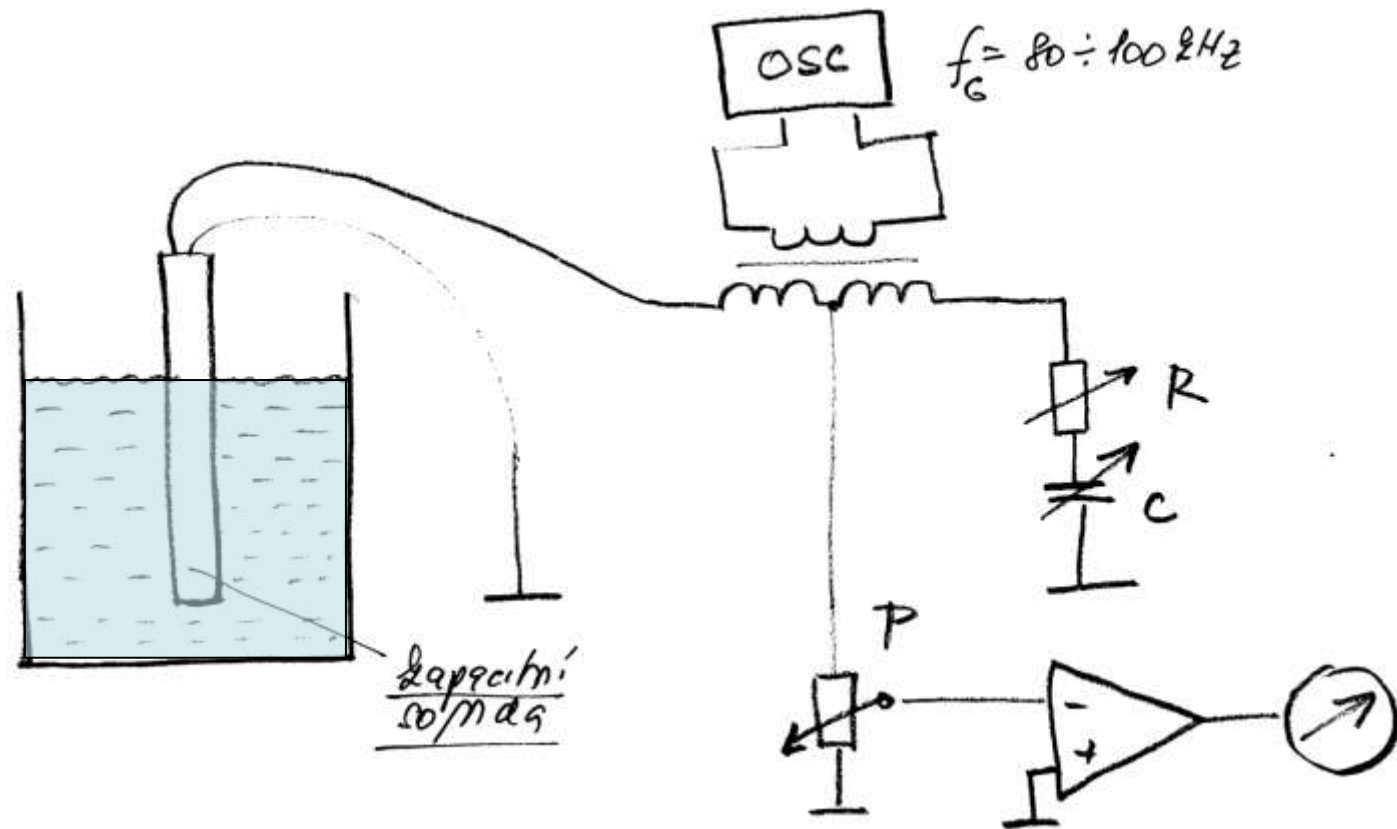


$$\frac{C_s}{C_N} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$f_G \leq f_{rezon}$$

Kapacitní můstek

Příklad zapojení: Kapacitní měření výšky hladiny



P – seřízení údaje na 100% při plném zásobníku

R,C – seřízení údaje na 0% při prázdném zásobníku

d) Oscilátorové obvody

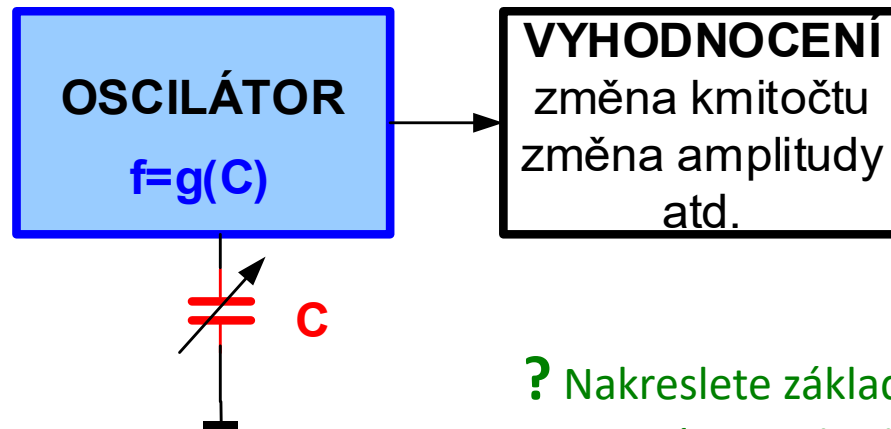
Oscilátory – různé typy (LC, RC, relaxační, multivibrátory, apod.)

