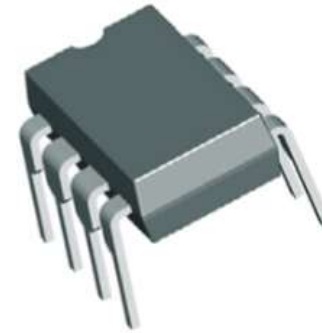
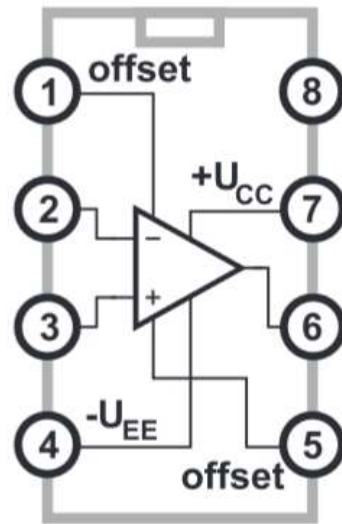
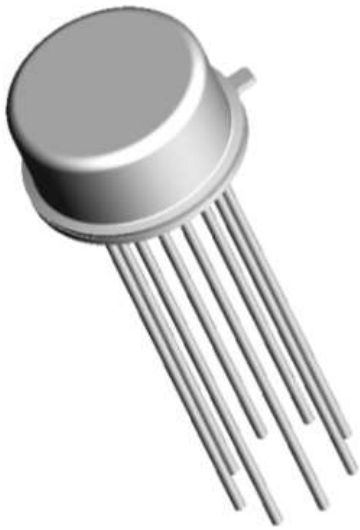


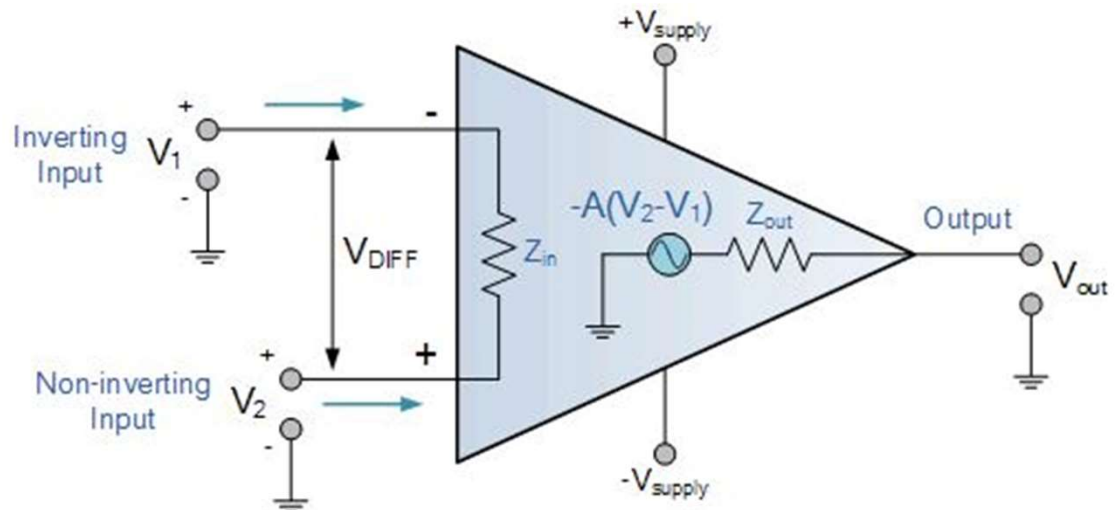
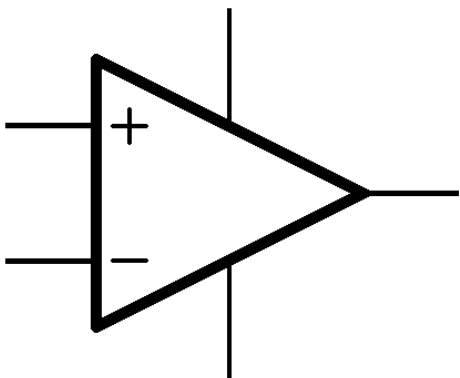
Operační zesilovače

- operační zesilovače – úpravy měřeného analogového signálu před jeho zpracováním, např. digitalizací

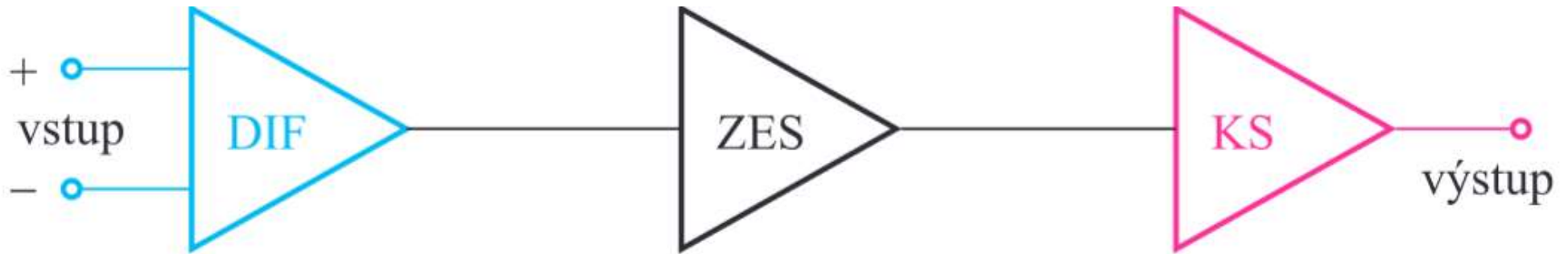


Operační zesilovač

- (OZ, resp. OA op. amplifier) je univerzální stejnosměrný zesilovací analogový elektronický obvod, jenž je základním prvkem analogových elektronických systémů
- zaveden v 60. letech min. století jako integrovaný obvod z bipolárních tranzistorů, klasikou je Fairchild μ A741 (dodnes vyráběn)
- následně v 70. letech doplněn unipolárními a od 80. let MOSFET verzemi – zlepšení parametrů
- typicky funguje jako **diferenční napět'ový zesilovač** s vysokým ziskem, se stejnosměrnou vnitřní vazbou, diferenčními vstupy (**invertujícím** označovaným – a **neinvertujícím** označovaným +) a jednoduchým výstupem

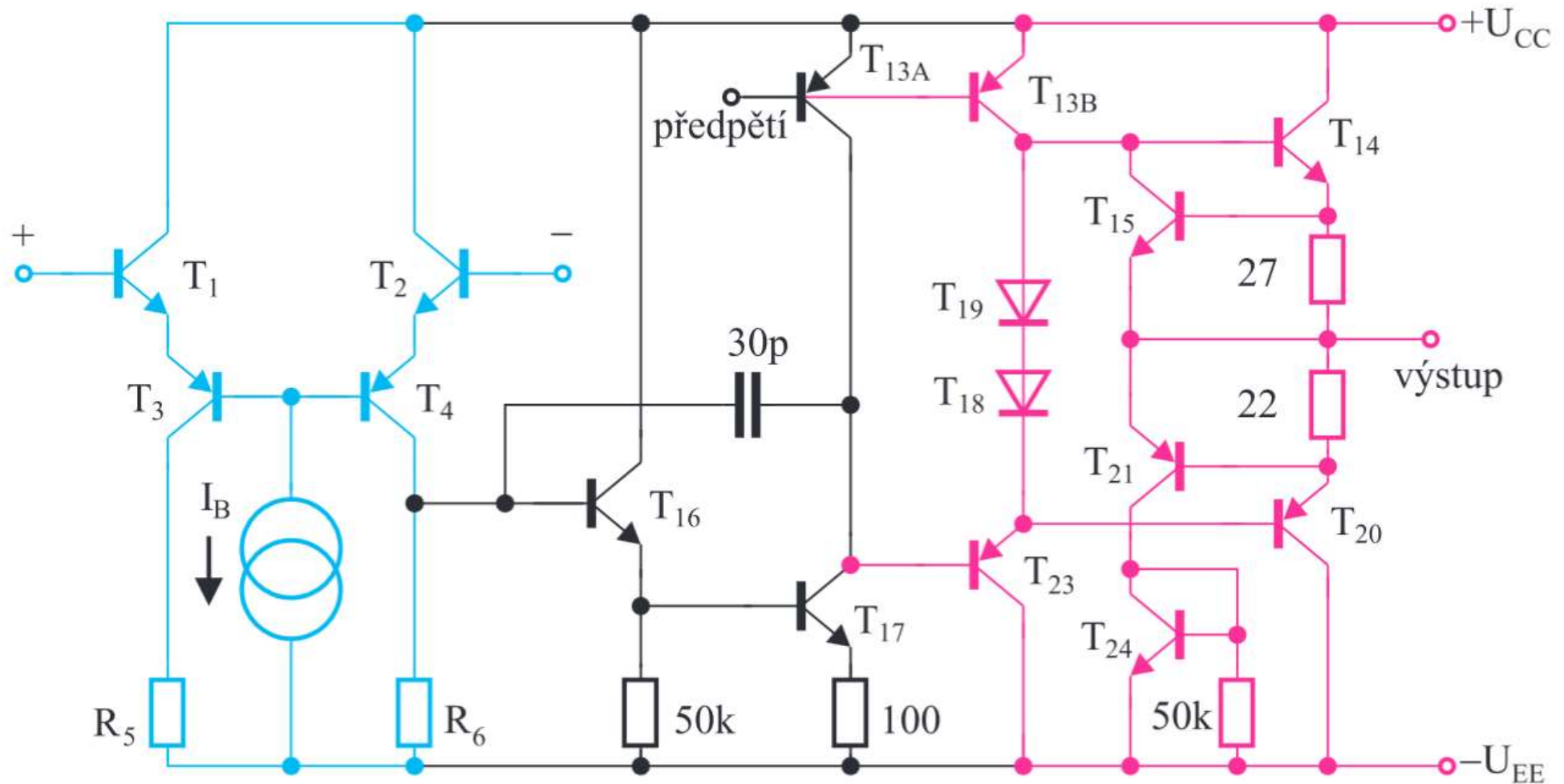


Konstrukce



- na vstupu je diferenční (rozdílový) zesilovač DIF - zajistí zesílení rozdílového vstupního napětí (mezi neinvertujícím a invertujícím vstupem), velký vstupní odpor a co potlačení součtového (soufázového) vstupního napětí
- navazuje mezilehlý zesilovač ZES – realizuje více než polovinu hodnoty zesílení (zisk A) OL celého OZ
- Koncový stupeň zajistí nízký výstupní odpor a ochrana proti proudovému přetížení výstupu (zkrat)

