

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

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

Měřicí převodníky

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



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


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

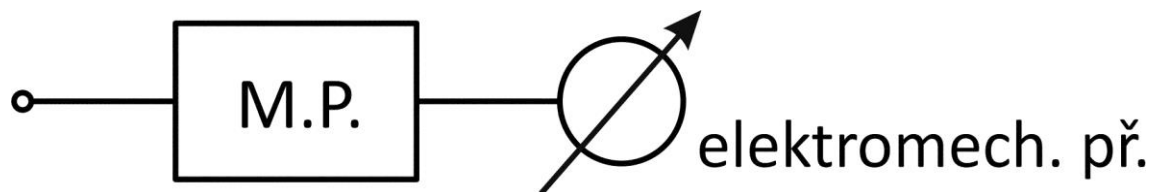
Měřicí převodníky

Obsah

- Měřicí převodník – význam
- Operační zesilovač
- Měřicí zesilovače
- Převodníky pro měření součtu a rozdílu
- Převodníky pro měření součinu a podílu
- Převodníky pro měření časového integrálu
- Aktivní usměrňovače
- True RMS převodníky
- Spičkové detektory
- Literatura

Měřicí převodník – význam

Měřicí převodník (MP) = elektronický obvod, který je předřazen vlastnímu měřicímu přístroji a je tak součástí měřicího řetězce.



Elektronický přístroj = MP + elektromechanický systém.

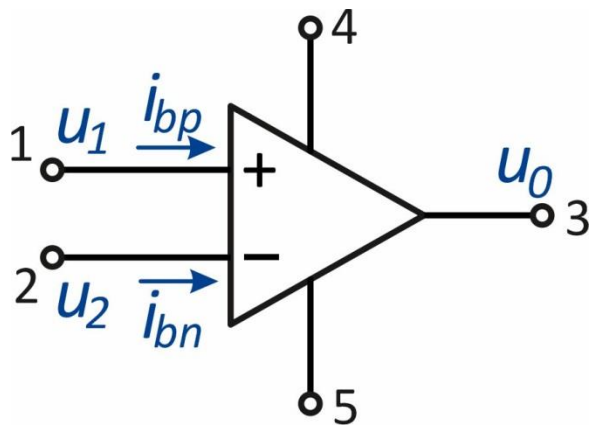
MP jsou nedílnou součástí analogových i digitálních přístrojů.

Význam MP:

- Zlepšení metrologických parametrů měřidla
- Ochrana vlastního měřidla
- Měření různých veličin
- Snadná a přesná realizace matematických operací nad měřenými veličinami

Realizace MP: pomocí operačních zesilovačů (OZ)

Operační zesilovač



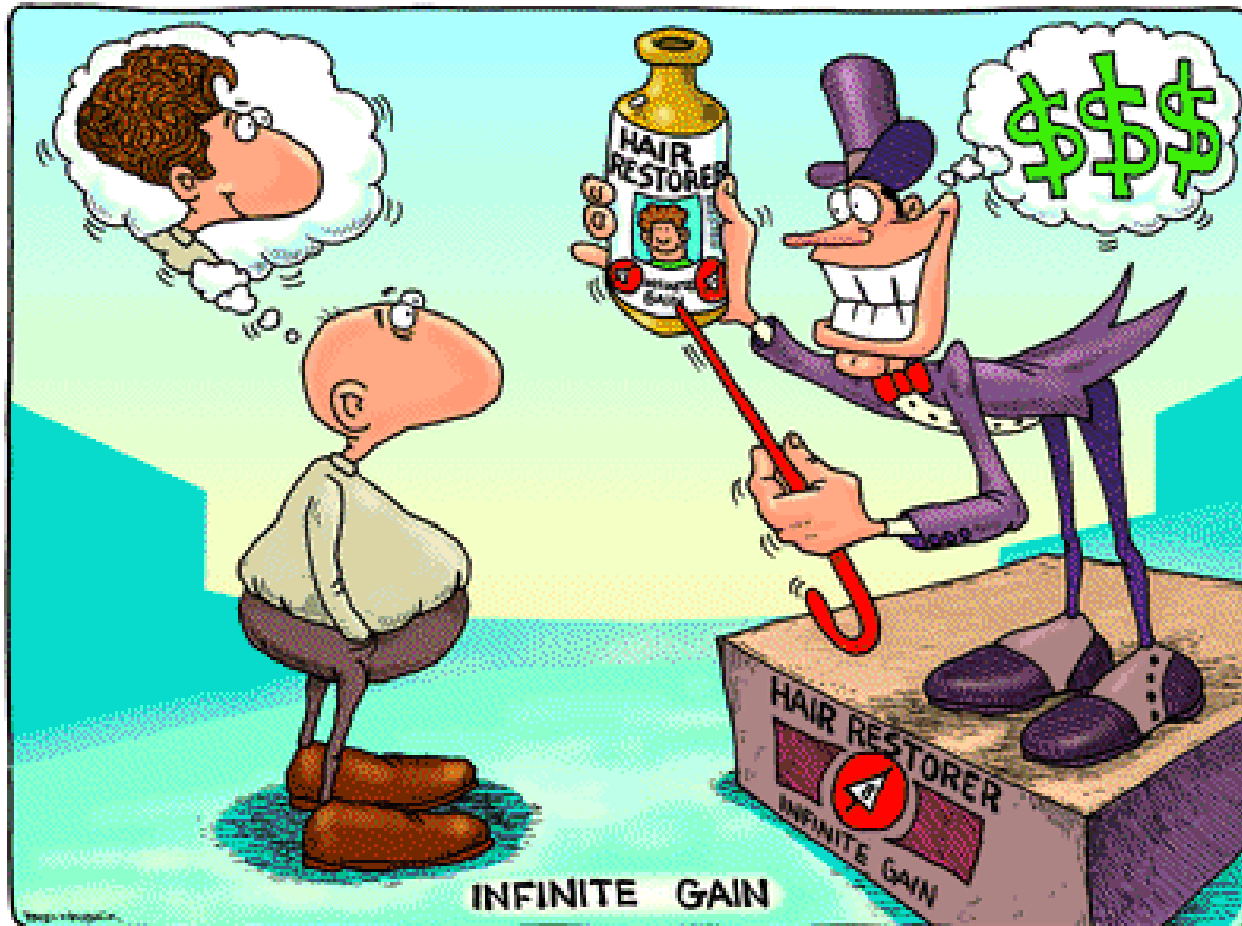
- 1...neinvertující vstup
- 2...invertující vstup
- 3...výstup
- 4, 5...napájecí vstupy

Při základní analýze nebo návrhu obvodu s OZ se často využívá zjednodušení v podobě tzv. **ideálního OZ**. Parametry reálného OZ se liší.

Parametr	Značení	Ideální OZ	Reálný OZ
Diferenciální napěťové zesílení	A_D	∞	$\sim 10^4 \div \sim 10^6$
Vstupní odpor	R_{in}	∞	$\sim 10^4 \div \sim 10^9 \Omega$
Výstupní odpor	R_{out}	0	$\sim 1 \div \sim 1000 \Omega$
Frekvenční rozsah	BW	DC \div ∞	DC \div f_m $f_m \in (\sim 100 \text{ kHz}; \sim 1 \text{ GHz})$
Vstupní napěťová nesymetrie	U_{OS}	0	$\sim 10 \mu\text{V} \div \sim 1 \text{ mV}$
Vstupní proudy	$I_{bp}; I_{bn}$	0	$\sim 0,1 \text{ pA} \div \sim 1 \mu\text{A}$
Vstupní proudová nesymetrie	I_{OS}	0	Řádově nižší hodnota oproti vstupním proudům
Činitel potlačení souhlasného signálu	CMR	∞	60 dB \div 130 dB

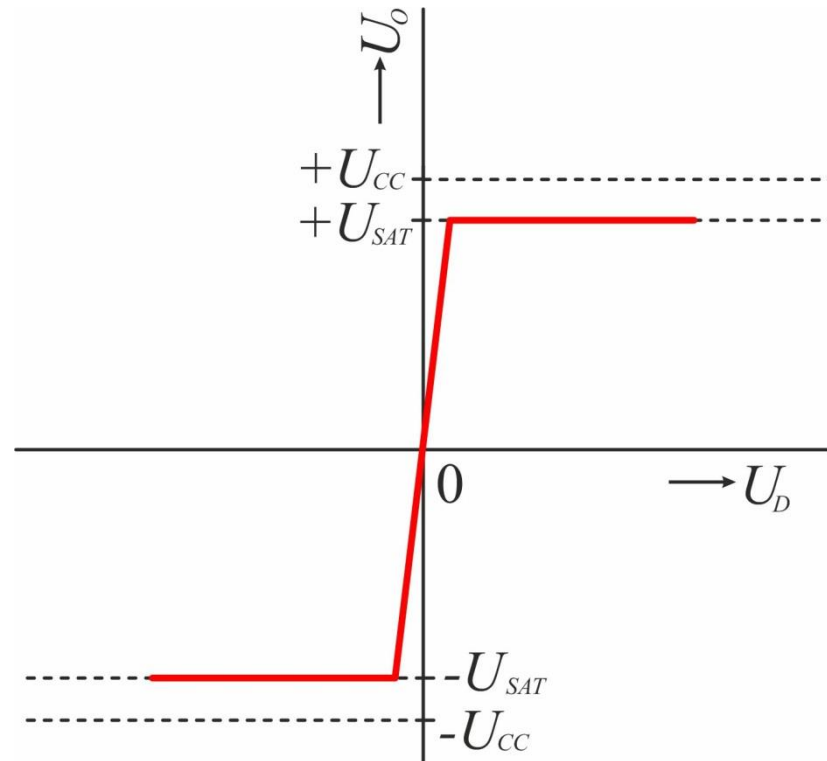
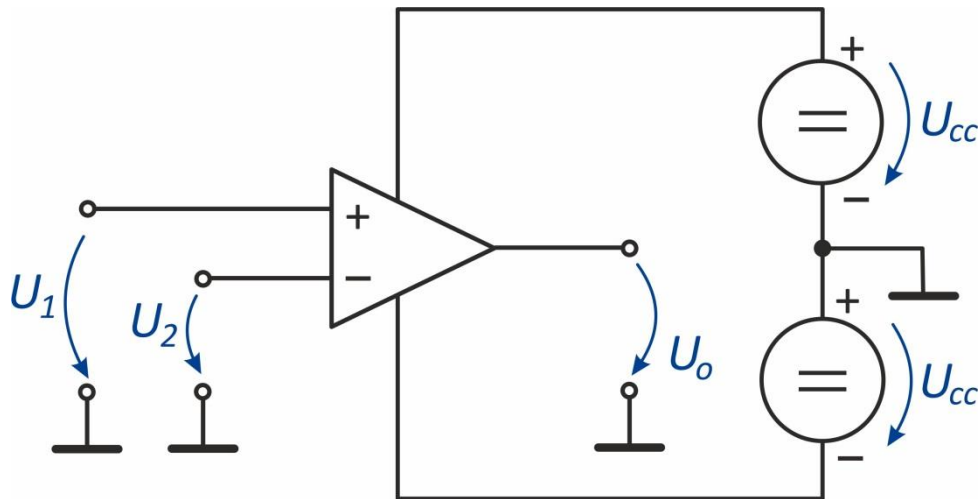
Operační zesilovač

Jedou ze základních charakteristických vlastností ideálního OZ je **nekonečný zisk** (Infinite Gain).



http://www.educatorscorner.com/images/cartoon_infnite3-lg.gif

Operační zesilovač



OZ je napájen symetrickým zdrojem $\pm U_{CC}$.

$\pm U_{CC}$...napájecí napětí
 $+U_{SAT}$...+saturační napětí
 $-U_{SAT}$...-saturační napětí
 U_D ...vstupní diferenciální napětí ($U_1 - U_2$)
 U_o ...výstupní napětí

Ideálně:

$$U_o = A_D U_D = A_D (U_1 - U_2)$$

Ve skutečnosti:

$$U_o^* = A_D U_D + A_{CM} U_{CM}$$

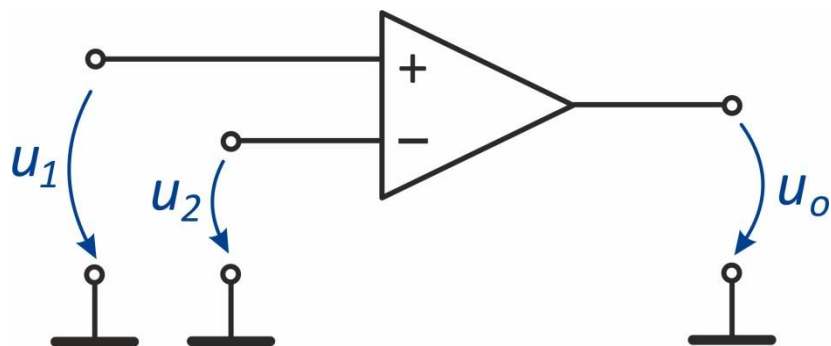
$$U_{CM} = \frac{U_1 + U_2}{2}, \quad A_{CM} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_{CM}}$$

$$A_D \gg A_{CM}, \quad CMR = 20 \log \frac{A_D}{A_{CM}}$$

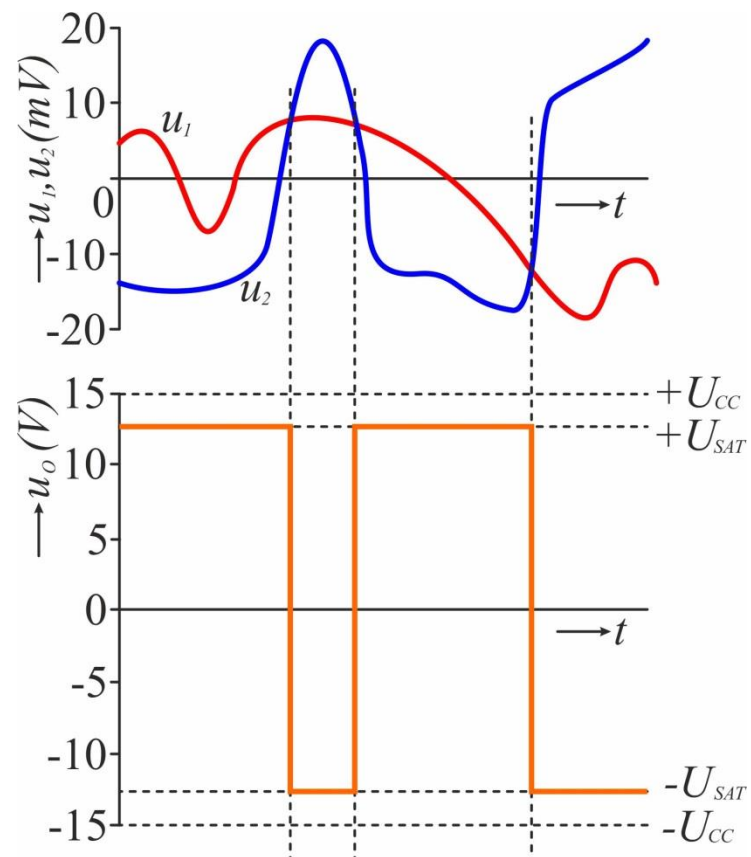
Operační zesilovač

Komparátor s OZ

OZ bez zpětné vazby = komparátor.