El. obvody - analogové i digitální zpracování

Vyhodnocování – změna kmitočtu, amplitudy

$$f = g(C)$$

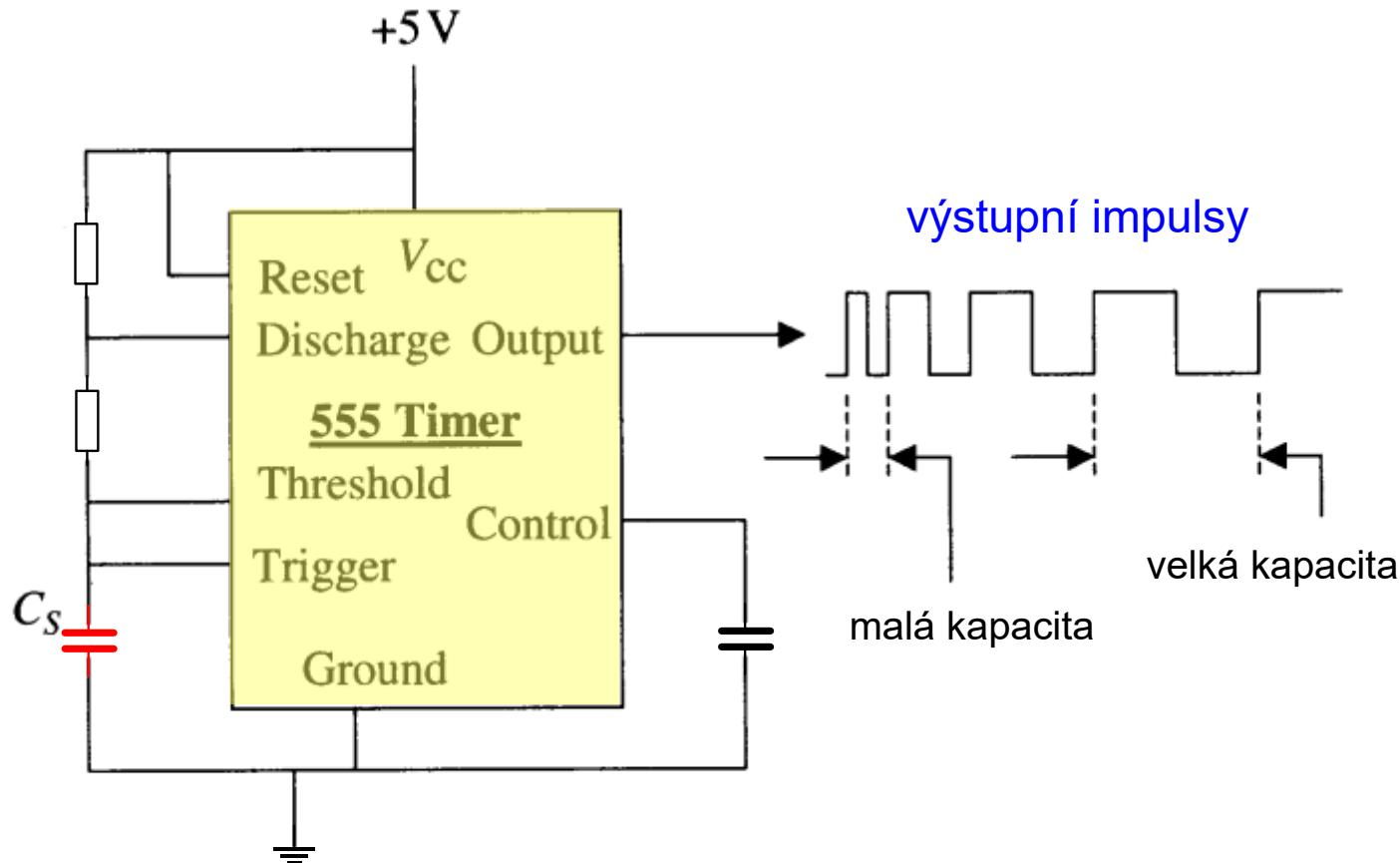
g označuje funkci



? Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s oscilátorem

Oscilátorové obvody

Využití astabilního klopného obvodu (AKO)