Klasická konstrukce 741



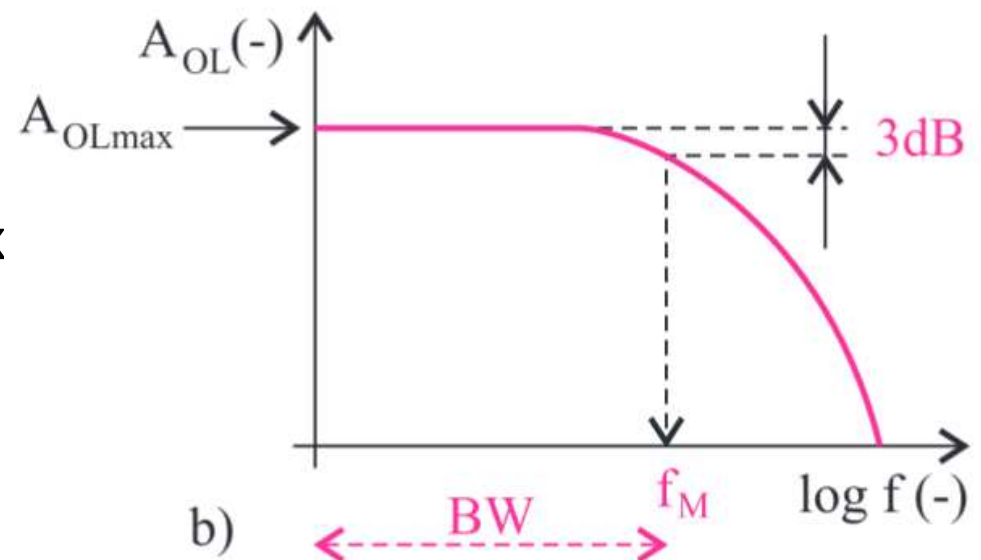
- oblíbenost 741 je dána tím, že má interní (na čipu) kompenzaci frekvenční charakteristiky, velké zesílení $A_{OL} = 2 \cdot 10^5$, dovoluje přiložit na vstupy velké hodnoty napětí (např. ± 15 V na vstupu proti zemi, ± 30 V mezi vstupy) aniž by došlo k jeho poškození a výstup je chráněn proti trvalému zkratu

Vlastnosti OZ

- v ideálním případě mají **vstupy nekonečnou impedanci** a **výstup impedanci nulovou** (impedanci zde berme jako odpor)
- ideální OZ má **nekonečné zesílení**
- rozdíl napětí mezi + a - vstupem se nekonečně zesílí na výstup
- pokud je na neinvertujícím vstupu vyšší napětí, než na invertujícím, na výstupu se objeví maximální možné kladné napětí (tj. napájecí)
- obdobně i opačně - pokud je na invertujícím vstupu vyšší napětí než na vstupu neinvertujícím, výstup se nastaví na nejzápornější možné napětí
- výstupní napětí OZ se může pohybovat jen v rozsahu napájecího napětí (typy OZ rail to rail), většinou ale v rozsahu o něco nižším
- zesílení rozdílového signálu A_d je:
$$A_d = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_d} = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_+ - U_-}$$
- U_{out} je rozdíl mezi výstupním napětím a zemí
- ΔU_d je rozdíl mezi napětím na neinvertujícím a invertujícím vstupu
- U_+ je napětí na neinvertujícím vstupu
- U_- je napětí na invertujícím vstupu ... vše proti zemi

Další (reálné) charakteristiky

- nenulový vstupní proud – cca 10 nA bipolárních a pA unipolární OZ
- nenulový offset napětí – při shodě napětí na vstupech není nulové napětí na výstupu (vykompenzuje se)
- činitelem potlačení souhlasného rušení (CMRR common mode rejection ratio) - přibližně 70-75 dB, u lepších OZ 110 – 140 dB
- konečná šířka pásma – vnitřní zisk OZ se snižuje s rostoucí frekvencí - OZ dokáže zesilovat pouze do určité limitní frekvence
- rychlost přeběhu (SR slew rate) V/s – rychlost změny výstupního napětí není nekonečná - omezena vnitřními kapacitami obvodu; je to reakce výstupu na změnu vstupu
- omezený výstupní výkon – běžné OZ poskytují jen velmi malý výstupní výkon
- omezený výstupní proud – max je kolem 20 mA

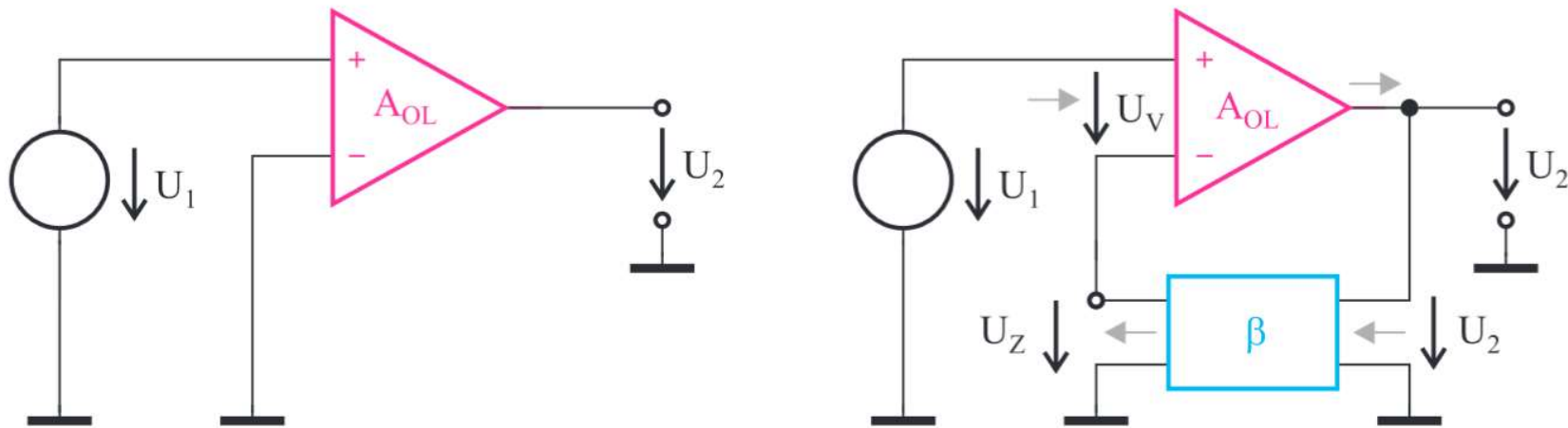


Reálné vlastnosti

Parametr	Ideální OZ	Reálný OZ
A_{OL} (-)	∞	$5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6$
R_{vst} (Ω)	∞	$1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^8$
$R_{výst}$ (Ω)	0	1 – 100
BW (Hz)	∞	$5 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9$
SR (V/ μ s)	∞	0,1 – 5000

■

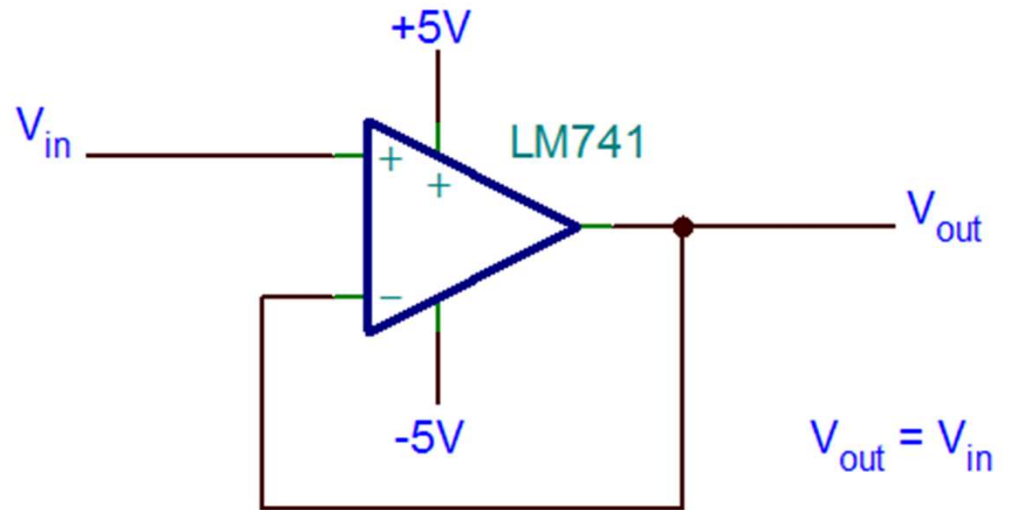
Zpětná vazba



- OZ mají velké zesílení s otevřenou smyčkou zpětné vazby A_{OL}
- proto je u většiny jejich zapojení použita zpětná vazba, která vede ke zlepšení pracovních parametrů
- zpětnou vazbou (feedback loop) se označuje cesta, kterou se přenáší část výstupního napětí zpět na vstup