Komparátor bez hystereze



I-O charakteristika komparátoru

Zesilovač s konečným zesílením s OZ

Zavedením **záporné zpětné** vazby je možné dosáhnout konečného definovaného zisku zapojení. Záporná zpětná vazba je nutnou podmínkou pro vznik tzv. **virtuální nuly** (Operační zesilovač generuje svým výstupem takové napětí resp. proud, aby dosáhl nulového rozdílu napětí mezi neinvertujícím a invertujícím vstupem.)

Operační zesilovač

Historie a vývoj

Pojem **operační zesilovač**

1947, John Ragazzini,
University of Columbia, USA
(automatické řízení, analogové
počítače, zpracování signálu)



John Ragazzini (1912-1988)

(https://ethw.org/File:1892_-_John_R._Ragazzini.jpg)

May 1947

PROCEEDINGS OF THE I.R.E.

Analysis of Problems in Dynamics by Electronic Circuits*

JOHN R. RAGAZZINI†, MEMBER, I.R.E., ROBERT H. RANDALL‡, AND
FREDERICK A. RUSSELL§, MEMBER, I.R.E.

Summary—This paper describes a method for obtaining an engineering solution for integrodifferential equations of physical systems using an electronic system. The components consist of standard plug-in feed-back amplifier units. As the interconnections are wires, resistors, and capacitors, no complicated mechanical layout problem is involved and a generally flexible analyzer need not be set up, for it is a simple matter to assemble the particular circuit for any system of equations for which solutions are desired. The system should, therefore, be of interest to those involved in a study of the dynamics of physical systems.

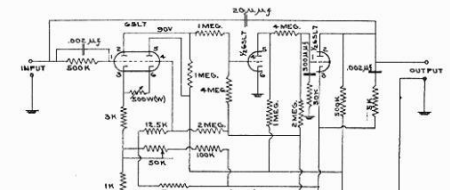
I. INTRODUCTION

THE FORMULATION of electrical analogs of dynamic problems in fields other than electrical has long been used to obtain solutions for such problems.¹ Then, in most cases, a physically realizable network may be synthesized to fit the equations and a network used to obtain the electrical outputs representing the solution of the equations.² For complicated problems this method does not usually result in a network whose individual parameters correspond to the individual parameters of the original system, so that experimentation in the nature of varying the parameters is not simple. This objection is largely overcome through the generous use of isolating amplifiers within the electrical network. Until the modern methods of feed-back stabilization were developed, the use of amplifiers introduced complicating circuit elements which altered with variation in tube characteristics. The other method of attack on problems of this type has been through the use of the mechanical differential analyzer³ having as its basic tool an ingenious mechanical integrator, recently improved through the use of a polarized-light

which by mere external changes in connection will serve as integrator, differentiator and sign changer. Professor J. B. Russell of Columbia University first brought these techniques to the attention of the authors in the circuits employed in the Western Electric M-IX anti-aircraft gun director.⁷ As an amplifier so connected can perform the mathematical operations of arithmetic and calculus on the voltages applied to its input, it is hereafter termed an "operational amplifier." The operations can be performed to any desired degree of precision, providing power supplies of excellent regulation and circuit components of high precision are used. For most engineering computations, ordinary circuit components are adequate.

II. OPERATIONAL AMPLIFIERS

The term "operational amplifier" is a generic term applied to amplifiers whose gain functions are such as to enable them to perform certain useful operations such as summation, integration, differentiation, or a combination of such operations. In view of the fact that



(http://www.philbrickarchive.org/operational_amplifier.htm)

Operační zesilovač

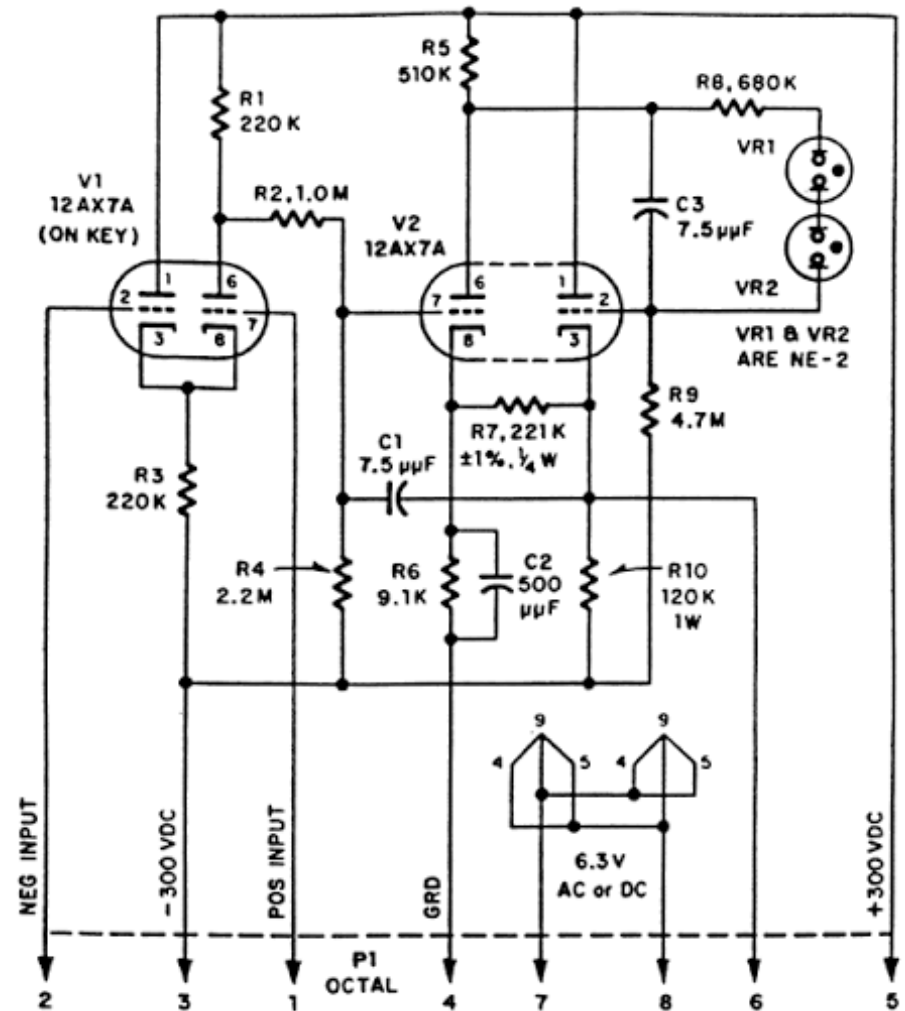
Historie a vývoj

První komerční OZ – 1953

elektronkový, typ **K2-W**, GAP/R
(firma George A. Philbrick
Researchers, USA)



(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:K2-W.jpg>)



Vnitřní zapojení K2-W

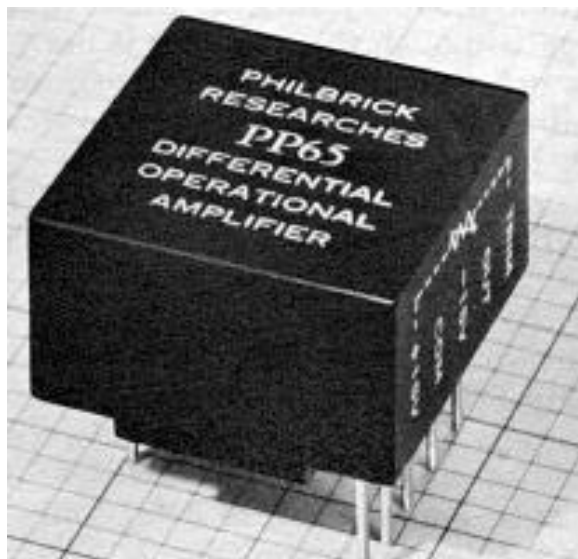
(<http://www.ganssle.com/tem/tem227.html>)

Operační zesilovač

Historie a vývoj

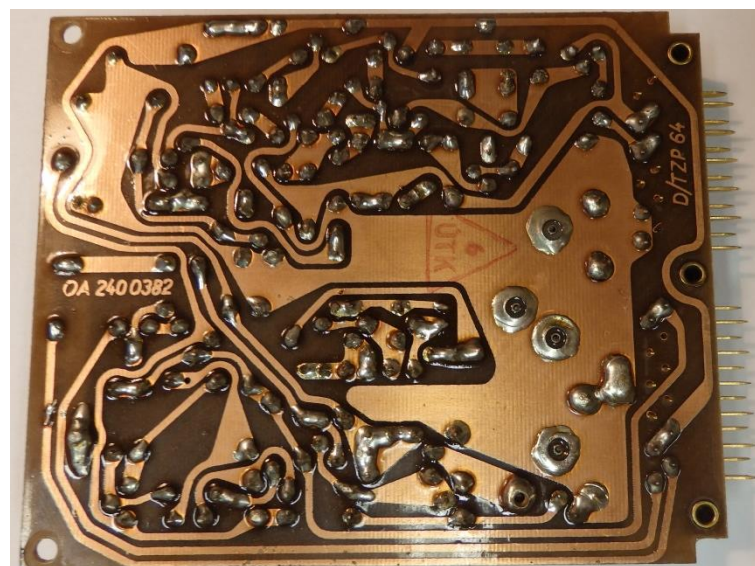
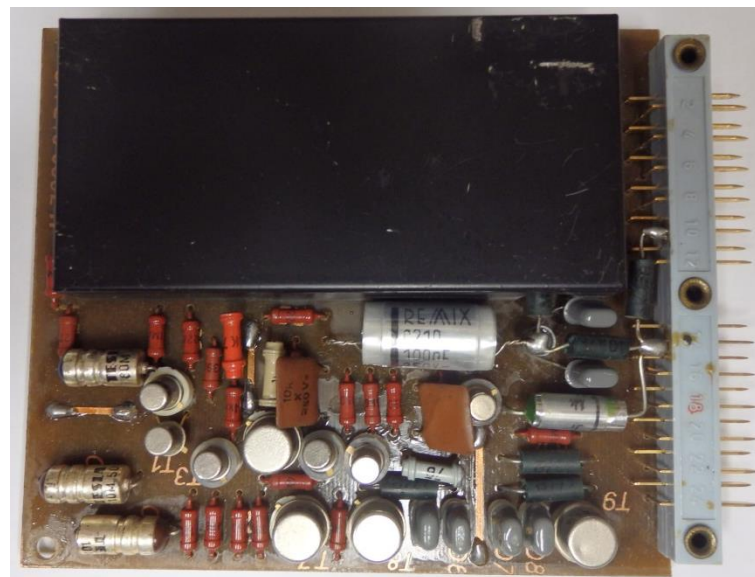
Tranzistorové OZ – 60. léta

OZ realizované na plošném spoji,
popř. ve formě hybridních
integrováných obvodů



PP65 - integrovaný modul operačního zesilovače, GAP/R, 1962

(https://www.wikiwand.com/pt/Amplificador_operacional)



Plošný spoj tranzistorového OZ (součást digitálního multimetru, firma Tesla)

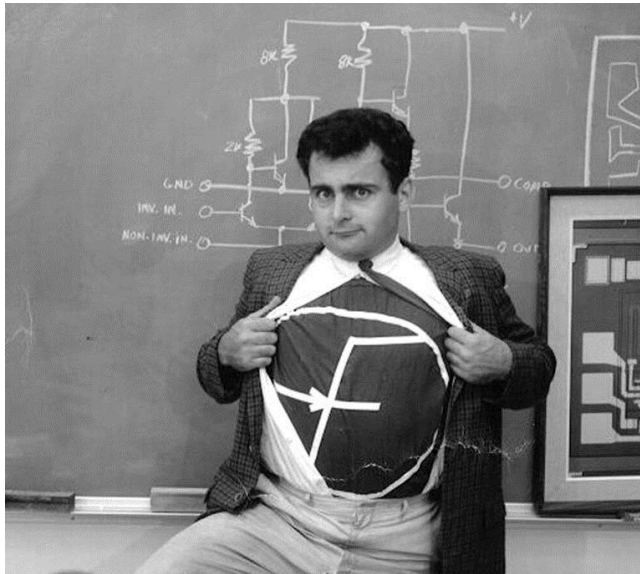
Operační zesilovač

Historie a vývoj Monolitické OZ

1964 - μ A702

(fa. Fairchild),

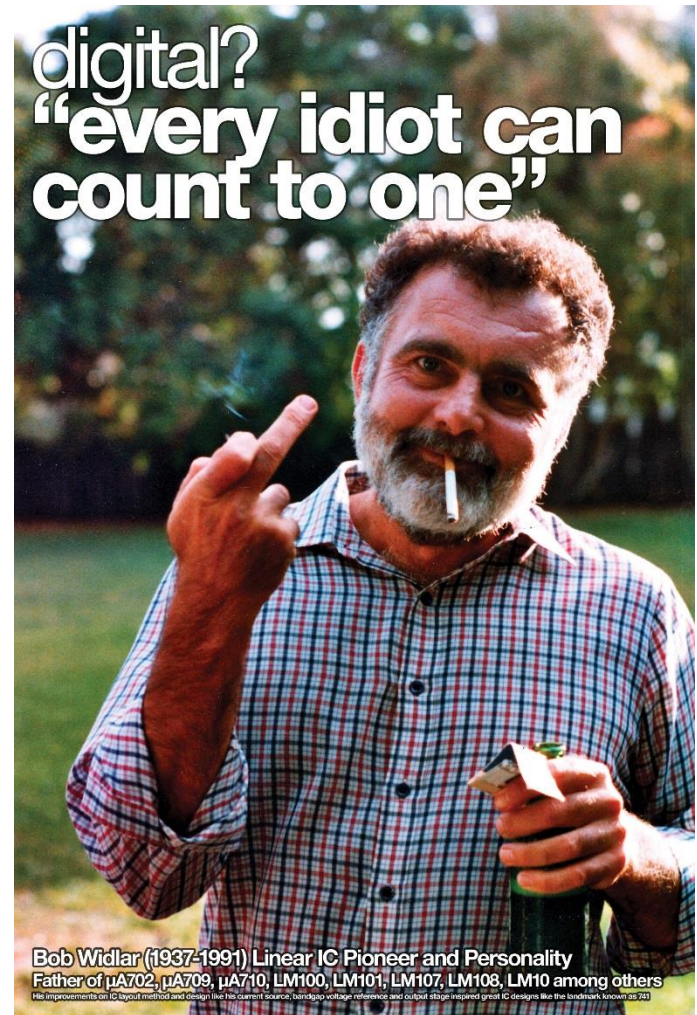
Robert Widlar, USA



*R. Widlar jako "superhrdina
polovodičové revoluce"*

(<https://hackaday.com/2014/04/08/heroes-of-hardware-revolution-bob-widlar/>)

digital?
"every idiot can
count to one"