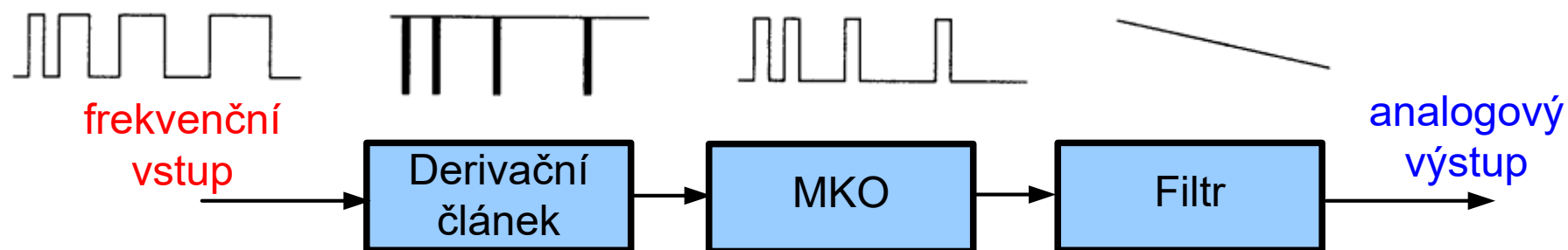
Šířka výstupního signálu (frekvenční signál) je funkcí měřicí kapacity C_s