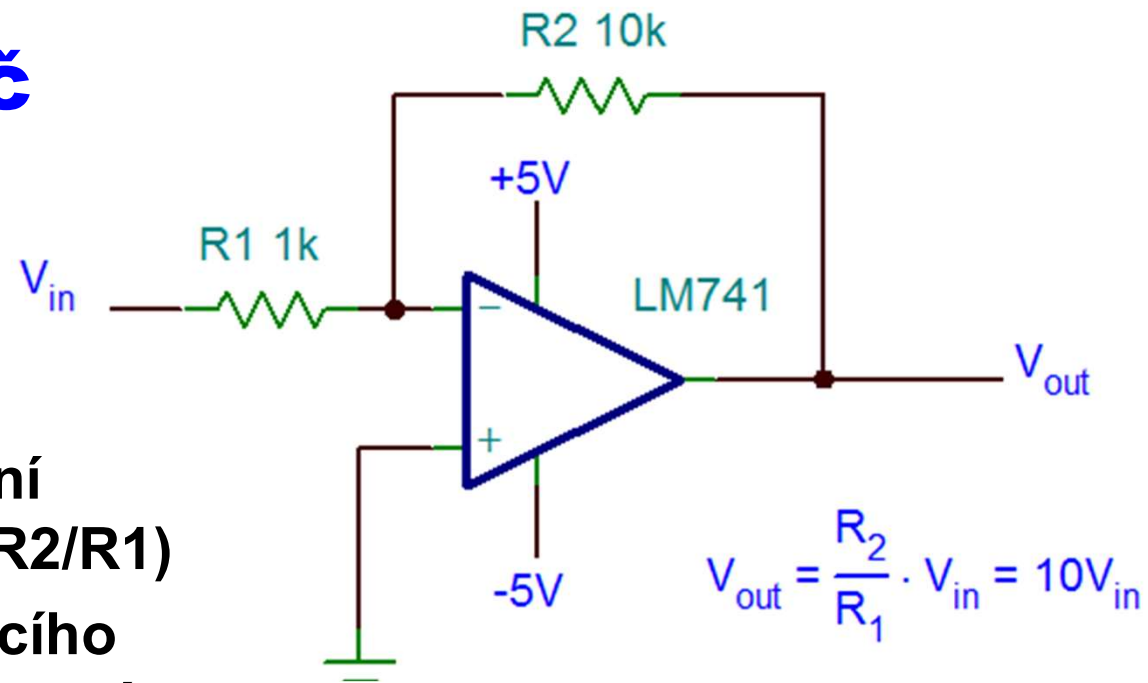
Sledovač napětí

- buffer, voltage follower - **impedanční přizpůsobení**
- pokud by bylo napětí na výstupu, který je připojen do invertujícího vstupu, vyšší než na neinvertující vstupu, muselo by se napětí na výstupu snižovat
- pokud je ale napětí na invertující vstupu menší než na neinvertující, muselo by se napětí na výstupu zvyšovat
- výsledkem je situace, kdy se na výstupu objeví napětí, které přesně odpovídá napětí přivedenému na neinvertující vstup
- výstup OZ má velmi malou impedanci a vstupy velmi velkou, můžeme takto velice „měkký“ signál – třeba z odporového děliče s rezistory o velkých hodnotách – posílit, a vyrobit z něj signál dostatečně „tvrdý“ o přesně stejné hodnotě, vhodný pro další zpracování

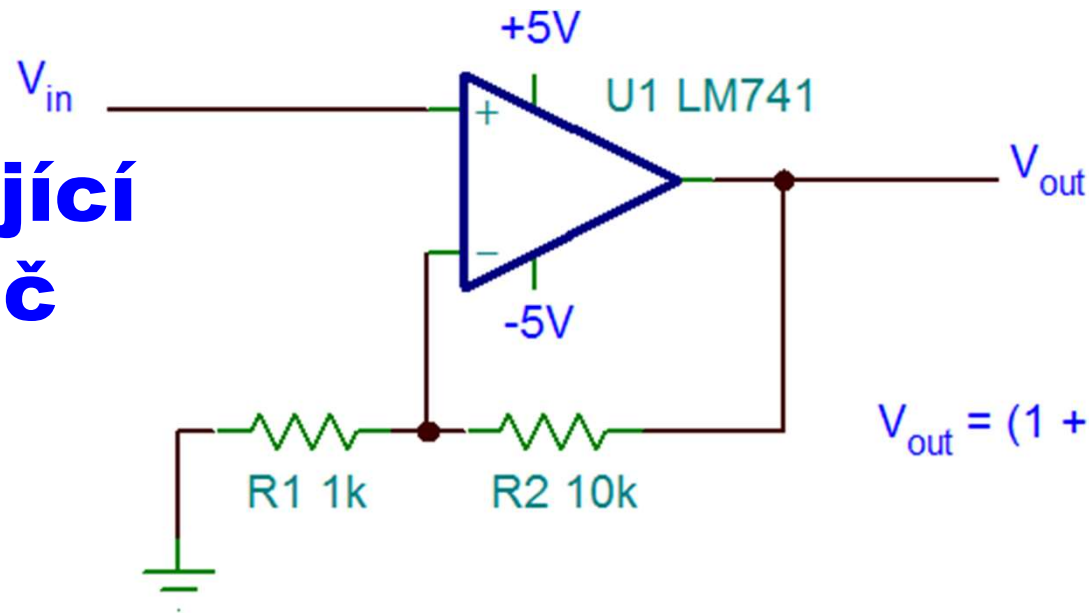


Invertující zesilovač

- základní funkce OZ
- výstup dle rovnice jednoduše invertuje vstup a zvyšuje se faktorem zesílení určeným poměrem odporů (R_2/R_1)
- technicky lze zisk u invertujícího zesilovače považován za záporný, ale většina aplikací nebude závislá na fázi vstupního signálu, takže jeho invertování neovlivní výsledek, a proto lze záporné znaménko ignorovat
- zobrazení osciloskopem vstupního a výstupního napětí, nastává i fázový posun