Bob Widlar (1937-1991) Linear IC Pioneer and Personality
Father of μ A702, μ A709, μ A710, LM100, LM101, LM107, LM108, LM10 among others
His improvements on IC layout method and design like his current source, bandgap voltage reference and output stage inspired great IC designs like the landmark known as 741

(<https://theamphour.com/wp-content/uploads/2011/03/WidlarPosterForDigitalGuys.jpg>)

R. Widlar - autor celé řady dalších
analogových IO: μ A709 (MAA501),
LM100, LM101,...

Operační zesilovač

Historie a vývoj

V současnosti: stovky různých typů OZ od různých výrobců. Liší se parametry, použitou technologií i zapouzdřením:

- s napěťovou zpětnou vazbou - Voltage Feedback
- s proudovou zpětnou vazbou - Current Feedback
- s velkým výstupním proudem - High Output Current ($> 100 \text{ mA}$)
- rychlé OZ - High Speed ($BW > 50 \text{ MHz}$)
- vysokonapěťové - High Voltage ($> 12 \text{ V}$)
- s unipolárním vstupem - JFET Input
- s malými vstupními proudy - Low Input Bias Current ($< 100 \text{ pA}$)
- nízkošumové - Low Noise ($< 10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$)
- s nízkou spotřebou - Low Power ($I_{cc} < 1 \text{ mA}$)
- přesné OZ - Precision ($U_{OS} < 1 \text{ mV}$)
- Rail-to-Rail
- s nulovým teplotním driftem - Zero-Drift
- přístrojové zesilovače – Instrumentation amps.

Měřicí zesilovače

Slouží k zesílení napětí, proudu popř. jako převodník I/U resp. U/I.

Zisk (přenos) zesilovače:

$$A = \frac{X_{out}}{X_{in}} \quad (Y_{out}/Y_{in})$$

X_{out} ...výstupní veličina v jednotkách Y_{out}

X_{in} ... vstupní veličina v jednotkách Y_{in}

Zesilovač	Název	A
$U \rightarrow U$	Napěťový zesilovač	$A = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (-)$
$I \rightarrow I$	Proudový zesilovač	$A = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (-)$
$I \rightarrow U$	Převodník proud-napětí Transimpedanční zesilovač (TIA)	$A = \frac{U_{out}}{I_{in}} \quad (\Omega)$
$U \rightarrow I$	Převodník napětí - proud Transkonduktanční zesilovač (OTA)	$A = \frac{I_{out}}{U_{in}} \quad (S)$



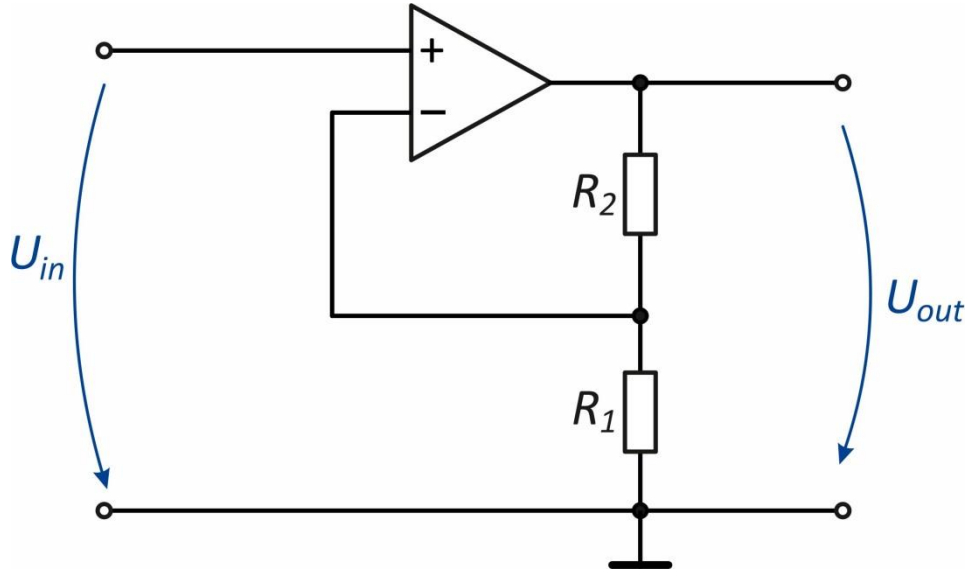
*Měřicí zesilovač 1001022,
3B Scientific Physics, [3]*



*Modul TIA pro měření
pA proudů*

Měřicí zesilovače

Neinvertující zesilovač napětí



$$A = \frac{U_{out}}{U_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (-)$$

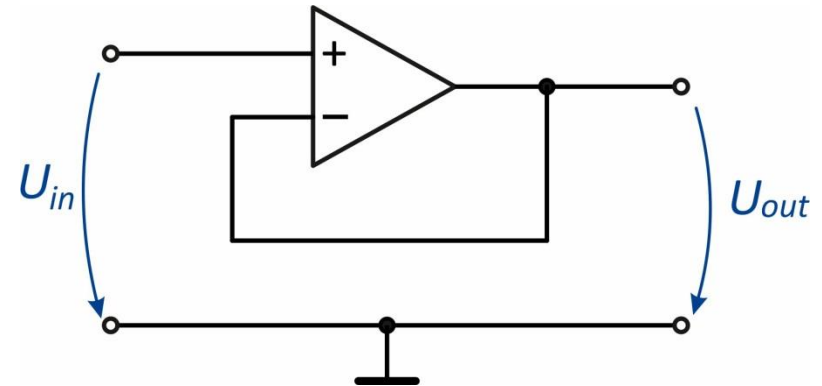
$$R_{in} \rightarrow \infty ,$$

$$R_{out} = 0 \Omega$$

Použití v měřicí technice:

- Zvýšení citlivosti měřidla
- Možnost měřit malá napětí
- Impedanční oddělení
- Zvýšení vstupního odporu

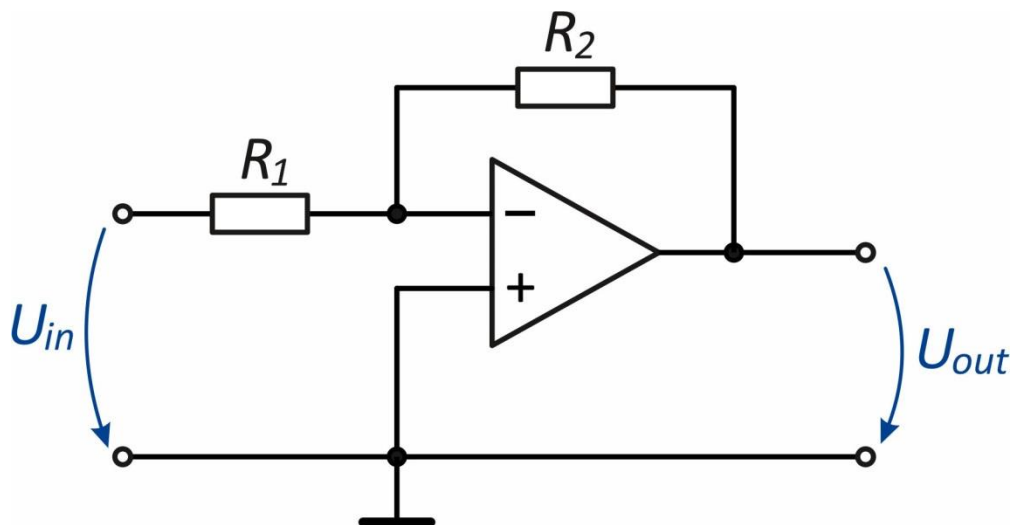
Napěťový sledovač (spec. případ neinvertujícího zesilovače)



$$A = 1$$

Měřicí zesilovače

Invertující zesilovač napětí



$$A = \frac{U_{out}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (-)$$

$$R_{in} = R_1$$

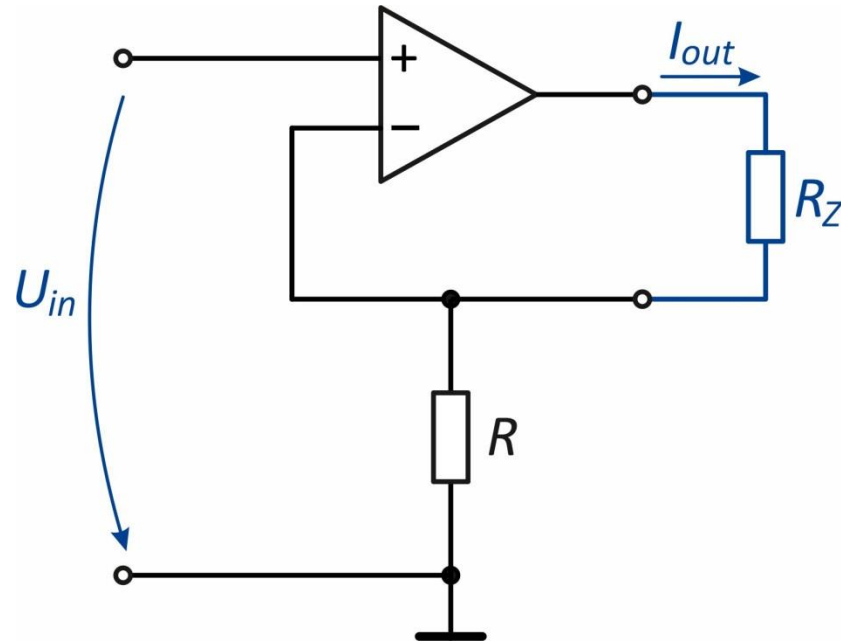
$$R_{out} = 0 \Omega$$

Použití v měřicí technice:

- Zesílení malých napětí (možnost měřit malá napětí)
- Zvýšení citlivosti měřicího přístroje
- Změna polaritý signálu
- Při frekvenčně závislé zpětné vazbě dává možnost potlačení části frekvenčního spektra

Měřicí zesilovače

Neinvertující převodník napětí – proud



$$A = \frac{I_{out}}{U_{in}} = \frac{1}{R} \quad (S)$$

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

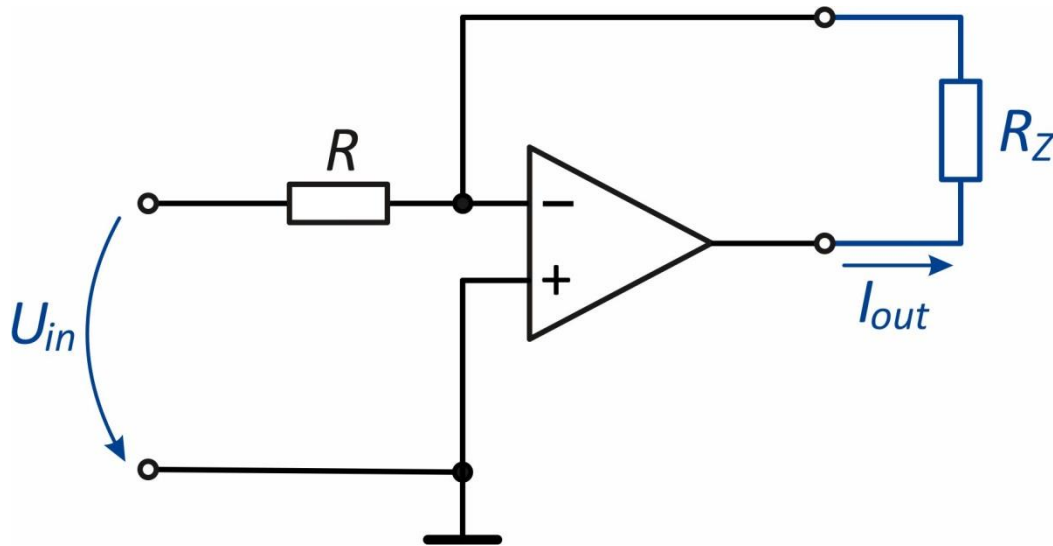
$$R_{out} \rightarrow \infty$$

Použití v měřicí technice:

- Zdroj proudu řízený napětím
- Zdroj konstantního proudu
- Proudový zdroj k napájení odporových snímačů
- Měření odporu

Měřicí zesilovače

Invertující převodník napětí – proud



$$A = \frac{I_{out}}{U_{in}} = -\frac{1}{R} \quad (\text{S})$$

$$R_{in} = R$$

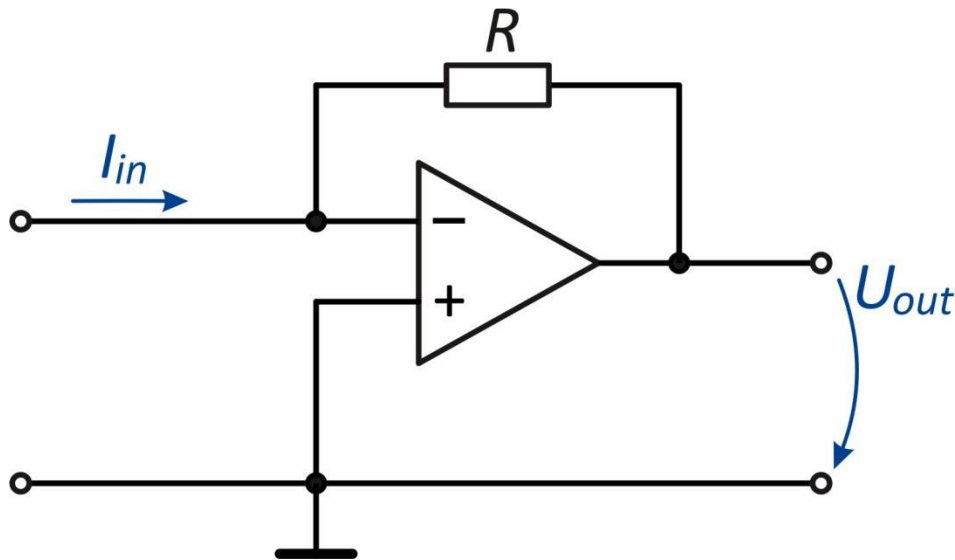
$$R_{out} \rightarrow \infty$$

Použití v měřicí technice:

- Zdroj proudu řízený napětím
- Zdroj konstantního proudu
- Proudový zdroj k napájení odporových snímačů
- Měření odporu

Měřicí zesilovače

Převodník proud – napětí (TIA)



$$A = \frac{U_{out}}{I_{in}} = -R \quad (\Omega)$$

$$R_{in} = 0 \Omega$$

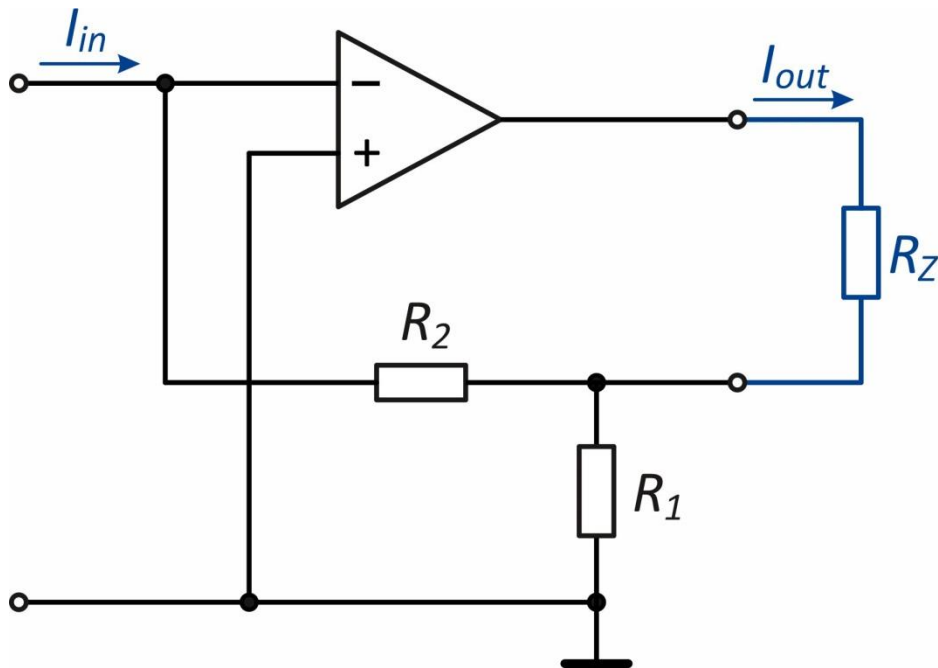
$$R_{out} = 0 \Omega$$

Použití a význam v měřicí technice:

- Měření velmi malých proudů
- Piko-ampérmetry
- Zpracování výstupního signálu fotodiod

Měřicí zesilovače

Převodník proud – proud



$$A = \frac{I_{out}}{I_{in}} = - \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (-)$$

$$R_{in} = 0 \Omega$$

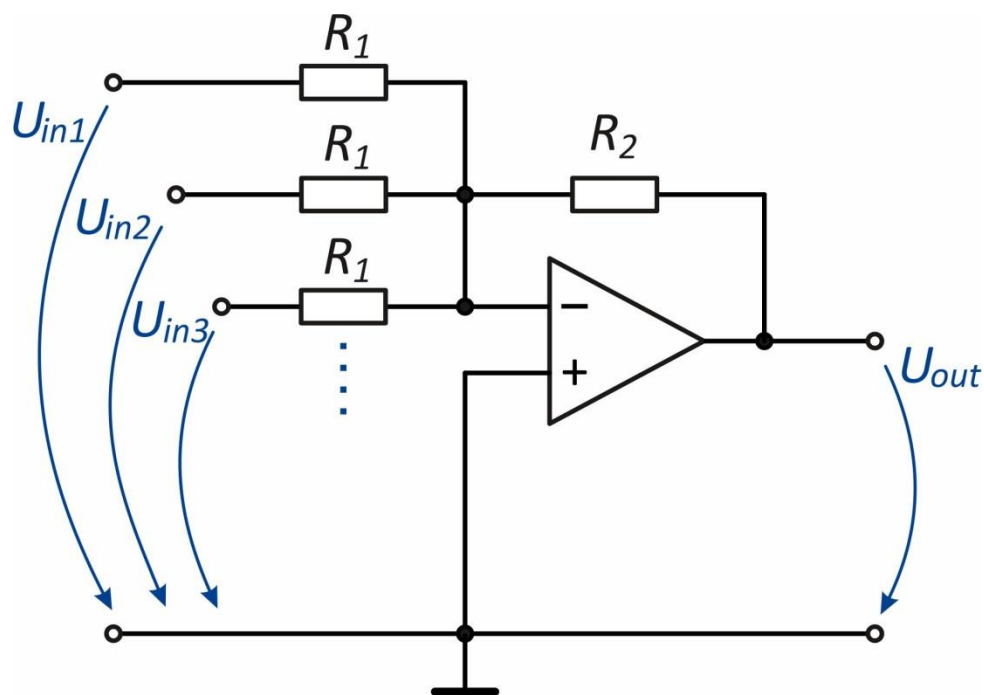
$$R_{out} \rightarrow \infty$$

Použití a význam v měřicí technice:

- Zesilovač proudu
- Měření velmi malých proudů

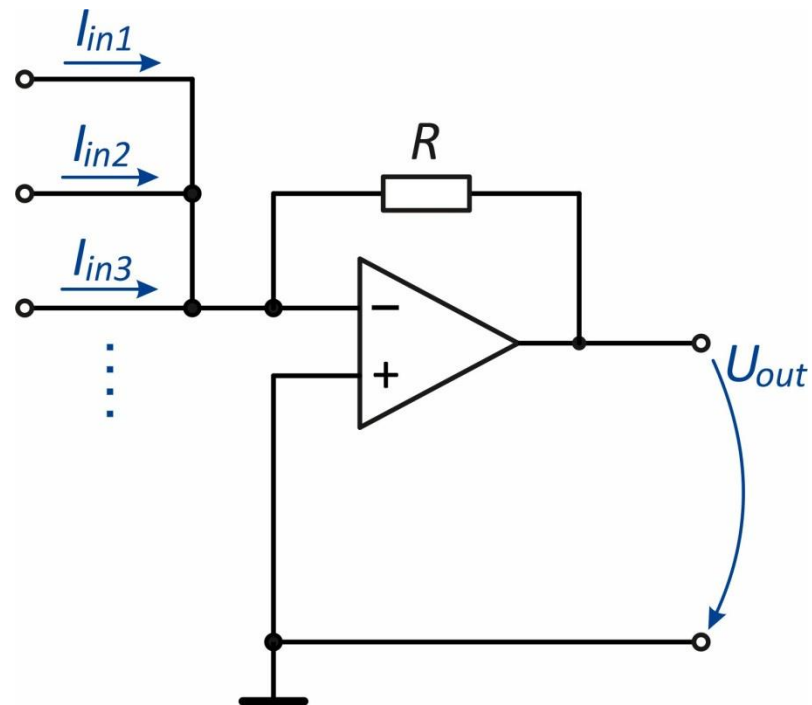
Převodníky pro měření součtu a rozdílu

Sumátor napětí



$$U_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \sum_{k=1}^n U_{ink}$$

Sumátor proudu

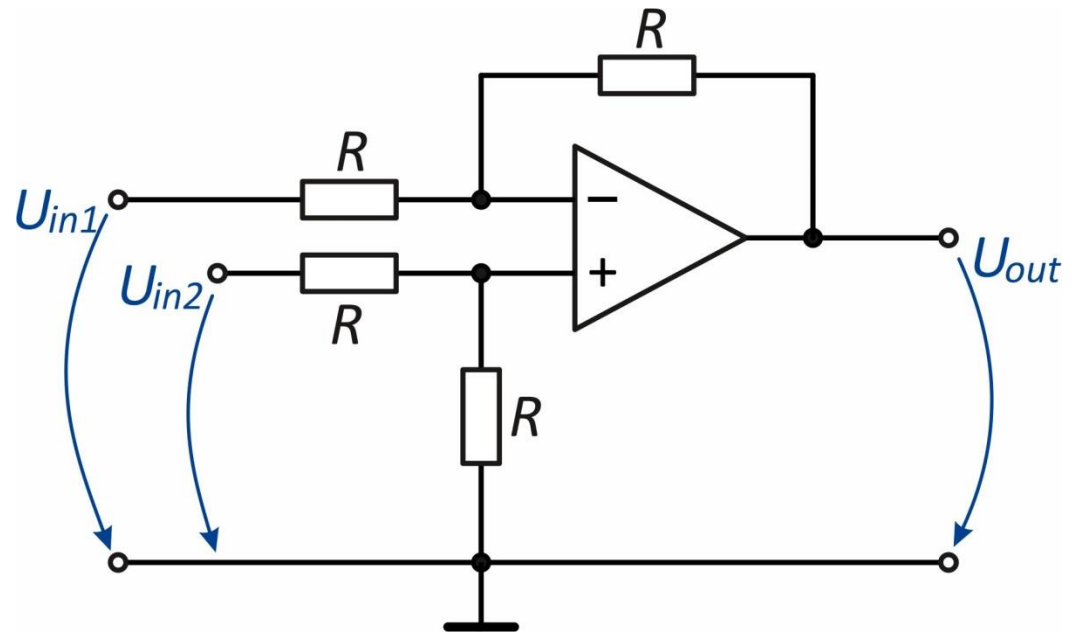


$$U_{out} = -R \sum_{k=1}^n I_{ink}$$

Převodníky pro měření součtu a rozdílu

Rozdílový zesilovač

$$U_{out} = U_{in2} - U_{in1}$$



Použití:

- Měření a zesilování velmi malých rozdílů napětí.
- Snímání napětí v měřicí diagonále můstku.
- Snímání proudu na snímacím rezistoru.

Pozor:

- Rozdílné vstupní odpory
- Velikost odporů je třeba volit s ohledem na odpory zdrojů signálů.
- CMR silně závisí na tolerancích odporů.

Převodníky pro měření součtu a rozdílu

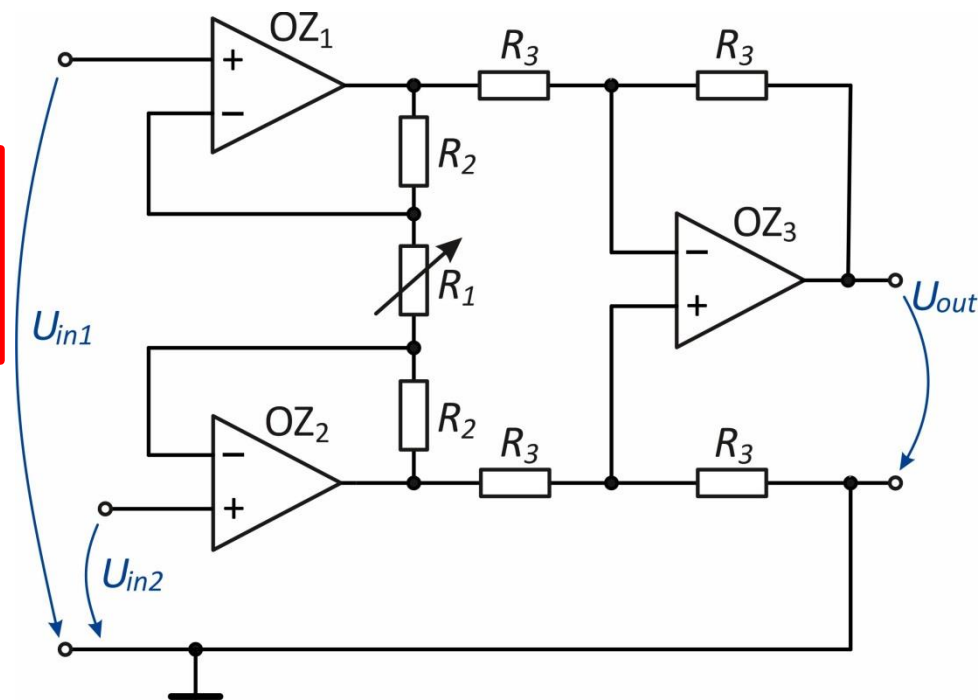
Rozdílový zesilovač

V praxi (zvláště při velkém U_{CM}) je vhodné použít:

- Rozdílový zesilovač s integrovanou laserem trimovanou odporovou sítí tzv. difference amplifier, např. INA117 (U_{CM} až ~ 100 V, CMR = 90 dB)
- Přístrojový zesilovač (U_{CM} až ~ 10 V, CMR > 120 dB)