Výstupní frekvenční signál – výstup jako frekvence nebo analogový signál



Oscilátorové obvody

Zpracování výstupní frekvence – f/U převodník

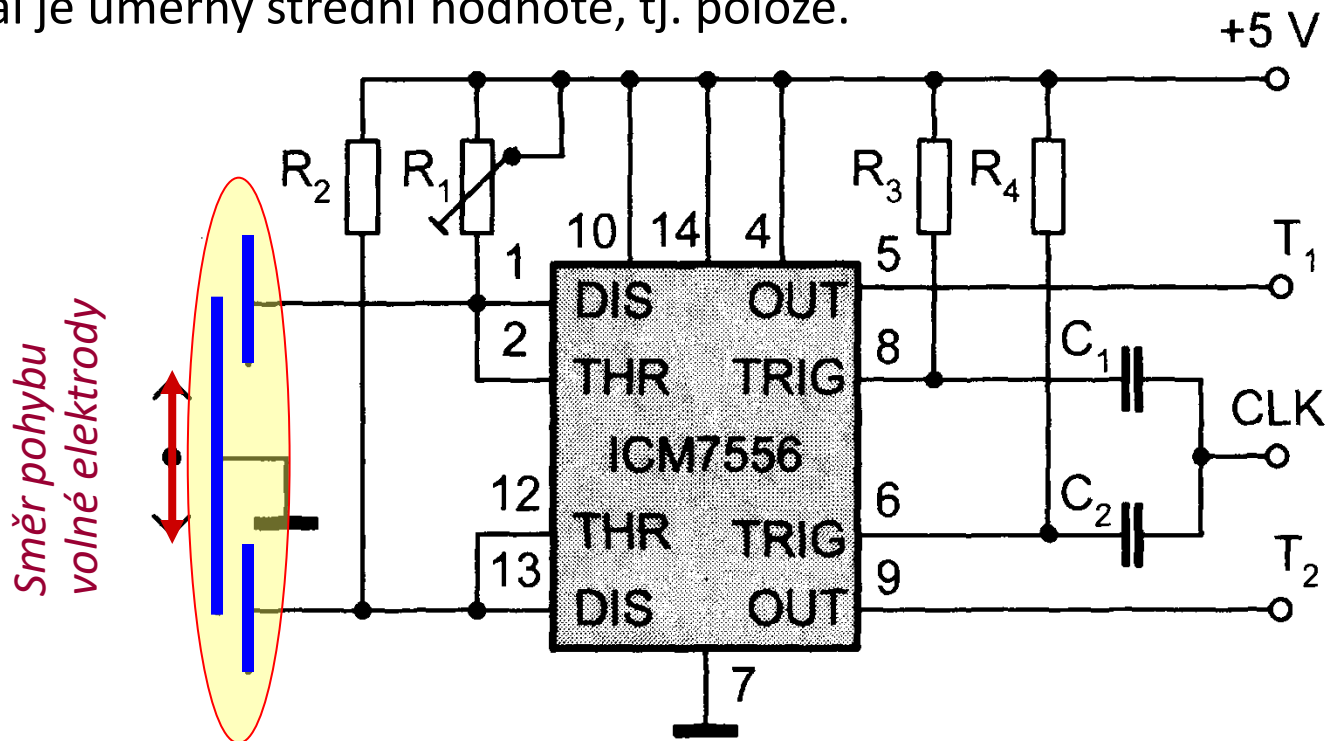


Oscilátorové obvody

Příklad 7: Kapacitní senzor pro měření polohy

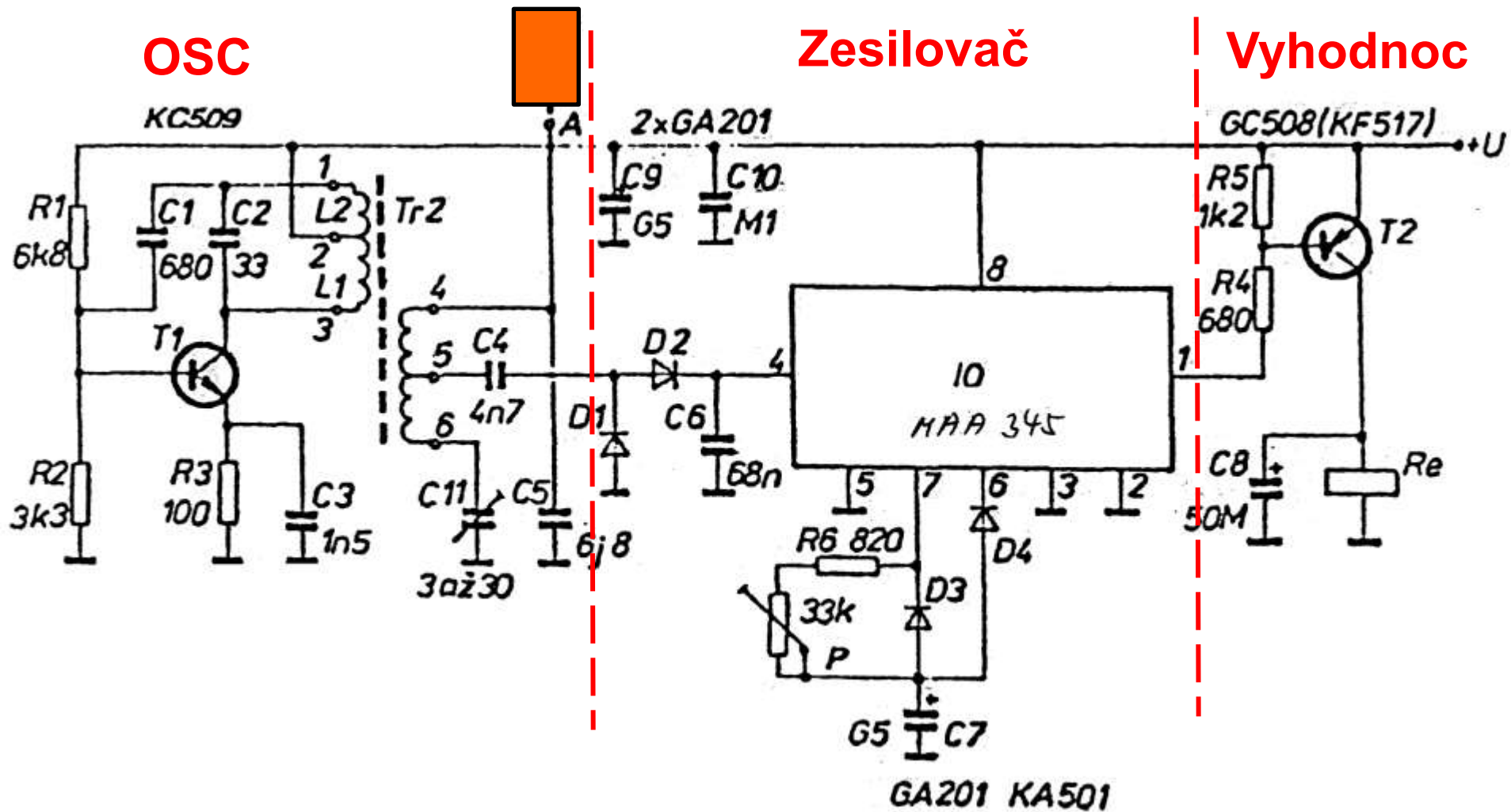
Princip činnosti:

- 2x MKO spouštěné signálem CLK.
- Střídý výstupních signálů jsou opačným způsobem závislé na kapacitě, v dalším obvodu se odečítají a filtrují.
- Signál je úměrný střední hodnotě, tj. poloze.