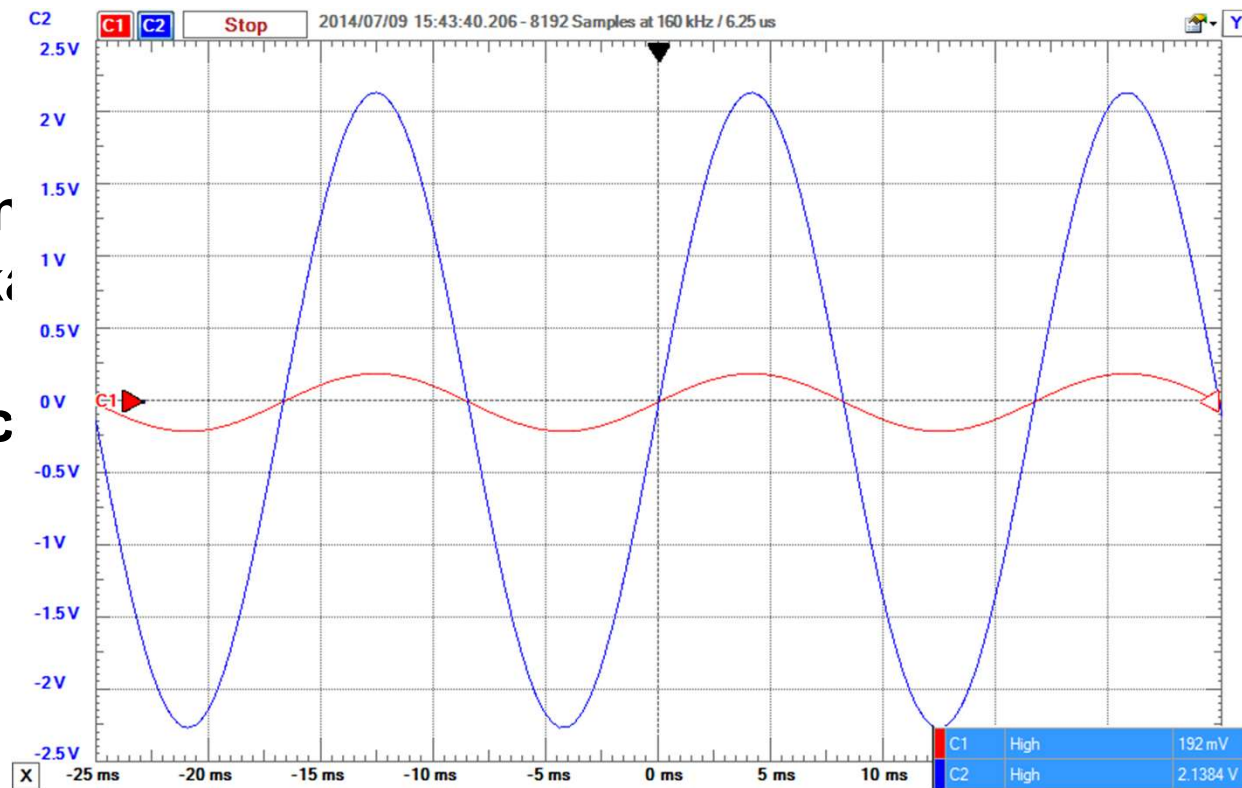


Neinvertující zesilovač



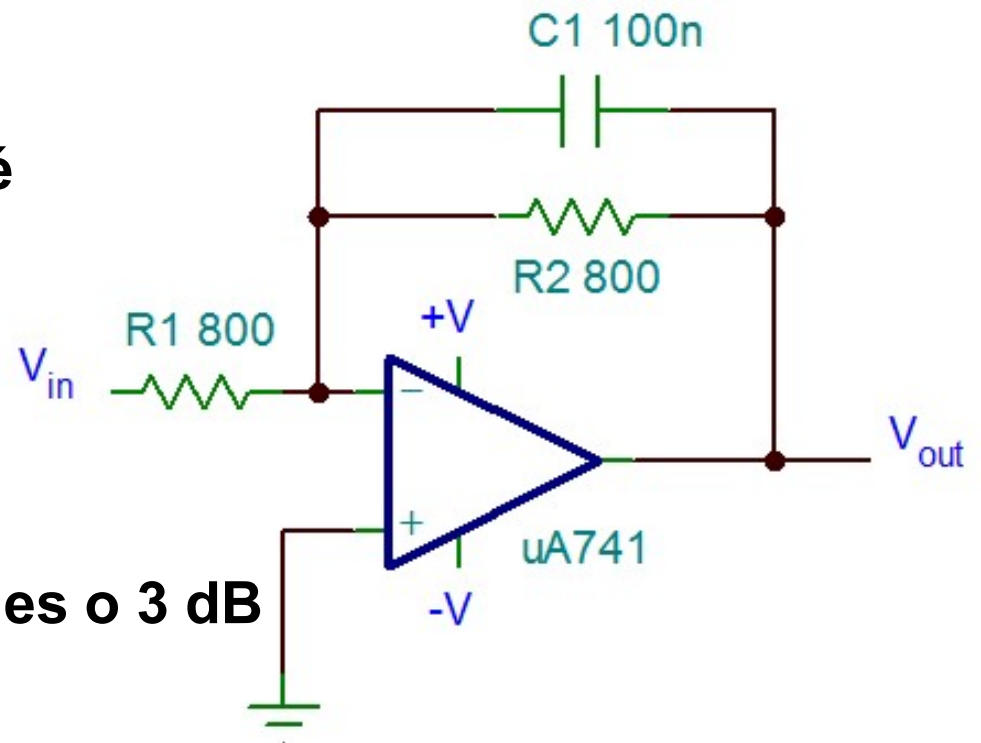
$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_{in} = 11V_{in}$$

- zesílení je závislé na poměru rezistorů, ale s připočtením 1, až 100 000x lze dosáhnout
- výstupní fáze odpovídá vstupní fázi
- vstupní impedance je dána velikostí R1 – hodně velká, aby nebyl nutný velký proud, případně zatěžující zdroj (např. biosignály)



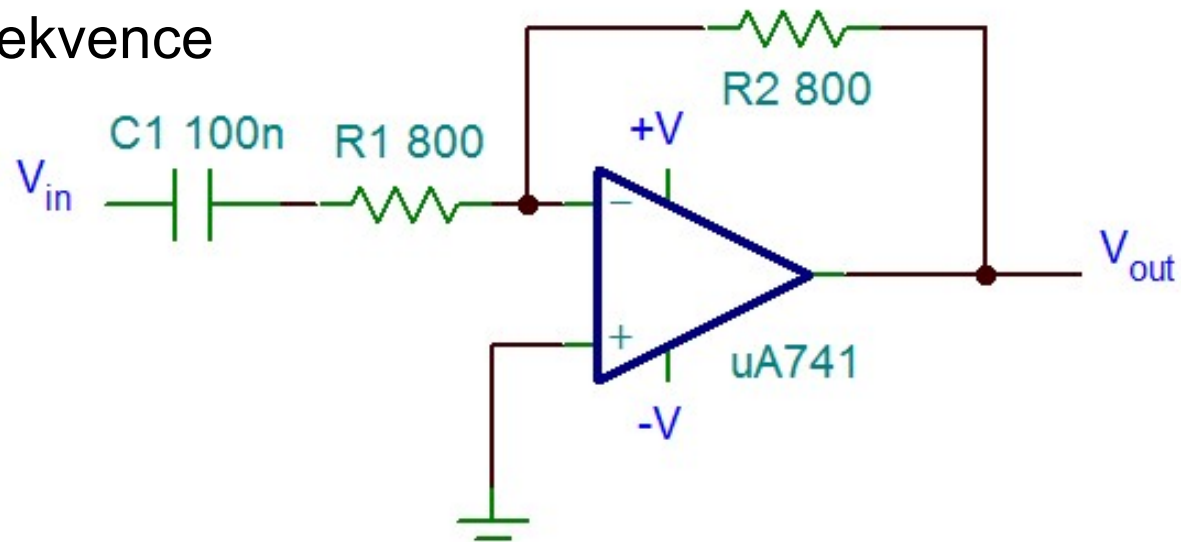
Filtrace - low-pass

- omezení zesílení pouze na určité frekvenční složky přenášeného (střídavého) signálu
- DC a nižší frekvence projdou, vyšší jsou omezovány
- mezní frekvence (cutt-off) – pokles o 3 dB
- $(V_{in}/\sqrt{2}), f = 1/(2\pi RC)$

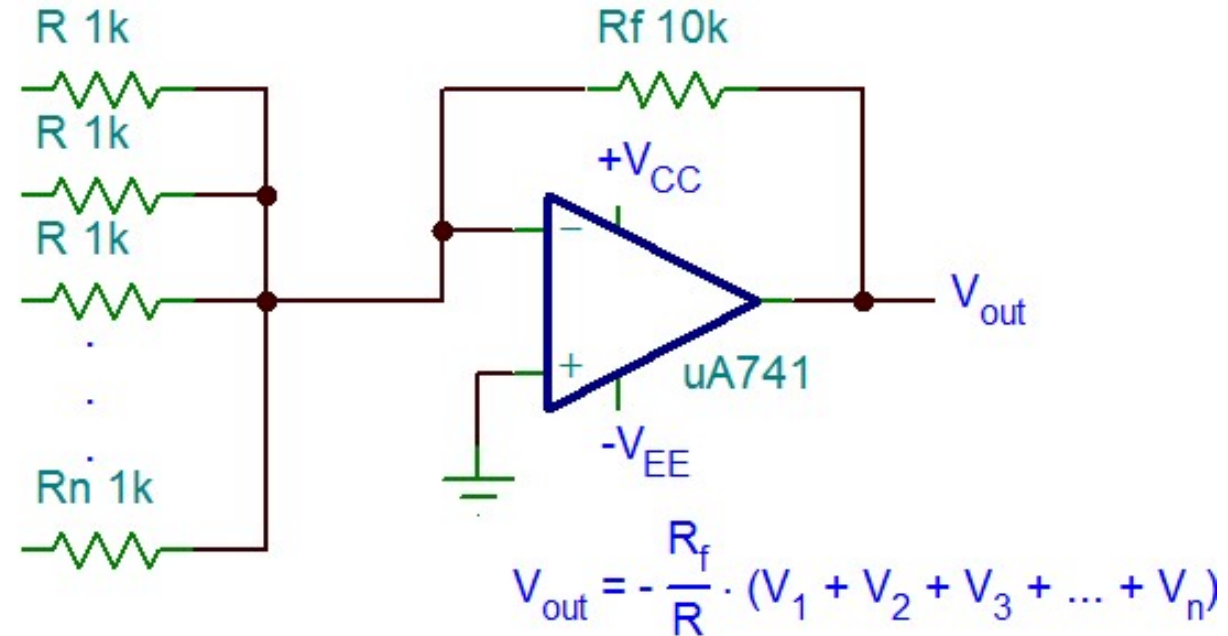


high-pass

- propustí vyšší frekvence, blokuje DC složku a nízké frekvence
- band pass
dva C, dvě mezní f

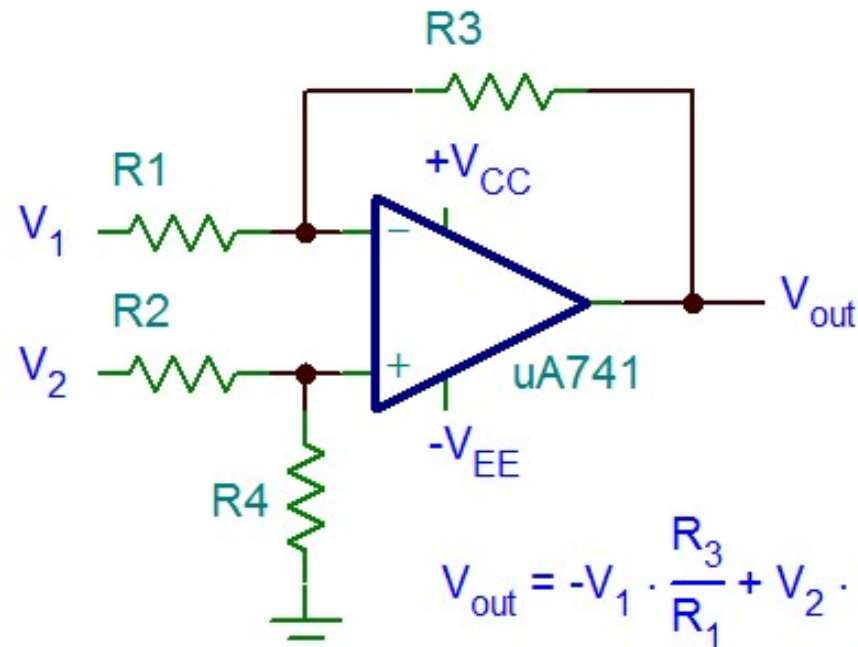


Sumátor



- se používá ke sčítání dvou nebo více napětí dohromady přes individuální vstupní odpory
- ty mohou mít stejnou hodnotu nebo se lišit (vážené vstupy)
- sečtením všech příspěvků se získá výstup (invertovaný):
$$-V_{out} = R_f \cdot (V_1/R_1 + V_2/R_2 + \dots + V_n/R_n)$$
- stále můžeme implementovat zisk, určený pomocí R_f/R poměru