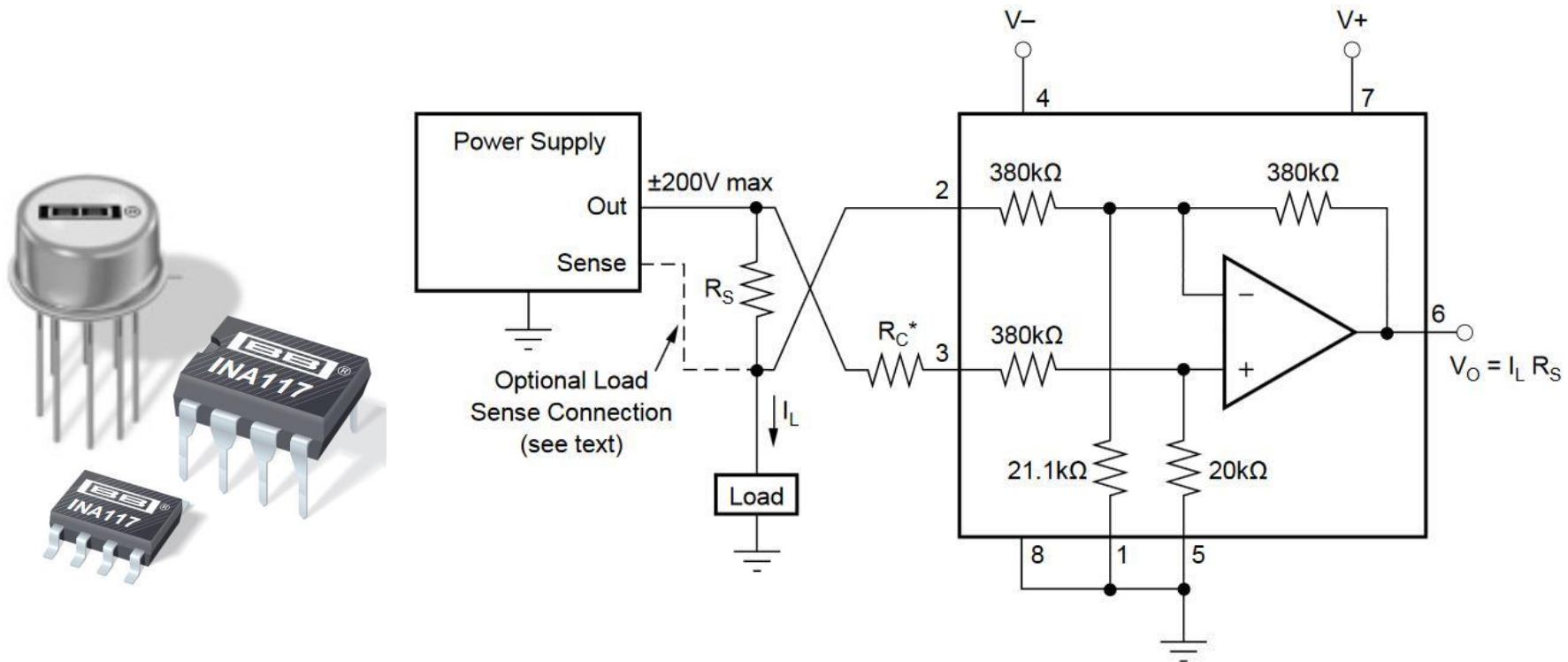
Přístrojový zesilovač

$$U_{out} = (U_{in2} - U_{in1}) \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right)$$



Převodníky pro měření součtu a rozdílu

Příklad: Využití integrovaného diferenčního zesilovače INA117 jako horního snímače proudu. Proud vytvoří úbytek na rezistoru R_S . Úbytek je následně zesílen a posunut obvodem INA117. (Pro snímací rezistory $< 20 \Omega$ není kompenzace rezistorem R_C potřeba.) Souhlasné rušivé napětí se může pohybovat v rozmezí až $\pm 200 \text{ V}$!

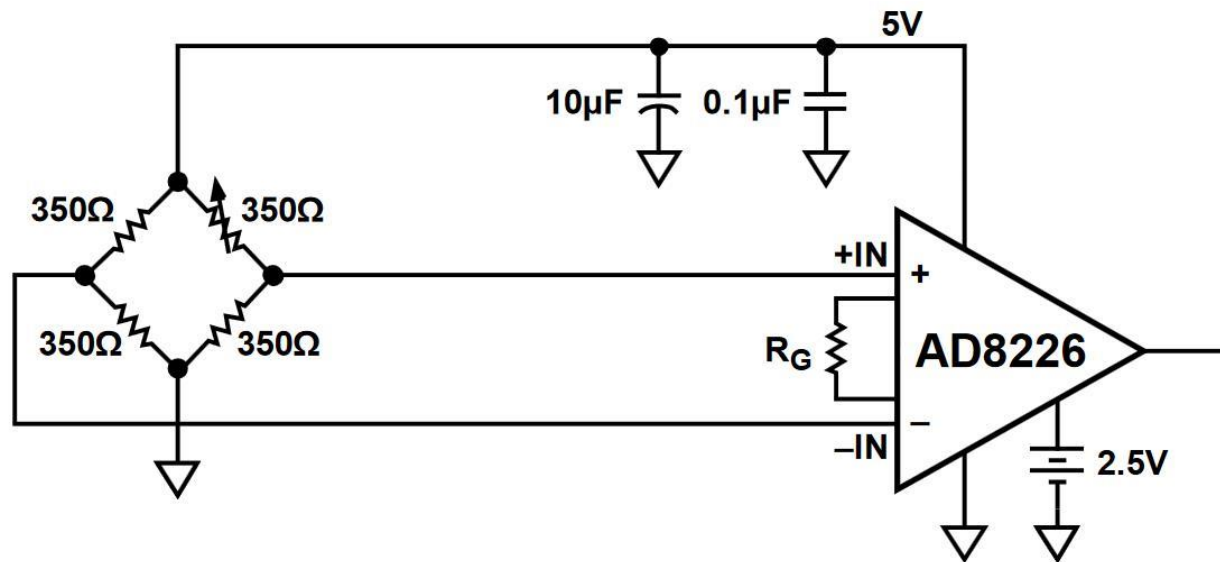


(převzato z [4])

Převodníky pro měření součtu a rozdílu

Příklad: Využití přístrojového zesilovače AD8226 ke snímání napětí měřicí diagonály Wheatstoneova můstku. Zesílení je nastaveno rezistorem R_G . Napětí 2,5 V je přivedeno do referenčního vstupu zesilovače. Pokud je $U_{in} = (U_{+IN} - U_{-IN})$ napětí měřicí diagonály a R_G dosadíme v $k\Omega$, bude pro výstupní napětí zapojení platit:

$$U_o = G(U_{+IN} - U_{-IN}) + U_{ref} = \left(1 + \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{R_G}\right) U_{in} + 2,5 \quad (\text{V})$$



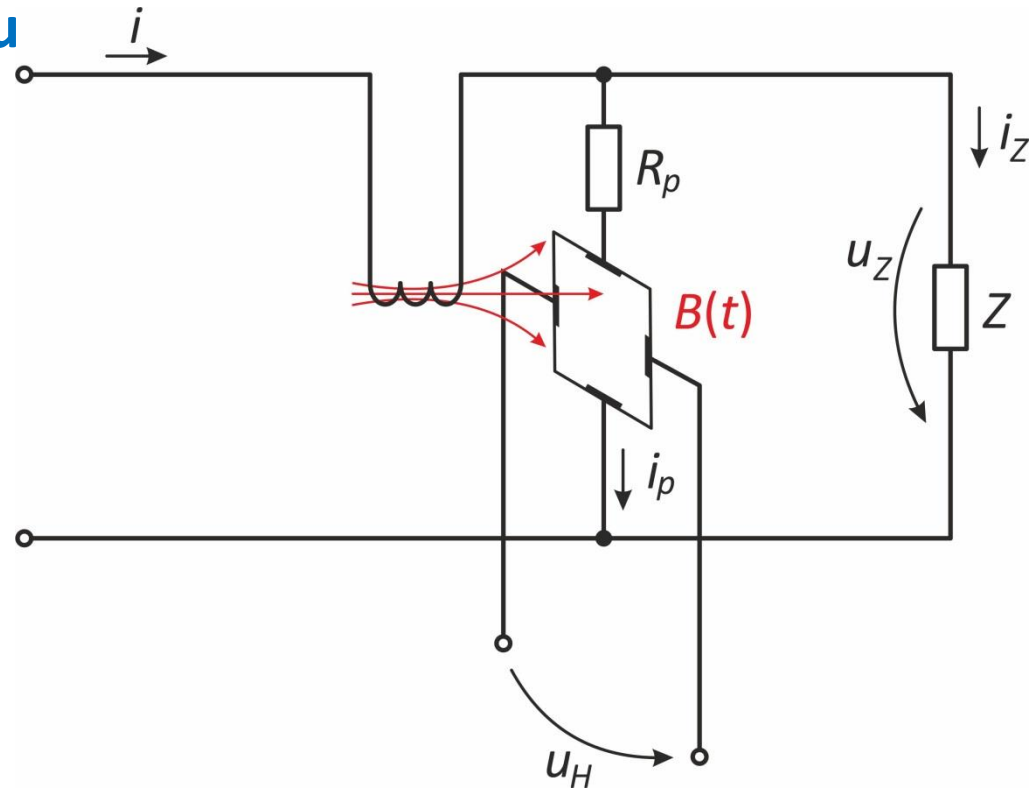
(převzato z [5])

Převodníky proměření součinu a podílu

Násobička s Hallovou sondou

$$u_H(t) = \frac{i_p(t)B(t)}{d} R_H$$

$$u_H(t) = k \frac{R_H}{d} u_Z(t) i_Z(t)$$



k ...konstanta zahrnující vztah mezi proudem $i_p(t)$ a napětím na zátěži a současně indukci $B(t)$ a proudem, který prochází zátěží

$$i_Z(t) \cong i(t), \quad B(t) \sim i(t), \quad i_p(t) \sim u_Z(t)$$

Použití: elektronické W-metry, elektroměry

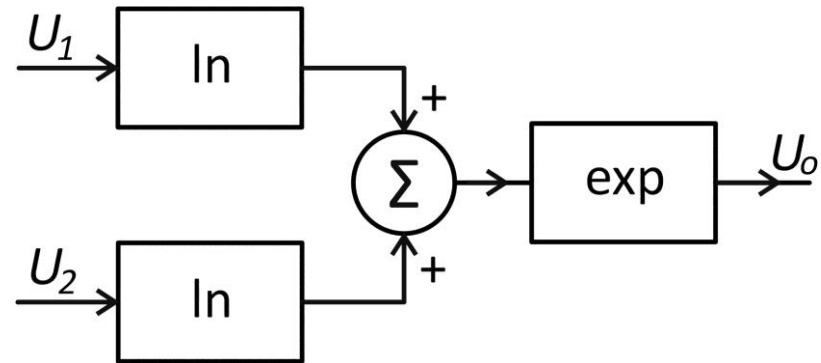
Převodníky proměření součinu a podílu

Násobička logaritmus-exponenciála

ln ...logaritmický zesilovač

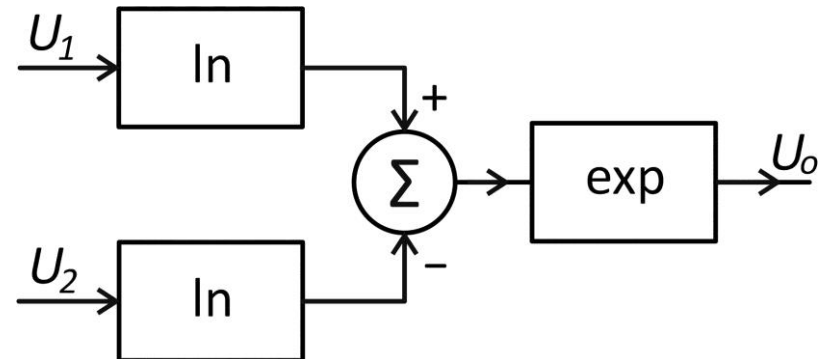
exp ...exponenciální zesilovač

$$U_o = e^{(\ln U_1 + \ln U_2)} = e^{\ln(U_1 U_2)} = U_1 U_2$$



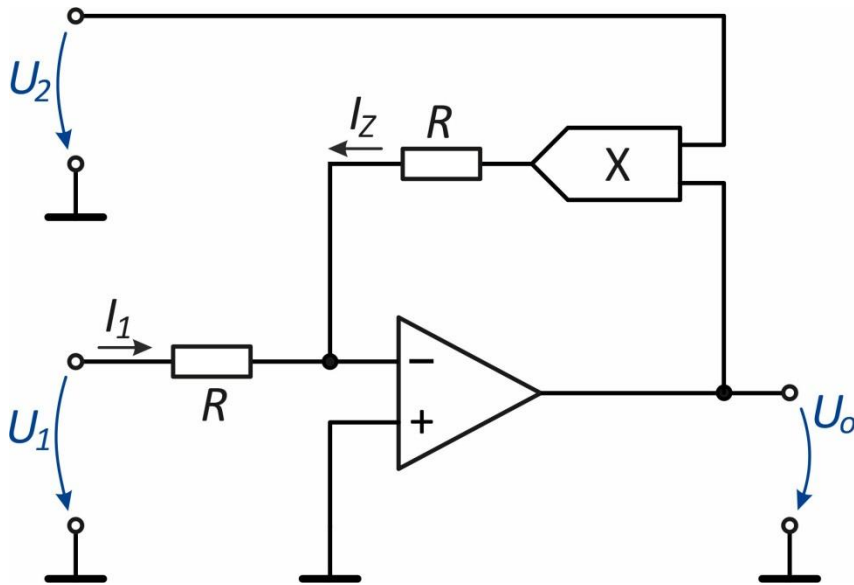
Dělička logaritmus-exponenciála

$$U_o = e^{(\ln U_1 - \ln U_2)} = e^{\ln\left(\frac{U_1}{U_2}\right)} = \frac{U_1}{U_2}$$



Převodníky proměření součinu a podílu

Dělička s násobičkou ve zpětné vazbě



$$U_o = -\frac{U_1}{U_2}$$

Pozn.: Tato dělička je pouze dvou-kvadrantová.

Další typy násobiček:

- Násobička s řízeným zesílením
- Násobička s kvadrátory
- Násobička s amplitudově-šířkovou modulací

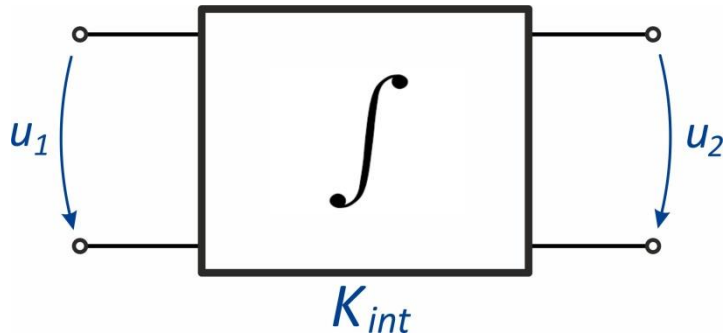
Použití násobiček:

- Realizace mat. funkcí pro zpracování signálu v měřicím řetězci (násobení, dělení, odm.)
- Měření skutečné efektivní hodnoty průběhu
- Násobení kmitočtu

Příklady násobiček: AD633, AD734, AD834...