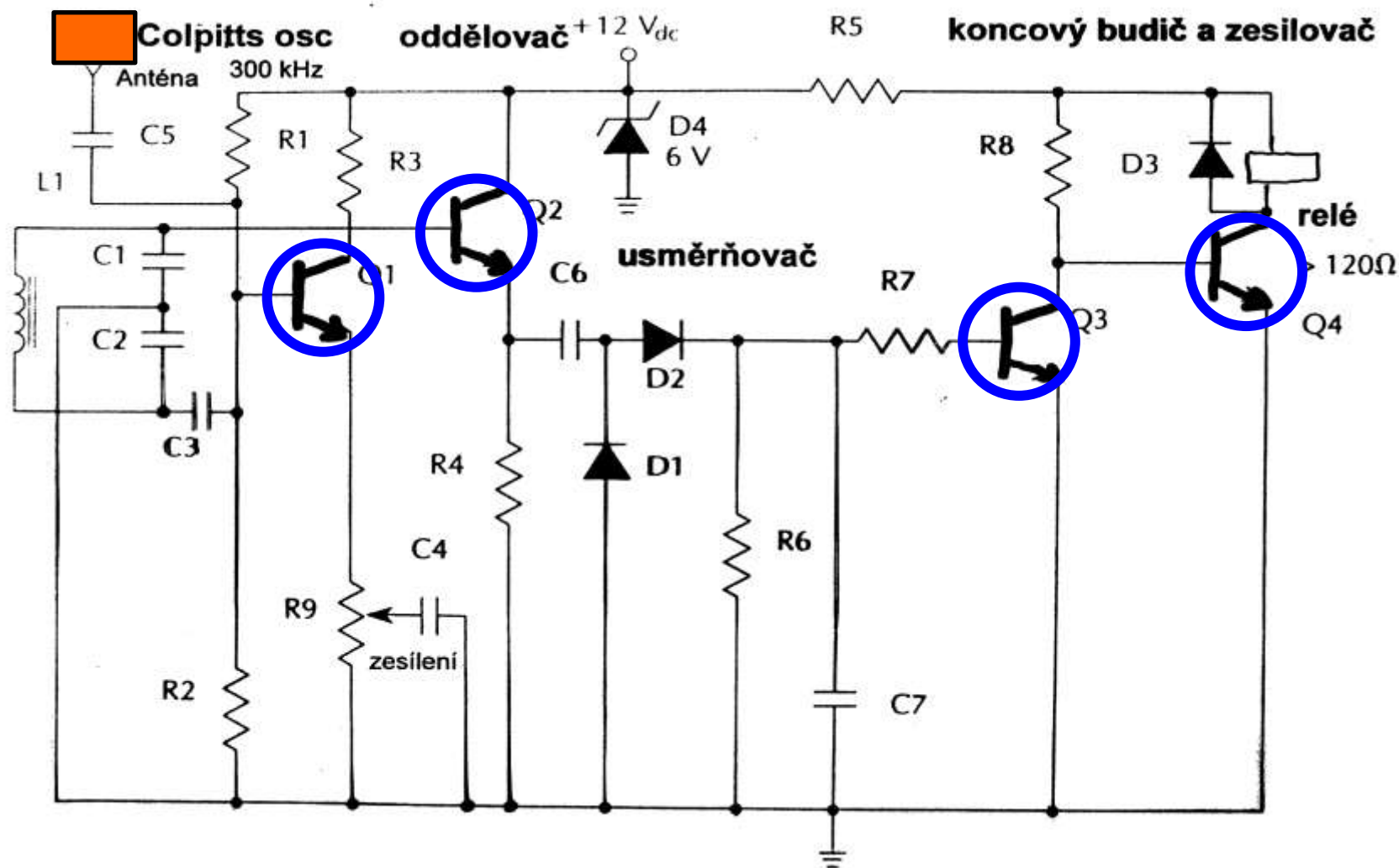
Oscilátorové obvody

Příklad 2: Kapacitní spínač (senzor přiblížení)