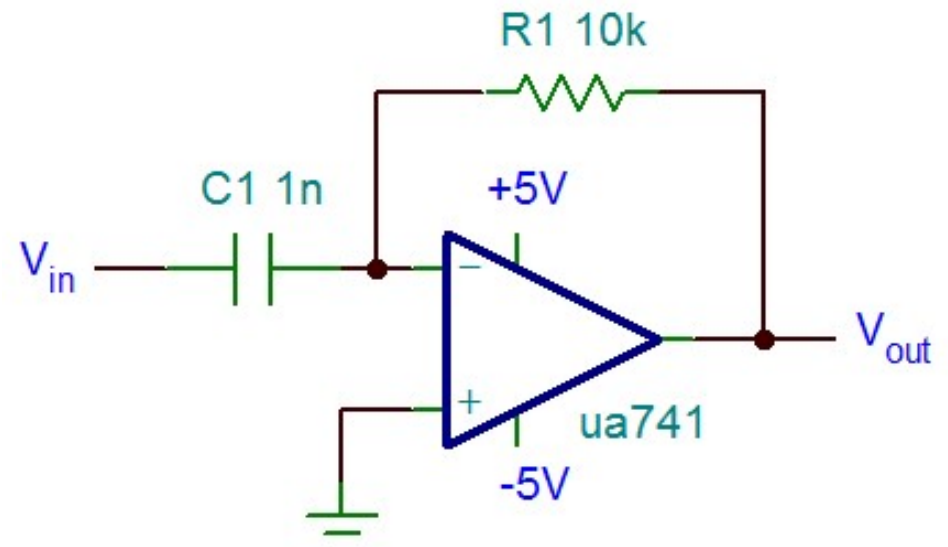
Subtractor



- „odečítač“ není nic jiného než standardní diferenciální zesilovač
- tentokrát použijeme neinvertující vstup místo spojení s GND
- vztah se zjednoduší na $V_{out} = R_3/R_1 * (V_2 - V_1)$, když použijeme $R_1 = R_2$ a $R_3 = R_4$, zisk bude R_3/R_1
- pokud jsou všechny rezistory stejné - $R_3/R_1 = 1$, získáme jednotkový zisk a $V_{out} = V_2 - V_1$

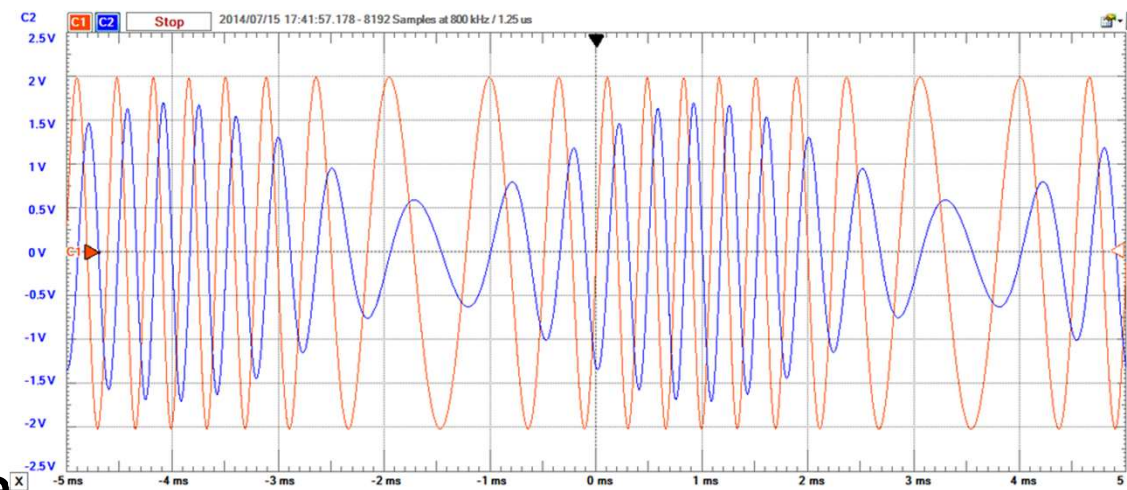
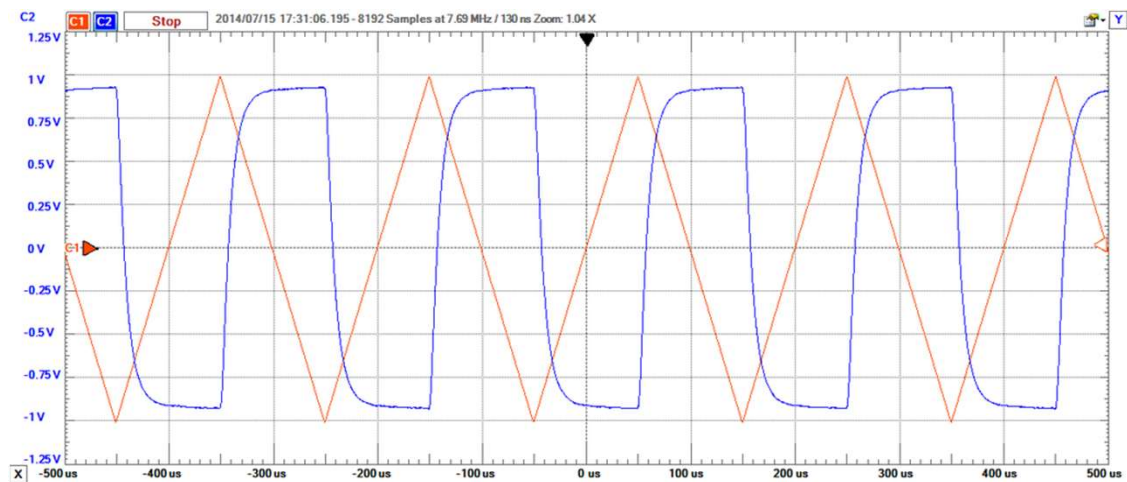
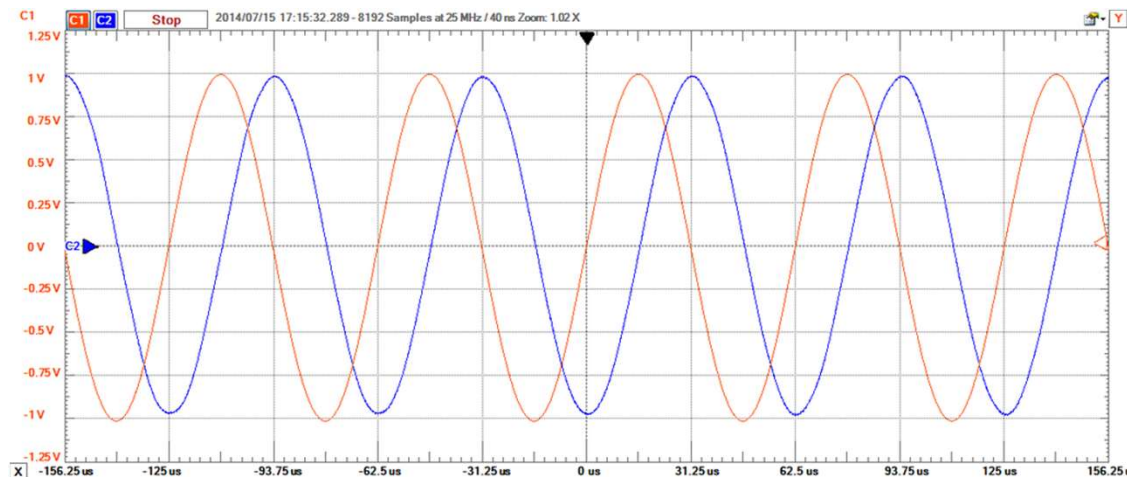
Diferenciátor

- derivátor, časová derivace vstupního signálu
- chceme znát rychlost změny nebo směrnici signálu (funkce) v libovolném bodě
- použitím derivačního obvodu můžeme najít strmost elektronického signálu v libovolném časovém okamžiku
 - takto jsou FM signály převedeny na AM signály ve vašem rádiu, aby bylo možné odfiltrovat modulaci nosné frekvence a načíst data (hudbu)
- vstupní frekvence ve skutečnosti není superkritická; dojde k určitému útlumu na vysokých i nízkých frekvencích, nejlepší odezva bude při $f = 1 / (2\pi * R * C)$
- fakticky je snazší napřed derivovat a případnou ztrátu (amplitudy) signálu později kompenzovat zesilovačem



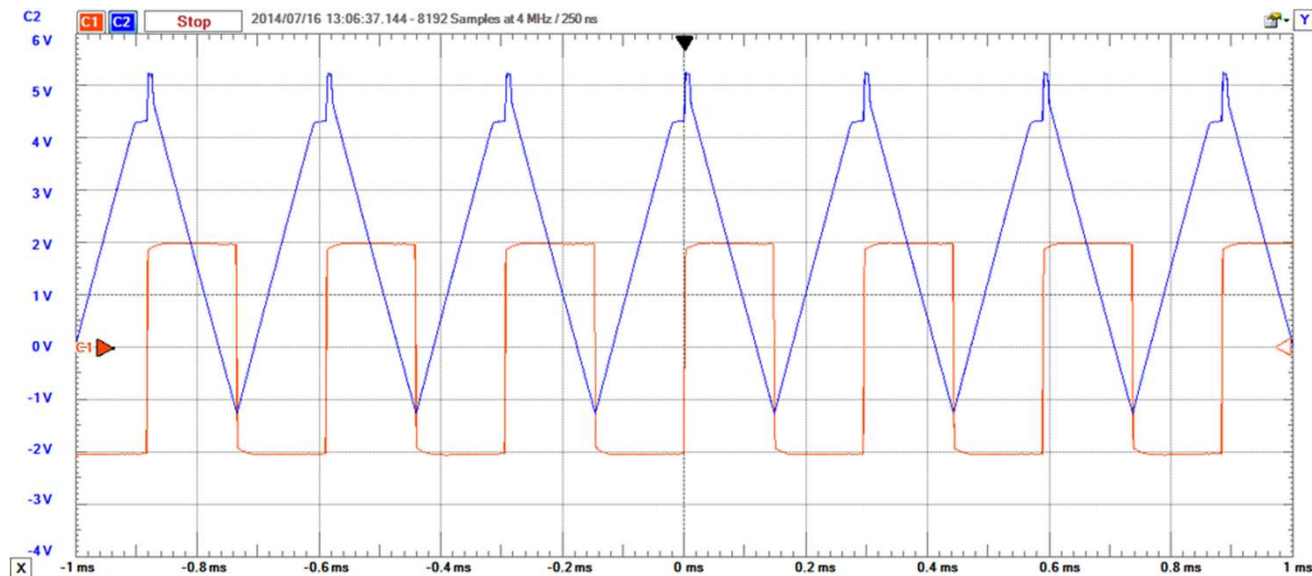
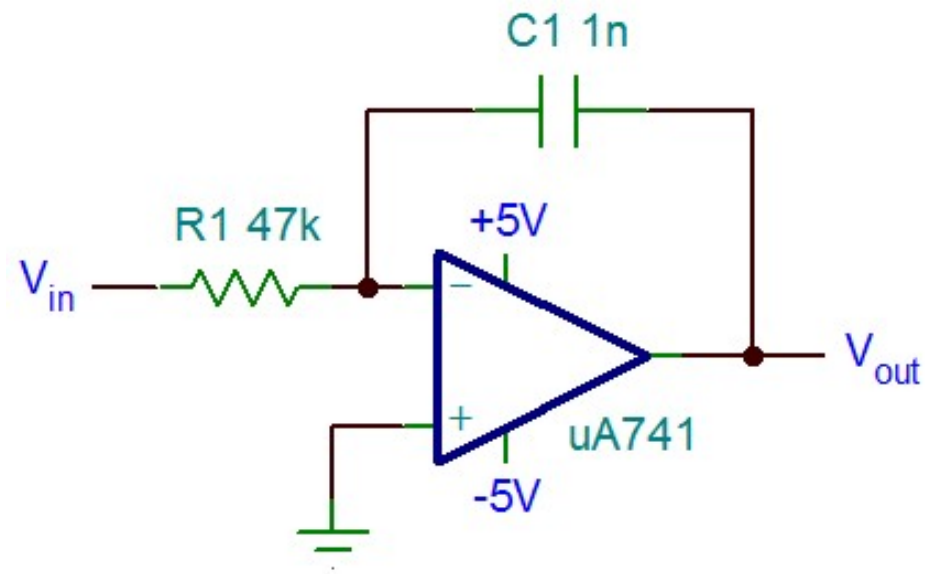
Příklady