Převodníky pro měření časového integrálu

Ideální integrátor



$$u_2(t) = \frac{1}{K_{int}} \int_0^t u_1(t) dt$$
$$\text{resp. } \int_0^t u_1(t) dt = K_{int} u_2(t)$$

Chování integrátoru lze nejlépe posoudit z frekv. charakteristiky nebo z odezvy na jednotkový skok.

Komplexní přenos:

$$\bar{A} = \frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}} = \frac{1}{j\omega K_{int}}$$

Velikost přenosu:

$$A = |\bar{A}| = \sqrt{\text{Re}^2(\bar{A}) + \text{Im}^2(\bar{A})} = \frac{1}{\omega K_{int}}$$

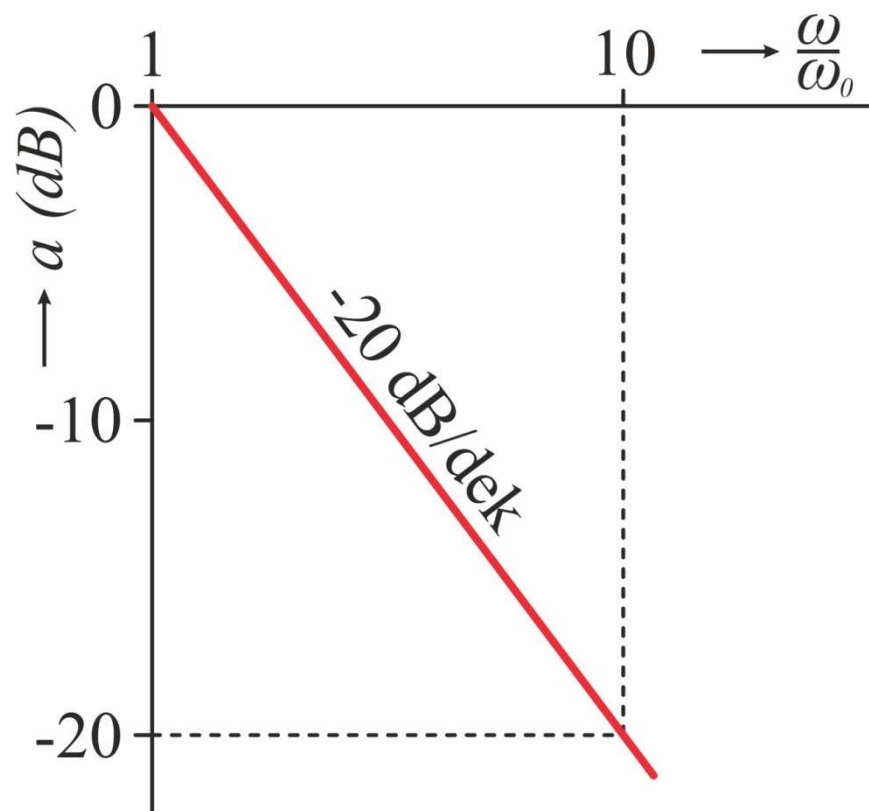
Převodníky pro měření časového integrálu

Ideální integrátor

Amplitudová charakteristika:

$$a = 20 \log(A) = -20 \log \omega K_{int} =$$

$$= \left| \omega_0 = \frac{1}{K_{int}} \right| = -20 \log \frac{\omega}{\omega_0}$$



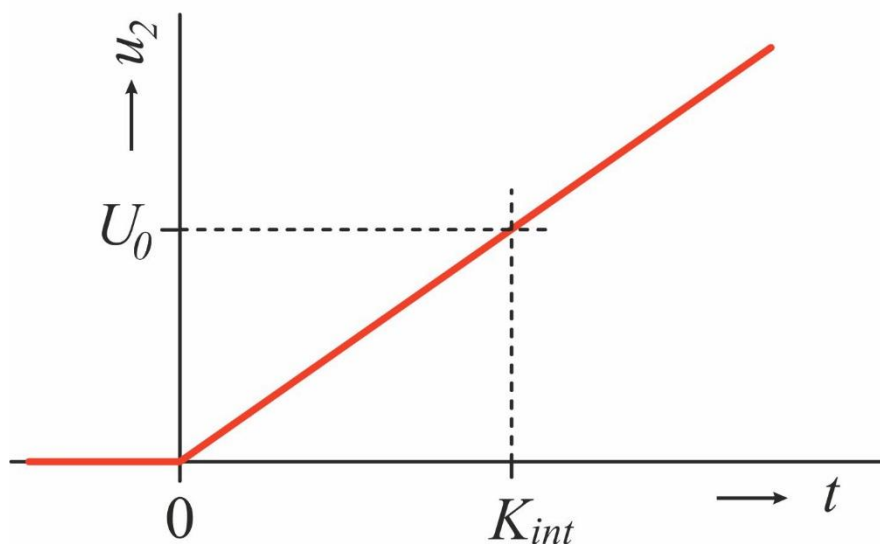
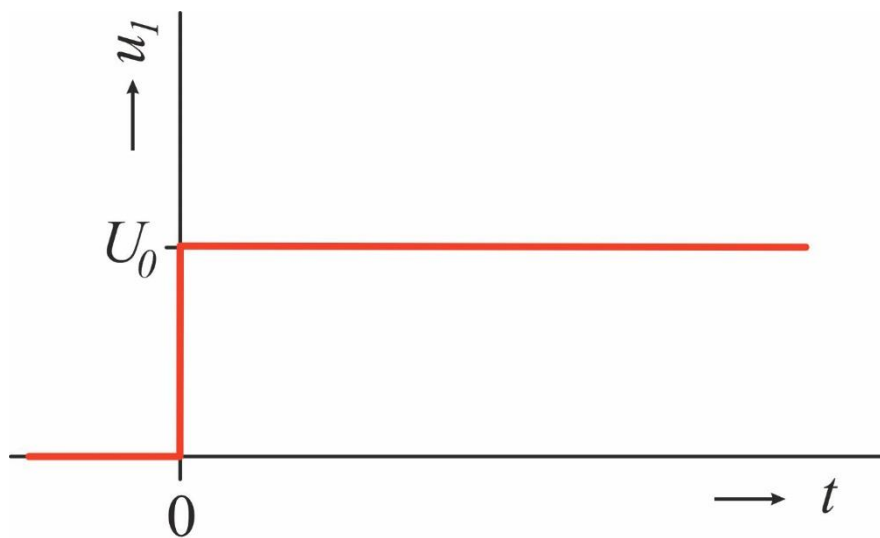
Převodníky pro měření časového integrálu

Ideální integrátor

Odezva na jednotkový skok:

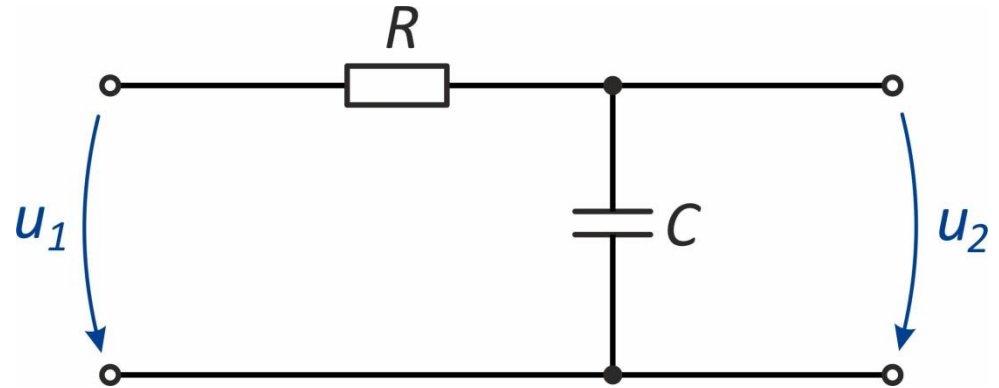
$$u_1(t) = 0 \quad \text{pro } t < 0$$
$$u_1(t) = U_0 \quad \text{pro } t \geq 0$$

$$u_2(t) = \frac{1}{K_{int}} \int_0^t u_1(t) dt =$$
$$= \frac{1}{K_{int}} \int_0^t U_0 dt = \frac{U_0}{K_{int}} t$$



Převodníky pro měření časového integrálu

Pasivní integrátor



Komplexní přenos:

$$\bar{A} = \frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \dots = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Velikost přenosu:

$$A = |\bar{A}| = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\bar{A}) + \operatorname{Im}^2(\bar{A})} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$$

Převodníky pro měření časového integrálu

Pasivní integrátor

Amplitudová charakteristika:

$$a = 20 \log(A) = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} = \dots = -10 \log(1 + \omega^2 R^2 C^2) =$$

$$= \left| \omega_0 = \frac{1}{RC} \right| =$$

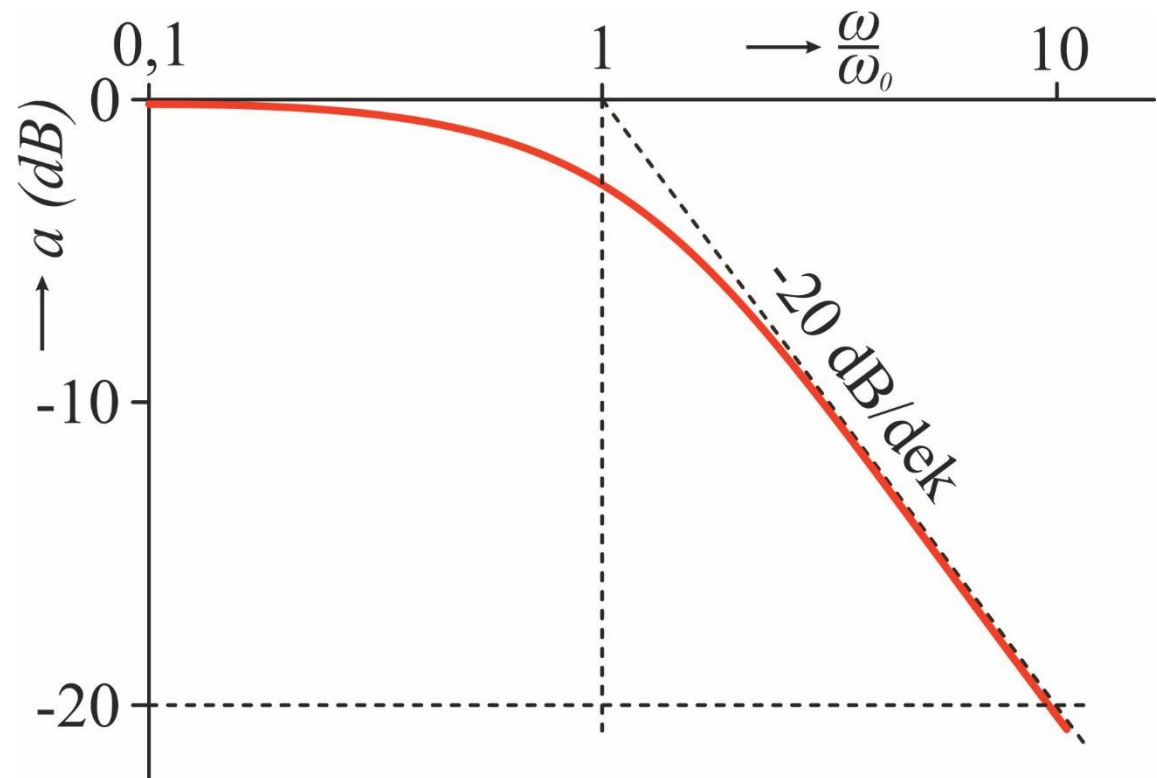
$$= -10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]$$

Pro $\omega \ll \omega_0$ je

$$a \cong 0$$

Pro $\omega \gg \omega_0$ je

$$a \cong -20 \log \frac{\omega}{\omega_0}$$



Převodníky pro měření časového integrálu

Pasivní integrátor

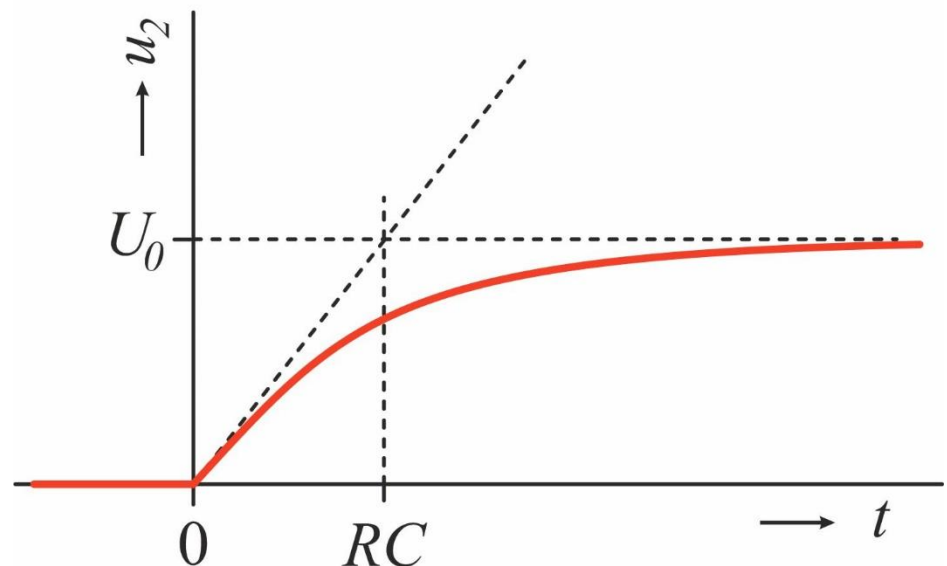
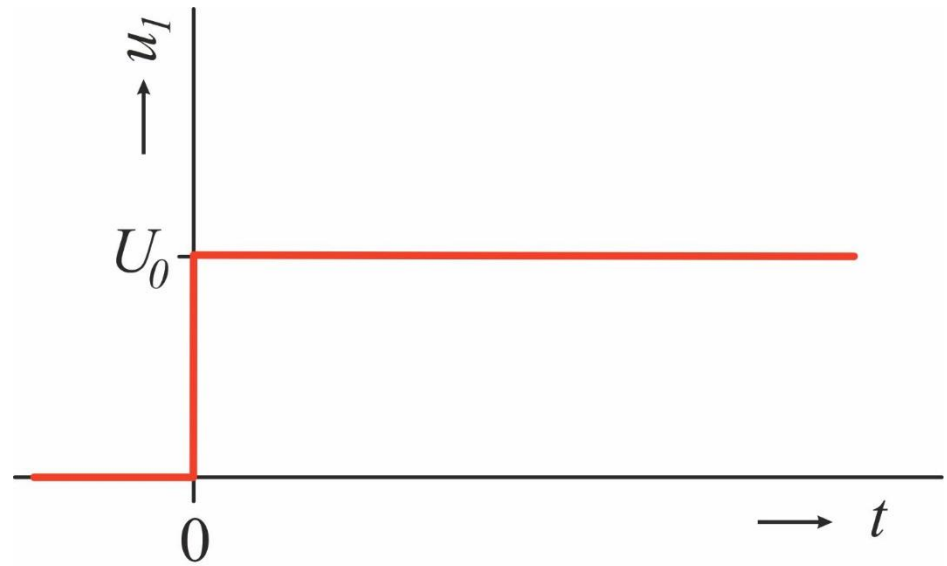
Odezva na jednotkový skok:

$$u_2(t) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

kde

$$\tau = RC$$

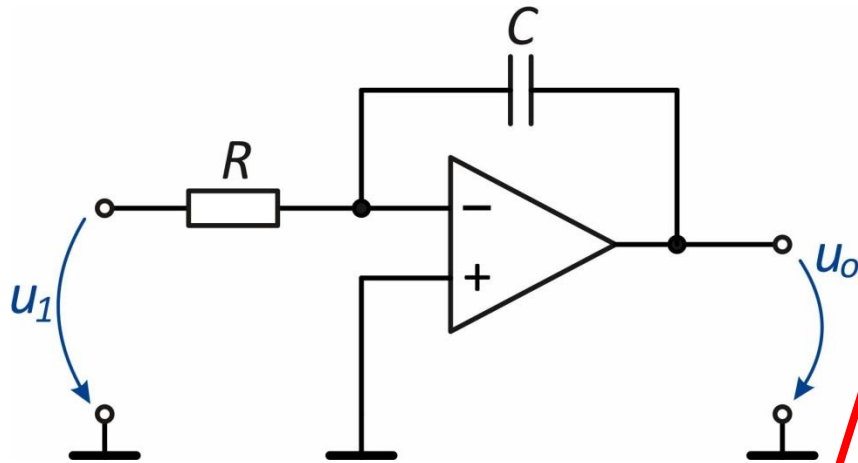
(časová konstanta resp.
integrační konstanta)



Převodníky pro měření časového integrálu

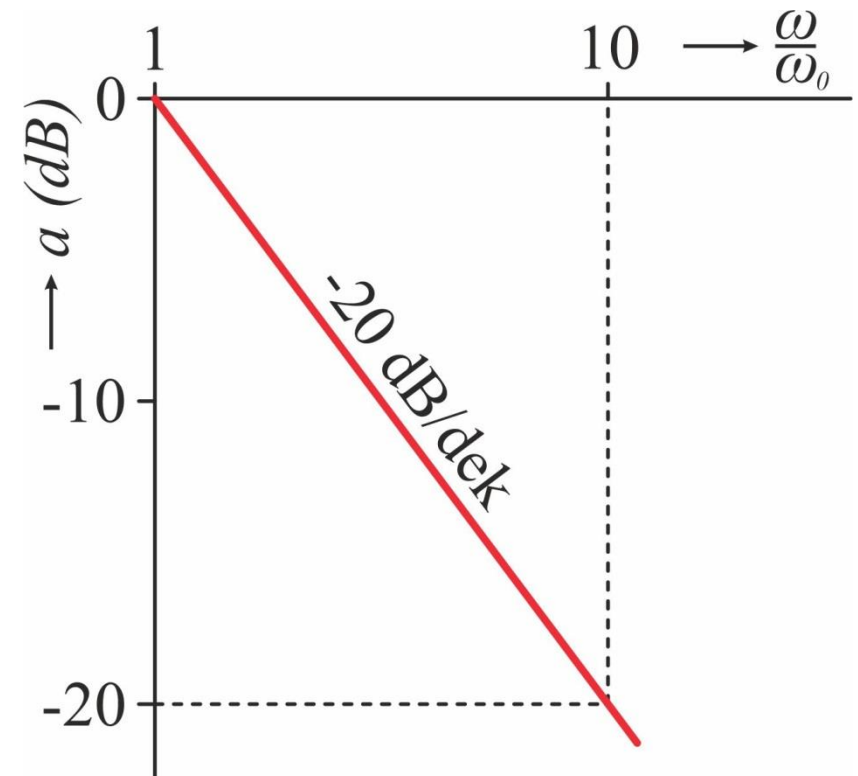
Analogový invertující integrátor s OZ

tzv. Millerův integrátor



Vztah odpovídá definičnímu vztahu pro ideální integrátor kde $K_{int} = -RC$.

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_1(t) dt$$



Převodníky pro měření časového integrálu

Analogový invertující integrátor s OZ

Odezva na jednotkový skok:

$$u_1(t) = 0 \quad \text{pro } t < 0$$

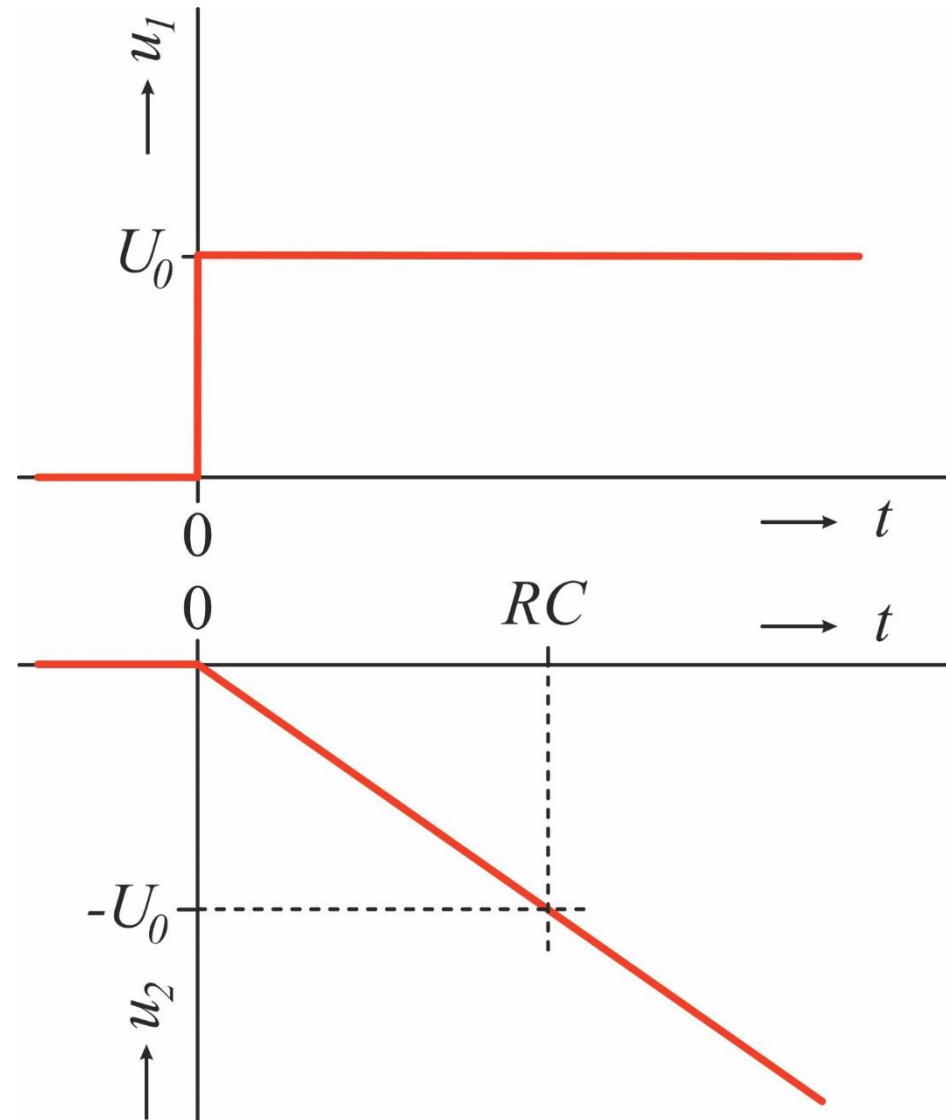
$$u_1(t) = U_0 \quad \text{pro } t \geq 0$$

$$u_2(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_1(t) dt =$$

$$= -\frac{1}{RC} \int_0^t U_0 dt = -\frac{U_0}{RC} t$$

Chování integrátoru ovlivňují parametry reálného OZ:

- Konečný zisk
- Vstupní napěťový offset
- Vstupní klidové proudy
- Šum



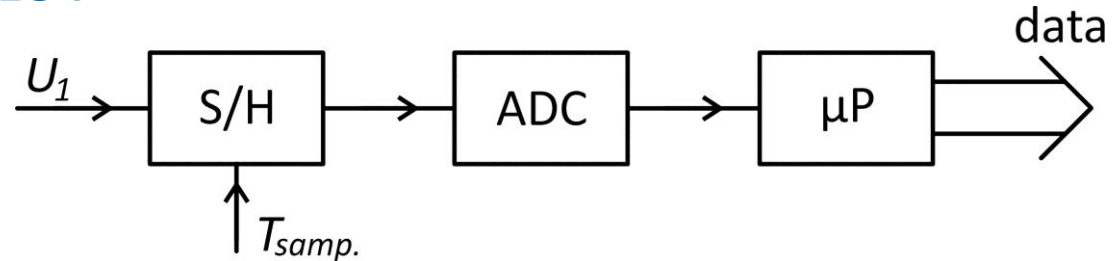
Převodníky pro měření časového integrálu

Digitální integrátor – verze I

S/H...vzorkovací obvod

ADC...A/D převodník

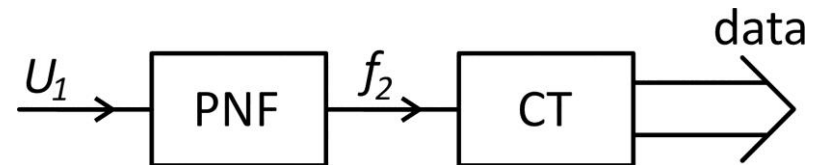
μ P...mikropočítač



Digitální integrátor – verze II

PNF... převodník napětí/frekvence

CT...čítač

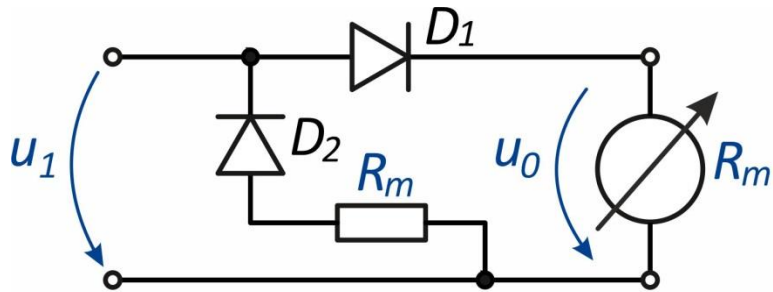


Použití integrátoru v měřicí technice:

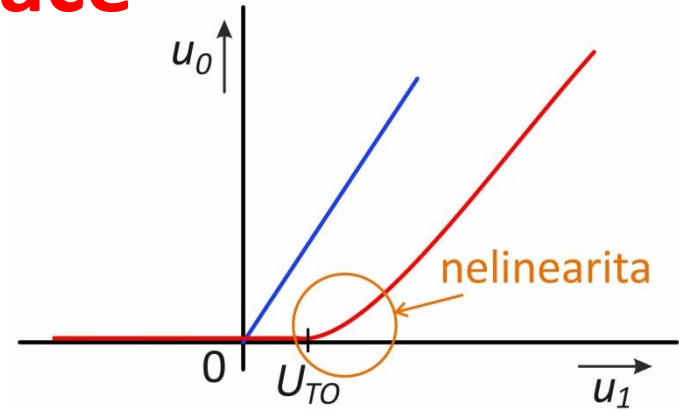
- Integrační A/D převodník
- Měření střední hodnoty malých napětí
- Fluxmetr
- Filtrace (LPF)
- Měření velkých odporů

Elektronické usměrňovače

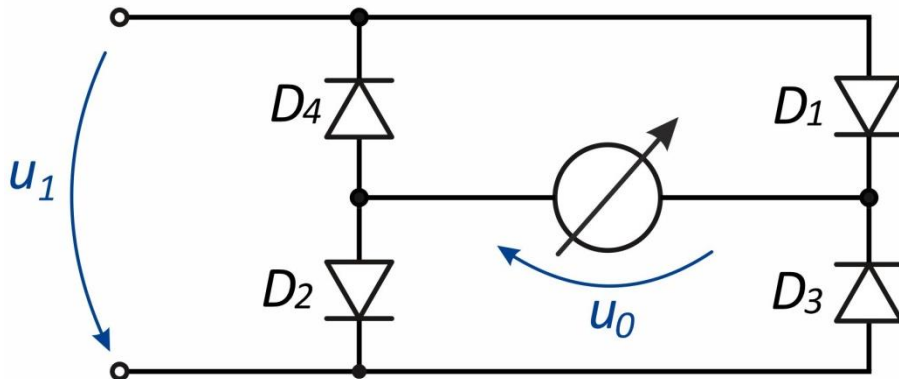
Pasivní usměrňovače



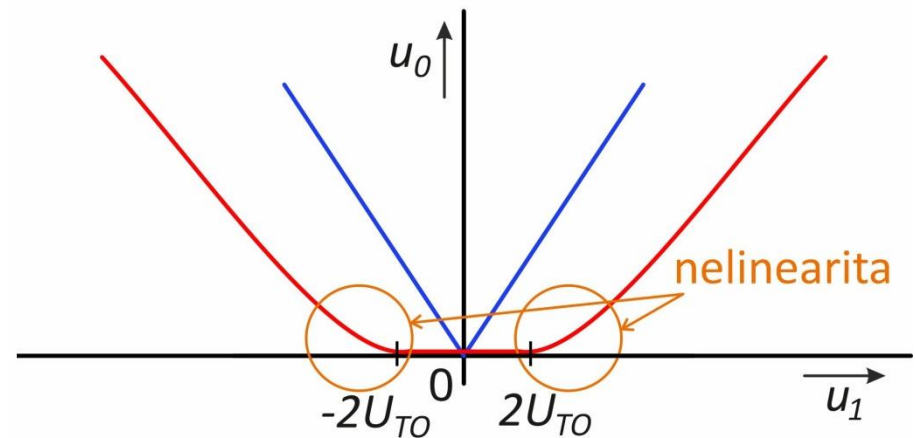
Jednocestný usm.