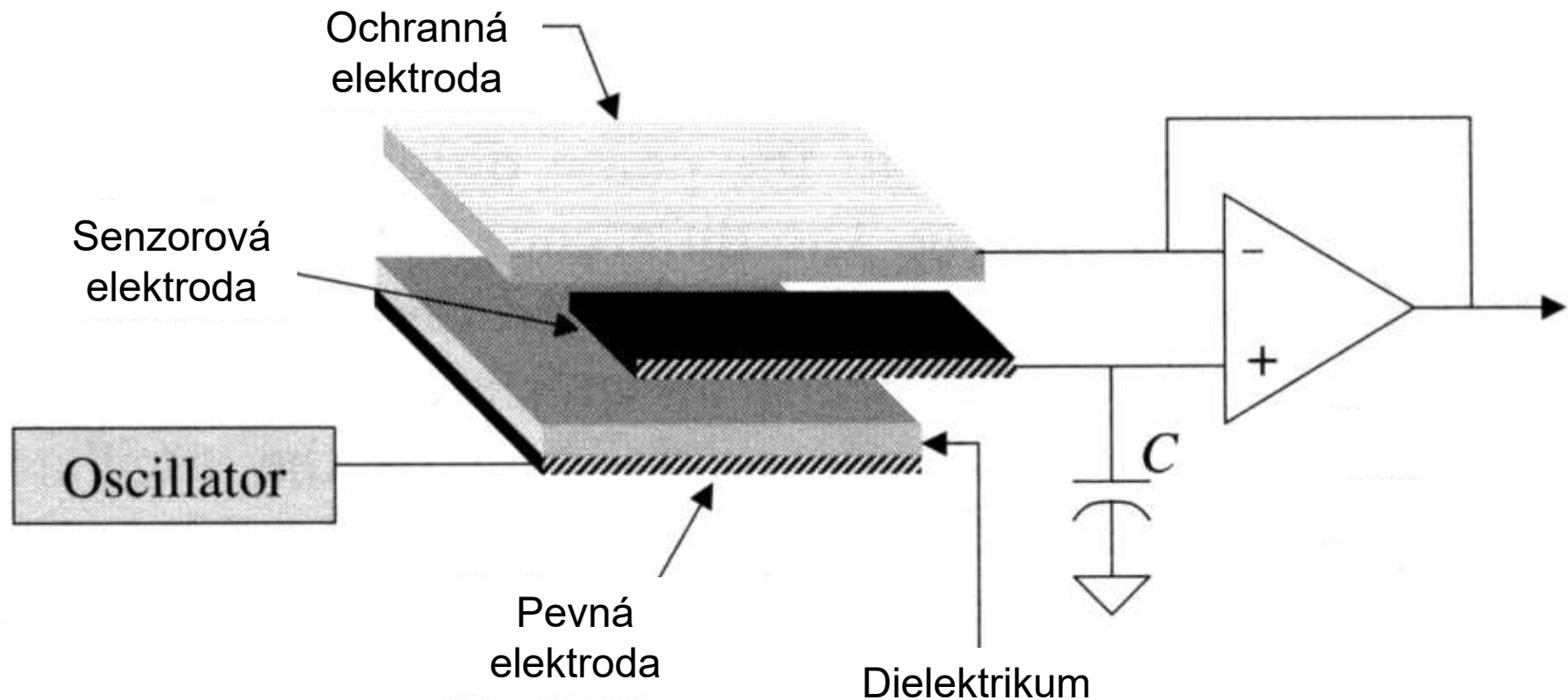
Oscilátorové obvody

Příklad 3: Kapacitní spínač 2 (senzor přiblížení osoba 25 cm)



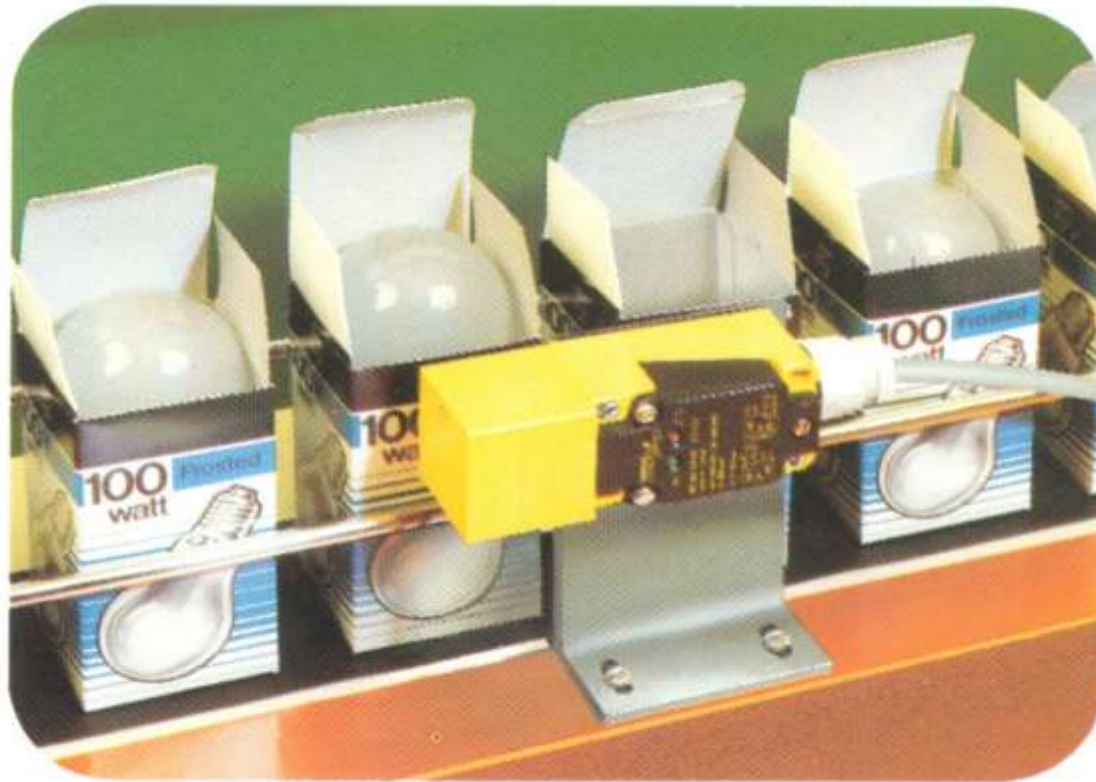
Ochranná elektroda pro nezeměné pohyblivé elektrody

Ochrana proti snímání signálů kapacitními vazbami (vazba z el. obvodů, vazební indukčnosti)



Aplikace kapacitních senzorů v průmyslu

Příklad 7: Kapacitní senzor pro měření přítomnosti předmětu



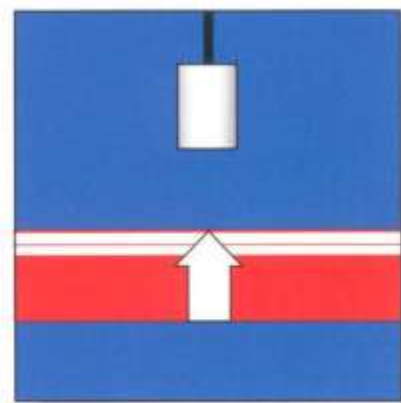
Kapacitní senzory na kontrolu
balíci linky žárovek