- derivace **sinusového signálu** je **cosinus** a navíc **invertovaný**; je to vlastně sinusoida posunutá o 90°
- u **trojúhelníkového** signálu je derivací konstanta s různými znaménky – dle stoupající nebo klesající části
- **FM** derivovaný na **AM**
- má-li vstup vyšší frekvenci, výstup má vysokou amplitudu, a když je vstupní frekvence nízká, tak i výstupní amplituda klesá
- výstup je opět fázově posunut
- vstupem je nosná frekvence 2 kHz s modulační frekvencí 200 Hz, amplitudou 2 V a indexem 50%
- nevýhodou derivátoru je tendence propouštět šum, jsou také nestabilní při vysokých frekvencích (filtrace)

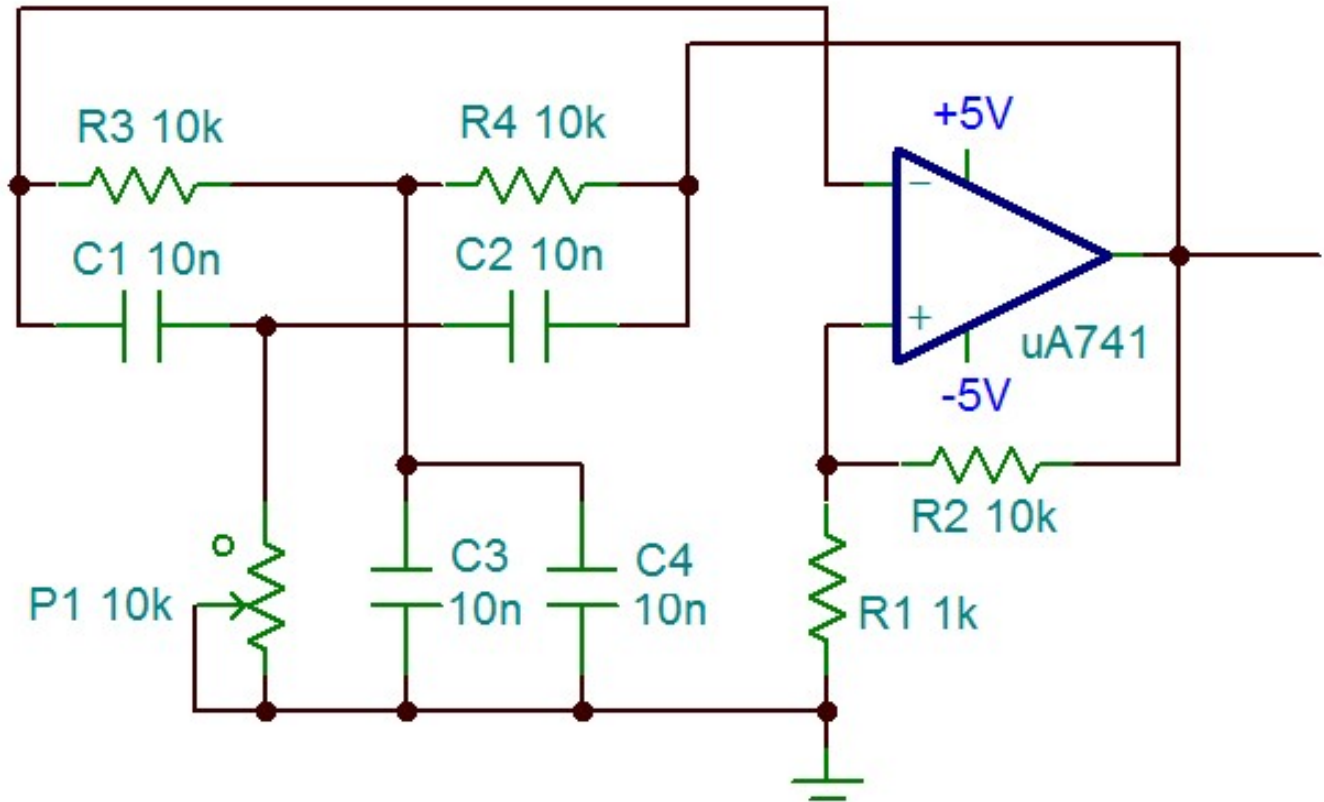


Integrátor

- integrace signálu - opak derivátoru;
- podobný nízkopásmovému filtru, na vysokých frekvencích se dějí divné věci – mezní $f = 1/(2\pi R C)$
- obdélníkový vstup bude generovat výstup trojúhelníkové vlny
- lze očekávat, protože trojúhelníková vlna generovala čtvercovou vlnu, když prošla derivátorem



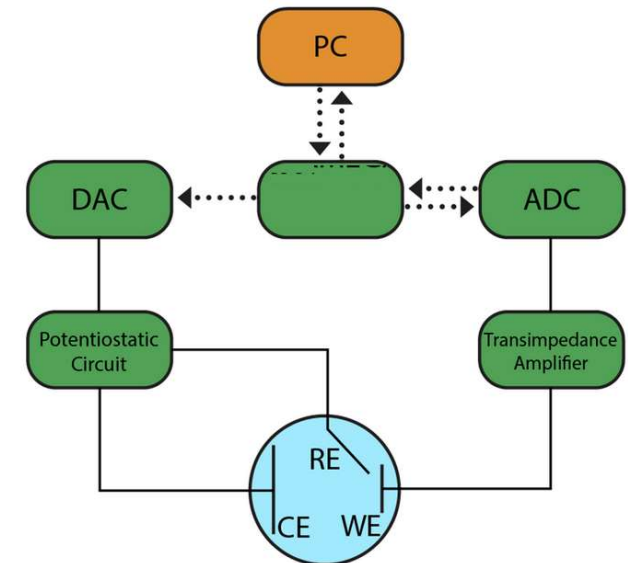
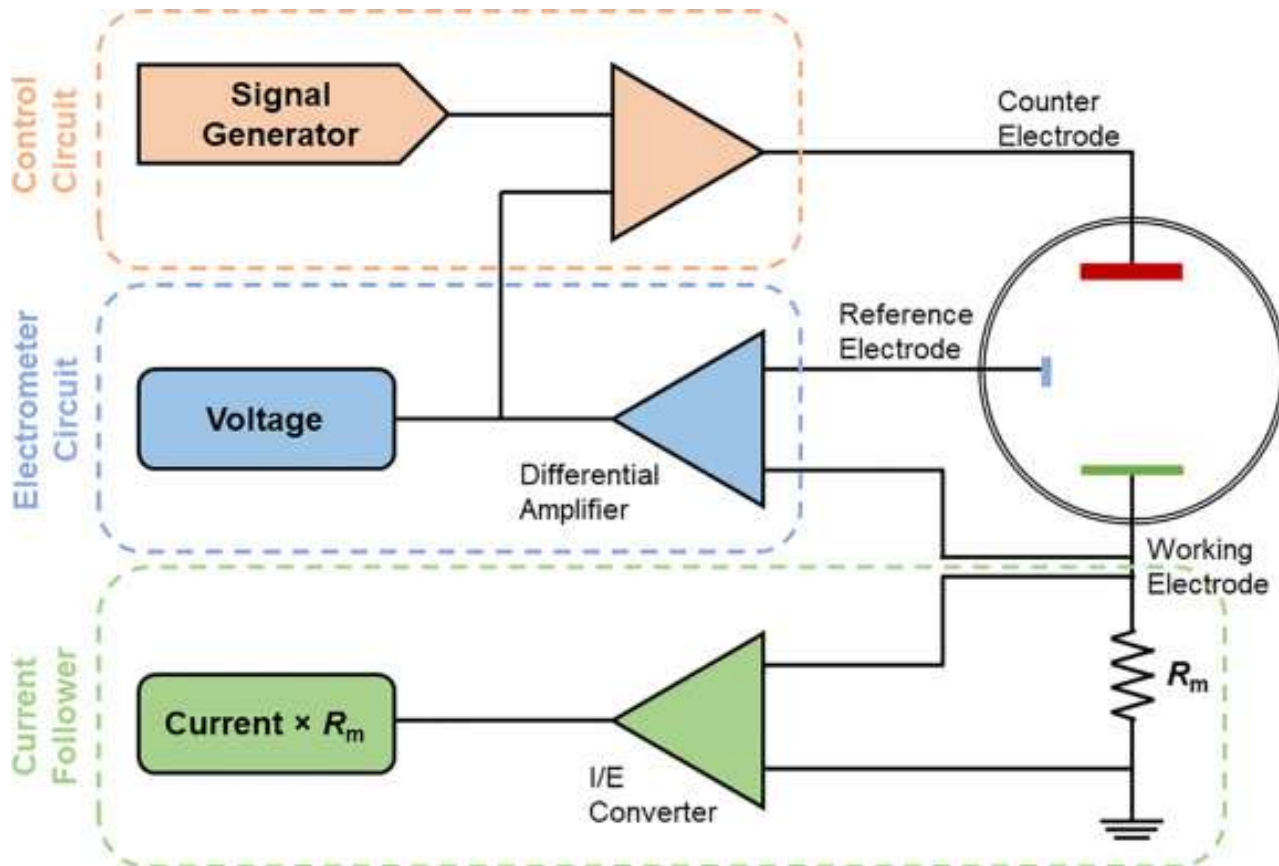
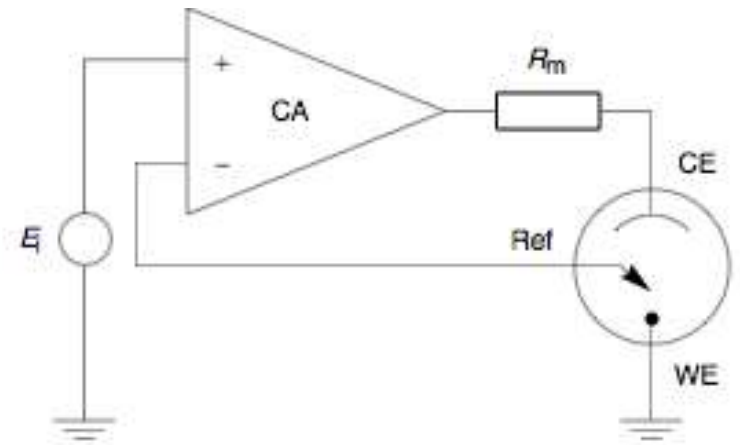
Generátor sinusoidy