Aplikace kapacitních senzorů v průmyslu

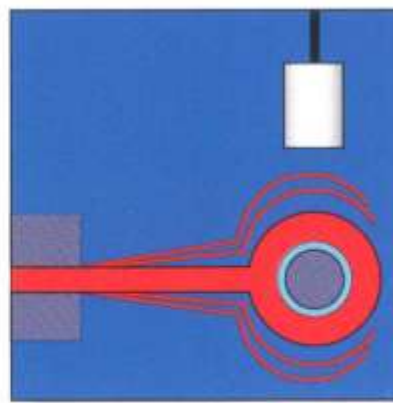
Příklad: Kapacitní senzor pro měření tablet na výrobní lince



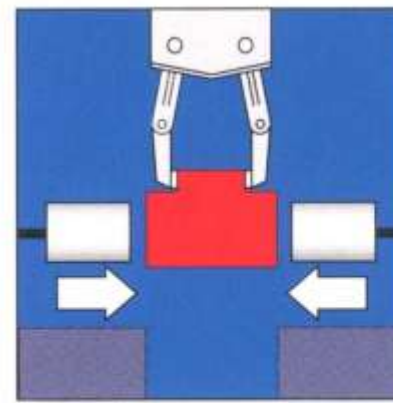
Aplikace kapacitních senzorů v průmyslu



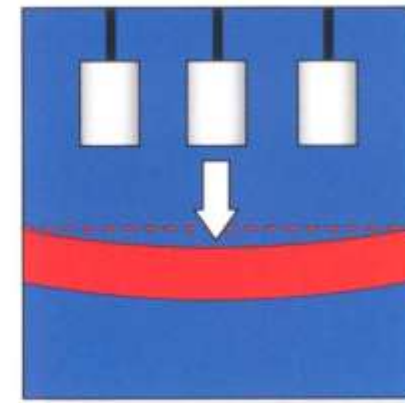
Displacement, distance
position, elongation



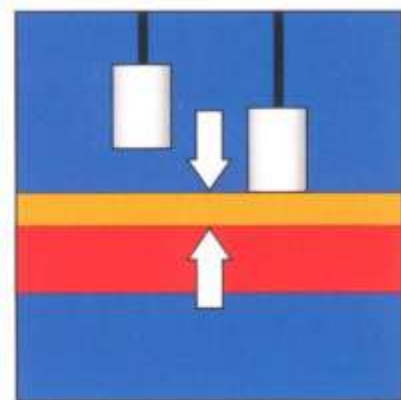
Vibration, amplitude
clearance, oscillations



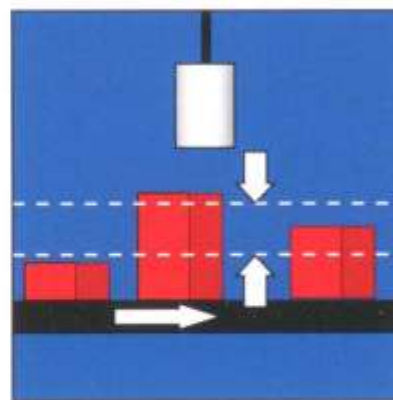
Centering, positioning,
tilt, alignment



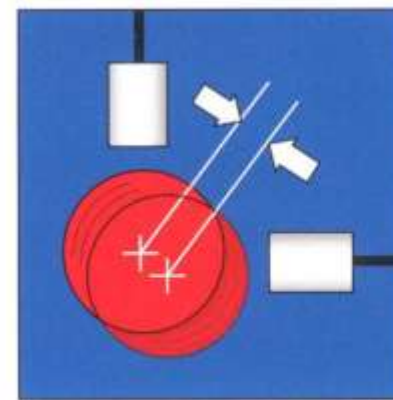
Deflection, deformation,
waviness



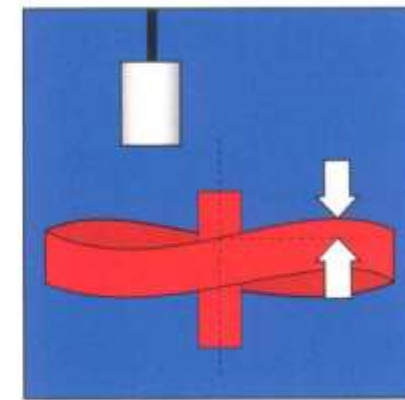
Thickness of layer, foil,
rubber, insulation



Dimensions, tolerances,
sorting, part recognition



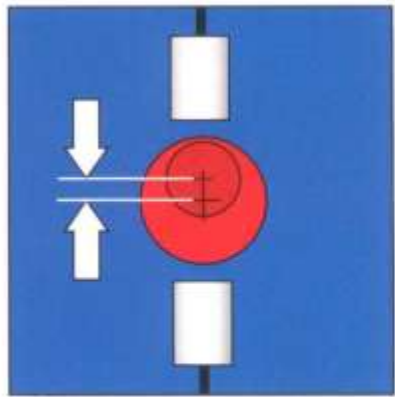
Shaft oscillation, orbit
tracing, shaft displacement



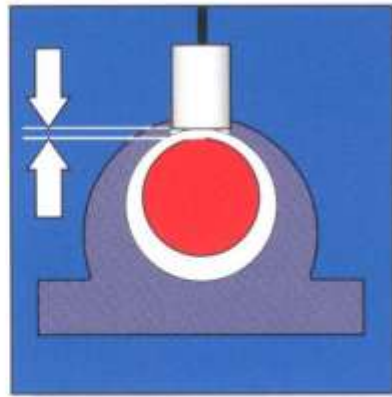
Stroke, deformation, axial
shaft oscillation



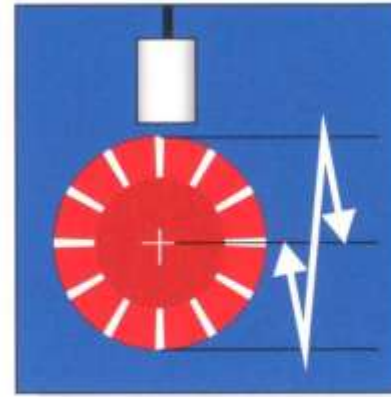
Aplikace kapacitních senzorů v průmyslu



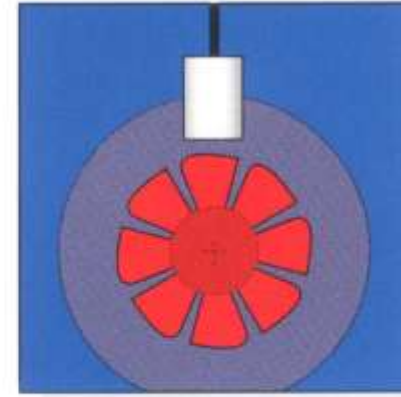
Eccentricity, diameter, concentricity



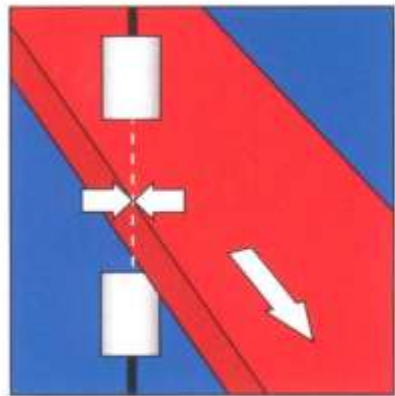
Bearing oscillations, lubricating gap, wear



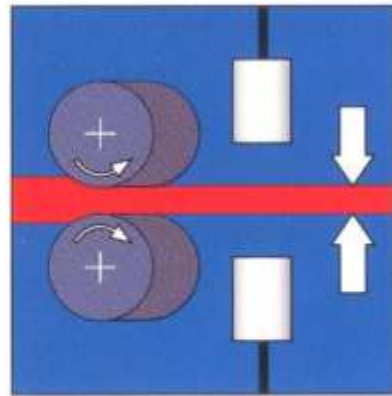
Collector concentricity, roundness, air gap, pitch



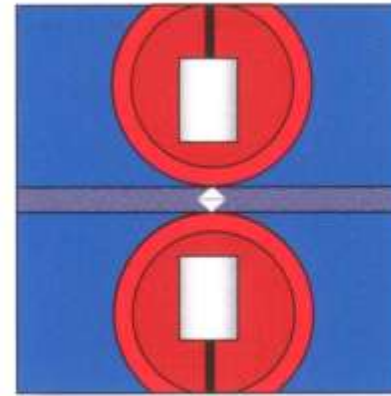
Compressor/turbine gap, revolutions



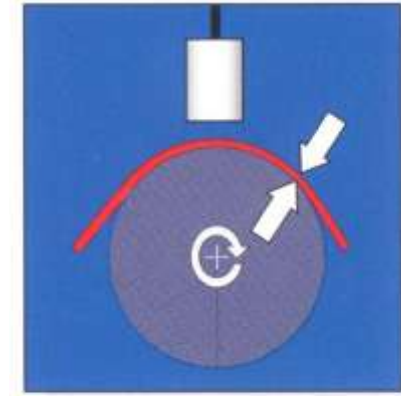
Edge control, position, width



Sheet thickness, profile, tension, deflection



Roller gap, roller deflection, crowning



Thickness of foil, layer, profile

1. Kapacitní senzor: Napište základní rovnici pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru a k ní napište diferenciální rovnici popisující změnu kapacity, Nakreslete náhradní zapojení pro připojení kapacitního senzoru k měřicímu obvodu, K náhradnímu obvodu napište nerovnici pro určení frekvence napájecího signálu
2. Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity změnou vzdálenosti elektrod
3. Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity vzájemným posuvem elektrod
4. Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity zasouváním dielektrika
5. Nakreslete princip činnosti a převodní charakteristiku pro změnu kapacity změnou vlastností dielektrika
6. Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s napěťovým kapacitním děličem a střídavým a stejnosměrným výstupním signálem, synchronním demodulátorem
7. Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity se zesilovačem se zpětnou vazbou
8. Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s kapacitním můstkem
9. Nakreslete základní zapojení pro vyhodnocování kapacity s oscilátorem