- výstupní $f = 1/(2\pi RC)$, kde $C = C1 = C2$ a $R = R3 = R4$
- C3 a C4 dohromady musí být 2x C1 - pokud chceme upravit výstupní f změnou C1/C2, je nutno uzpůsobit i C3/C4
- potenciometr P1 umožňuje jemné doladění zpětné vazby, aby obvod mohl oscilovat
- pokud je P1 větší než R3, nebude oscilovat; pokud je příliš malý, výstup bude mezi limity napětí (rails) skákat a bude vypadat více čtvercový než sinusový

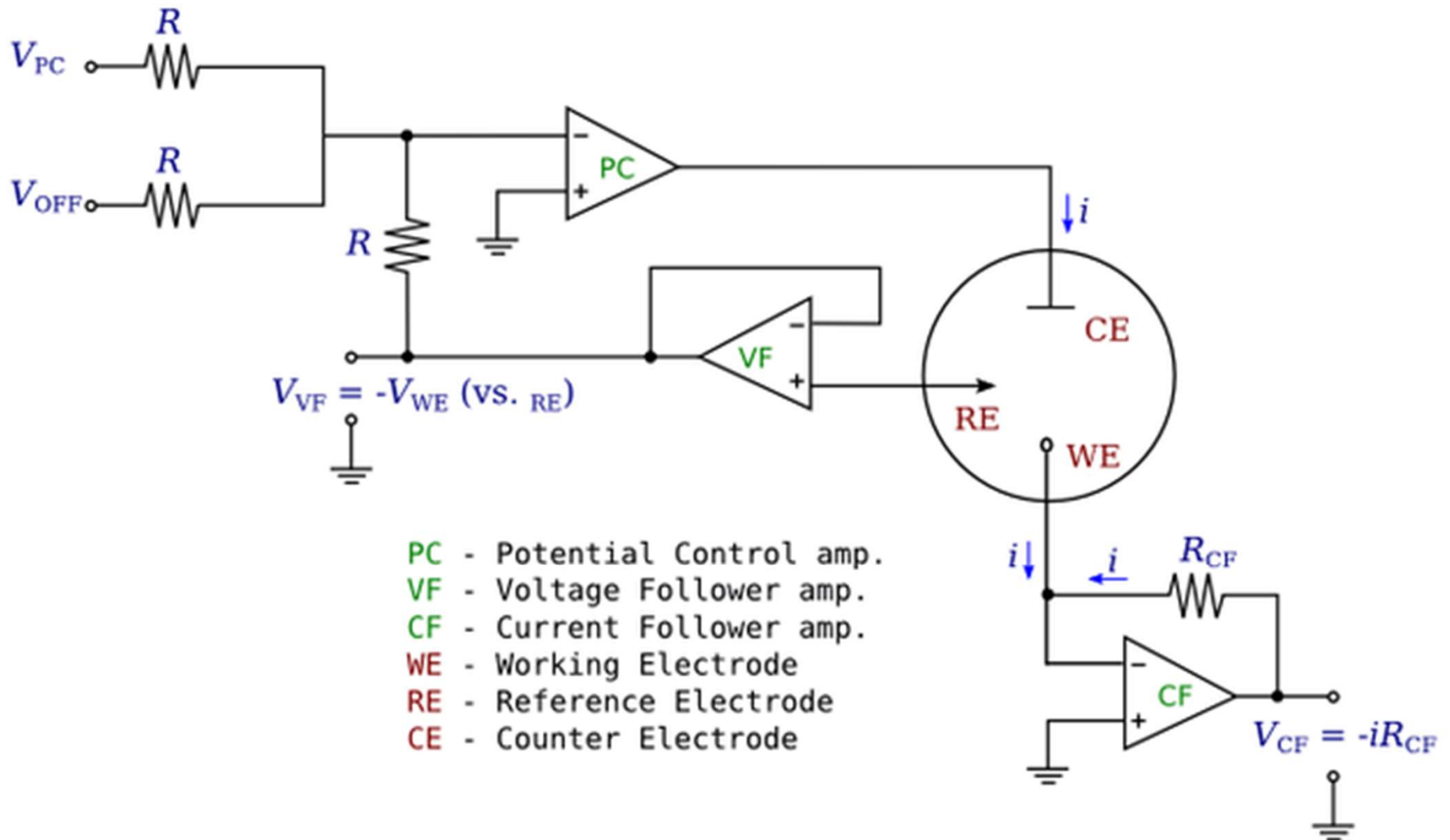
Potenciostat

- pro činnost elektrochemických systémů je nutno udržovat pomocí potenciostatu konstantní napětí mezi pracovní a referenční elektrodou a měřit proud tekoucí counter (měřící) elektrodou
- realizuje se pomocí operačního zesilovače



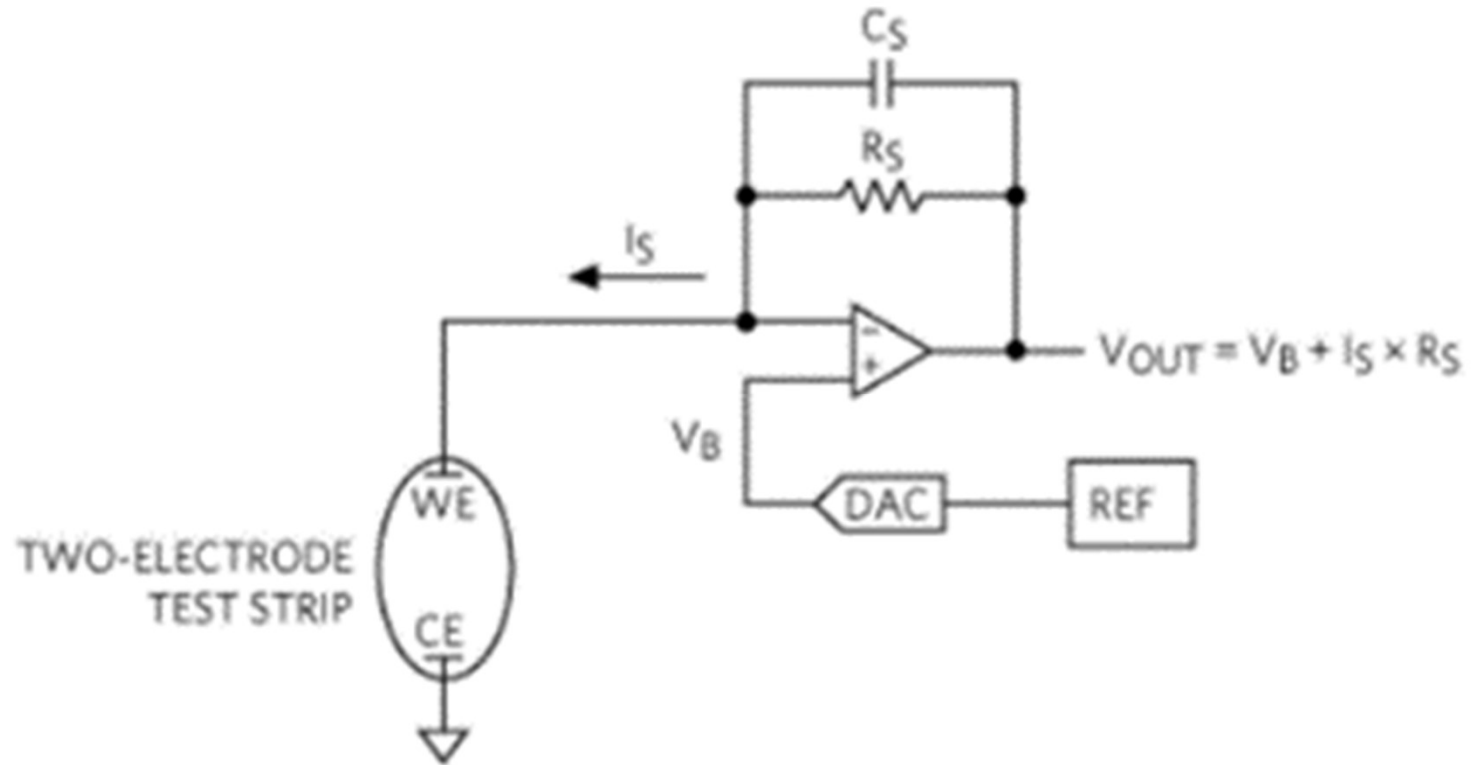
Potenciostat

- signál = proud pracovní elektrodou – třeba převést na výstupní napětí – transimpedanční zesilovač (current follower)
- možná konstrukce:



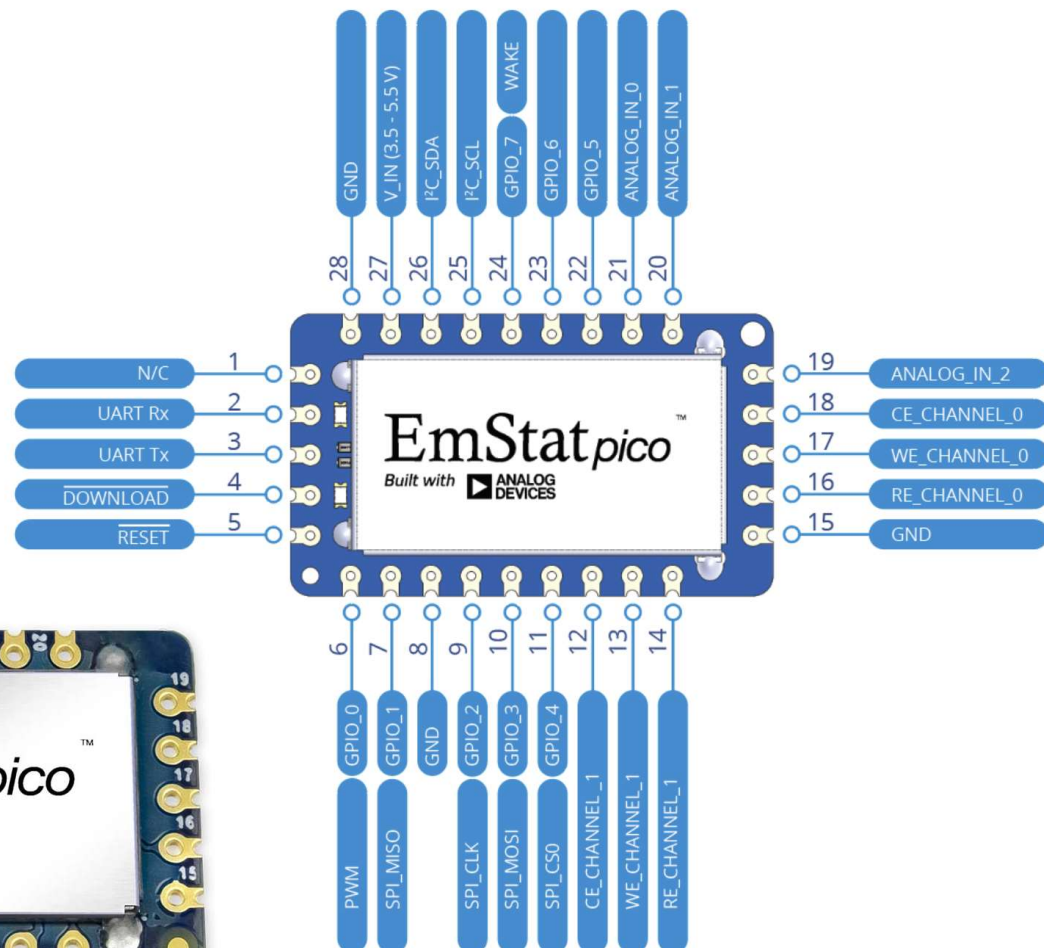
Dvouelektrodové systémy

- velmi jednoduché, jen pracovní elektroda a referenční/pomocná dohromady – například jednorázové biosensorové pásky do glukometrů



Emstat Pico

- dedikovaný elektrochemický modul – dva nezávislé potenciostaty nebo jako bi-potenciostat (dvě pracovní elektrody)
- připojitelný sériovým portem k „čemukoliv“:



1 biosensor – [EmstatPico – Arduino] === cable === (smartphone, PC)

2 biosensor – [EmstatPico – Bluetooth adapter, battery] ::::: wireless :::::
(smartphone, PC)

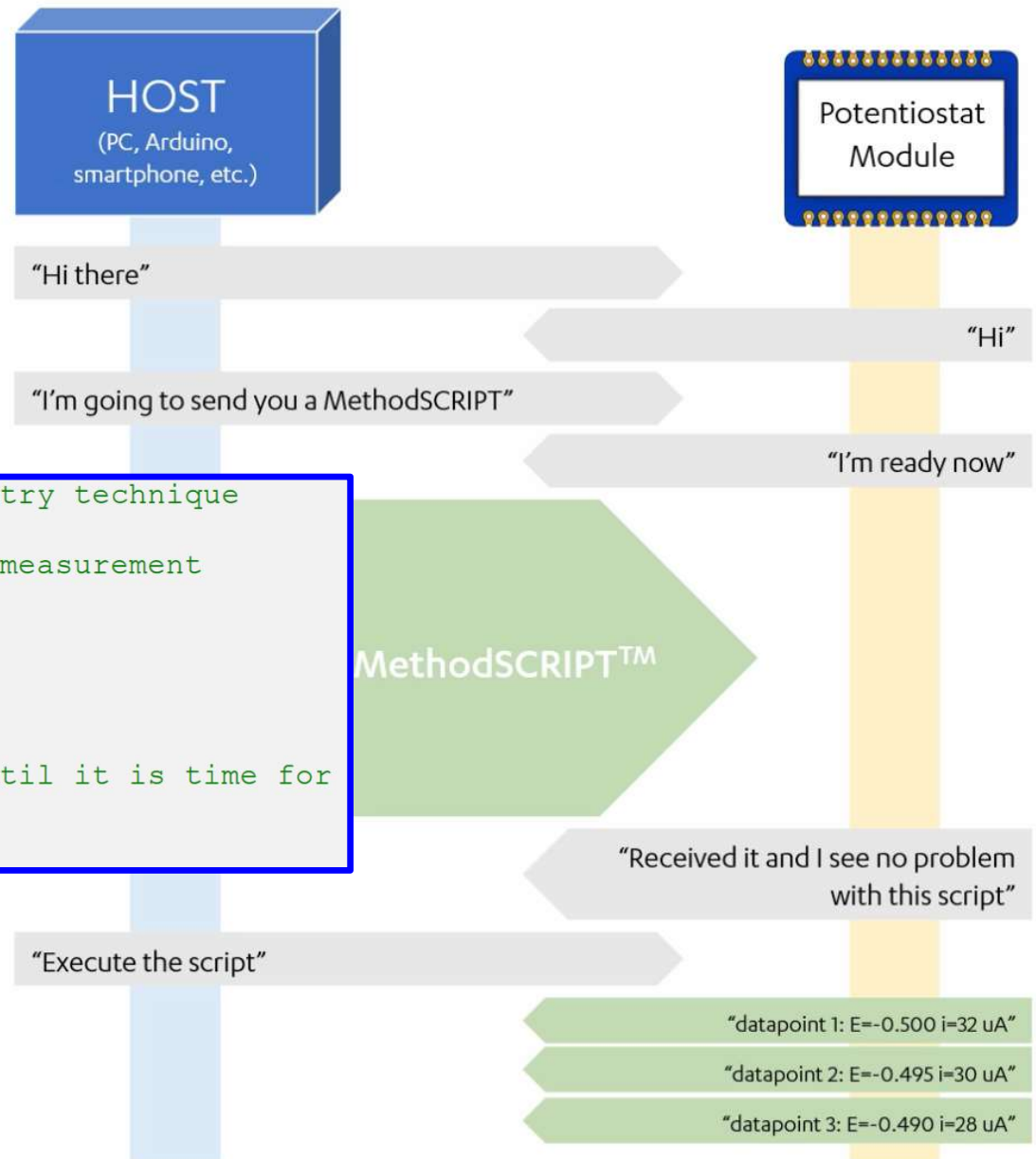
3 biosensor – [EmstatPico – Arduino with Bluetooth, battery] ::: wireless :::::
(smartphone)

Firmware

- nabídka elektrochemických měřících technik
- **Voltammetric techniques:**
- Linear Sweep Voltammetry LSV
- Cyclic Voltammetry CV
- Square Wave Voltammetry SWV
- Differential Pulse Voltammetry DPV
- Normal Pulse Voltammetry NPV
- The above techniques can also be used for stripping voltammetry
- **Techniques as a function of time:**
- Chronoamperometry CA
- Pulsed Amperometric Detection PAD
- Open Circuit Potentiometry OCP
- MultiStep Amperometry MA
- **Electrochemical Impedance Spectroscopy**
- Scanning or fixed frequency mode EIS:

Software - MethodSCRIPT

- uživatelsky konfigurovatelné měřící metody či jejich kombinace
- rychlý vývoj speciálních aplikací



Další informace

- <https://www.instructables.com/Op-amp-Basics-part-2/>
- www.palmsens.com
- **Forrest M. Mims. Timer, Op Amp, and Optoelectronic Circuits & Projects. 2004.**