Převodní charakteristika



Dvoucestný usm.



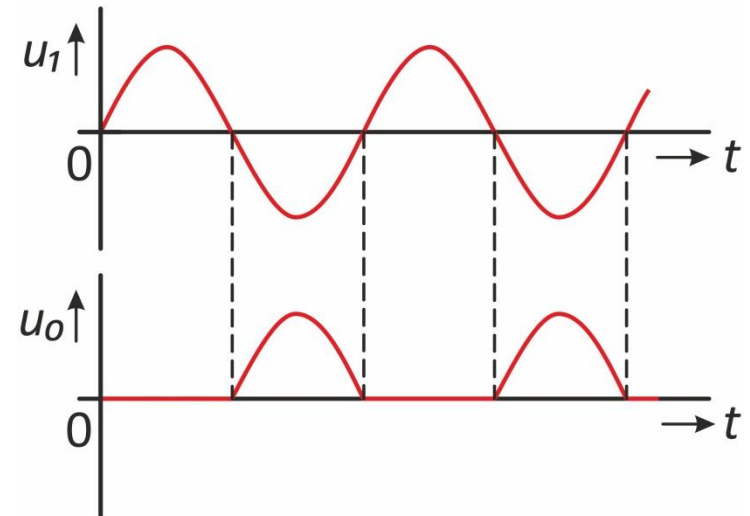
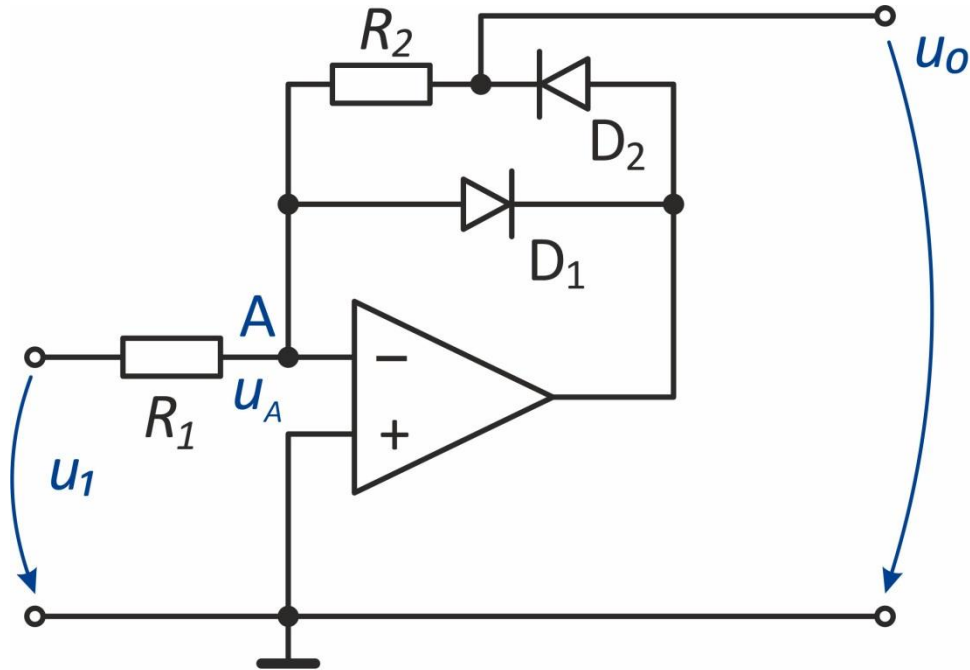
Převodní charakteristika

Při měření napětí a proudů vadí:

- Prahová napětí diod (nelze měřit malá napětí)
- Nelinearita VA charakteristik diod (stupnice je nelineární)

Elektronické usměrňovače

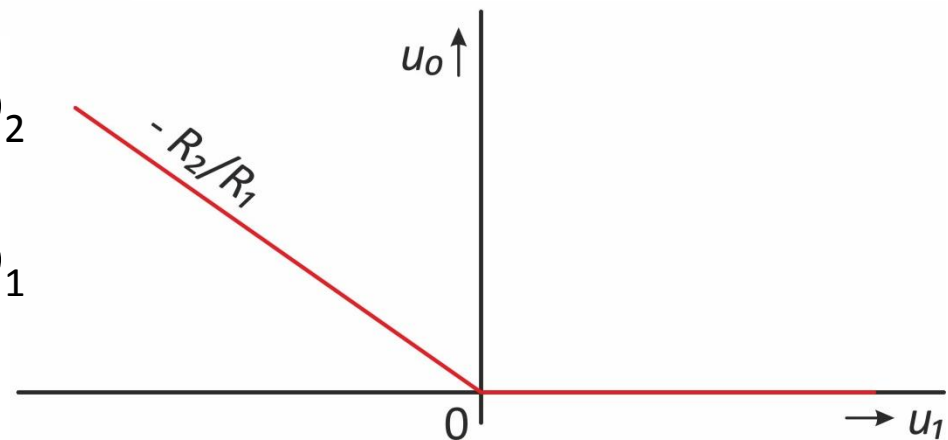
Jednocestný invertující aktivní usm.



Vstupní a výstupní průběh

- Při $u_1 > 0$ je D_1 otevřena a D_2 zavřena. Na výstupu je 0 V.
- Při $u_1 < 0$ je D_2 otevřena a D_1 zavřena.

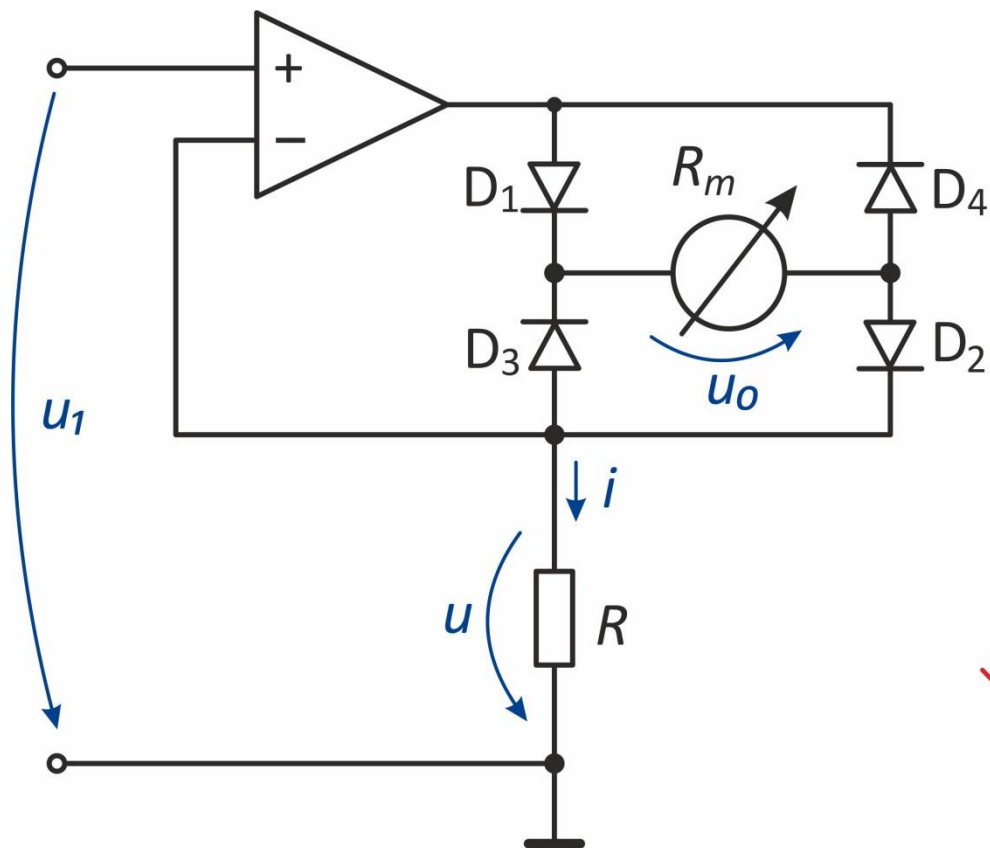
$$u_0 = -\frac{R_2}{R_1} u_1$$



Převodní charakteristika

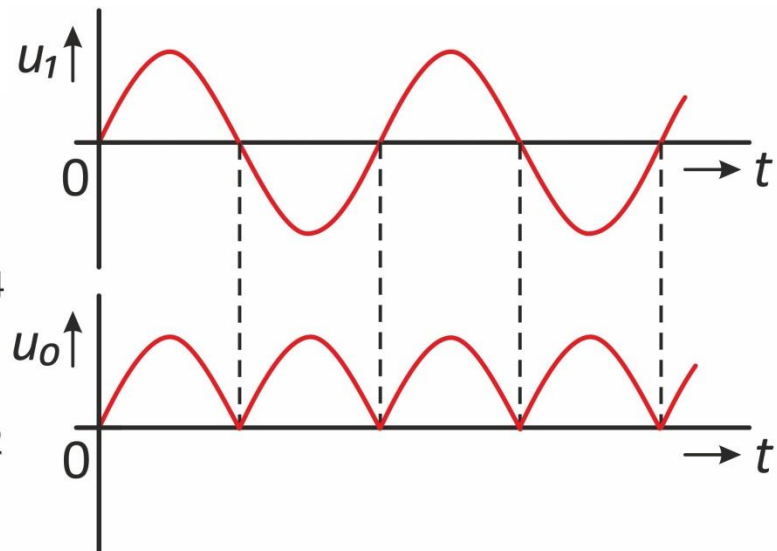
Elektronické usměrňovače

Dvoucestný aktivní usměrňovač

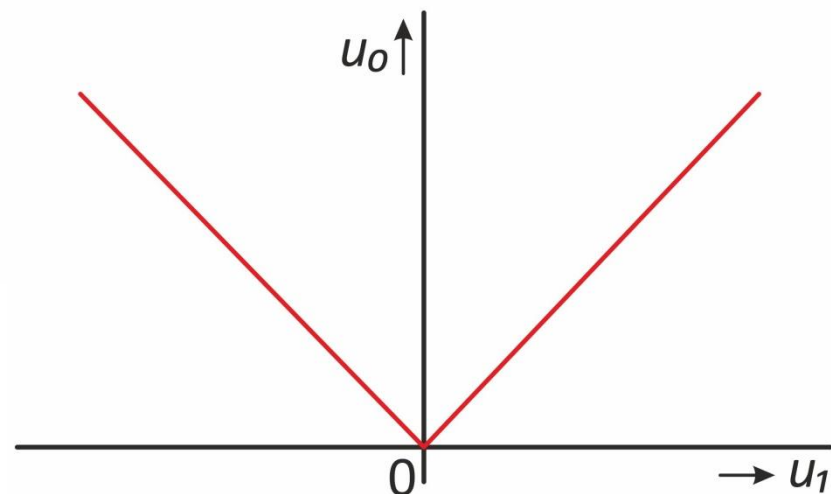


$$u_o = \frac{|u_1|}{R} R_m$$

Viz zdroj proudu řízený napětím.



Vstupní a výstupní průběh



Převodní charakteristika

Převodníky pro měření efektivní hodnoty

(tzv. **True RMS** převodníky)

Výstupem převodníku je DC hodnota U_o odpovídající efektivní hodnotě U_{RMS} vstupního střídavého napětí $u(t)$. Důležitá je nezávislost převodu na tvaru průběhu vstupního signálu.

$$U_o = U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

T ...perioda střídavého průběhu

(Pro stochastický signál by mělo být $T \rightarrow \infty$)

Dle principu existují True RMS převodníky:

- výpočtové (analogová nebo dig. realizace definičního integrálu)
- tepelné (využívají fyzikální podstatu efektivní hodnoty, efektivní hodnota = tepelná hodnota)

Převodníky pro měření efektivní hodnoty

Přímý výpočtový převodník True RMS/ V_{DC}



KV...kvadrátor (realizace druhé mocniny)

DP...dolní propust (realizace výpočtu střední hodnoty - integrál)

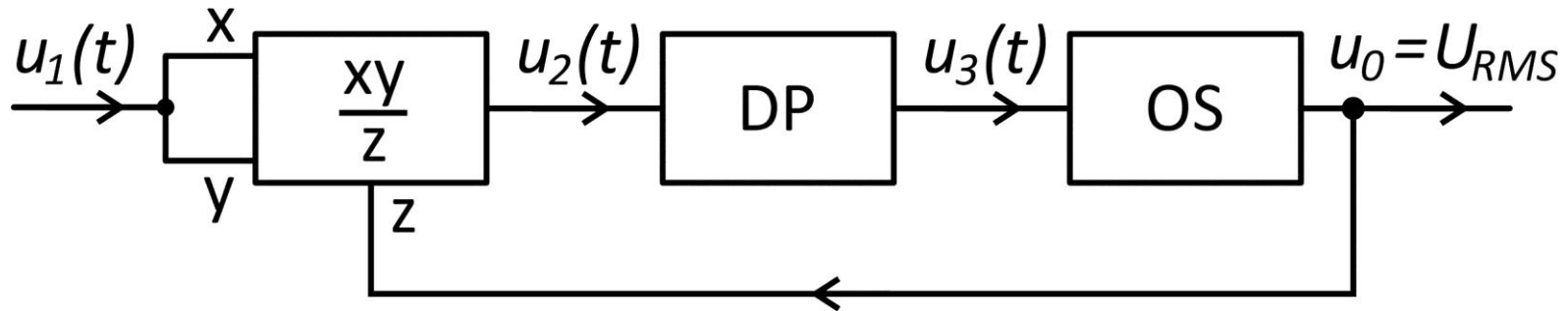
ODM...blok realizující odmocninu

Vlastnosti:

- Frekvenční rozsah až 100 MHz
- Dynamický rozsah jen cca 40 dB (tj. 100:1)

Převodníky pro měření efektivní hodnoty

Nepřímý výpočtový převodník True RMS/V_{DC}



XY/Z...kvadrátor-dělička

DP...dolní propust

OS...oddělovací stupeň (sledovač)

$$U_o = U_{RMS} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u^2(t)}{U_{RMS}} dt \Rightarrow U_o = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Vlastnosti:

- Frekvenční rozsah menší než přímý převodník
- Dynamický rozsah větší než přímý převodník

Převodníky pro měření efektivní hodnoty

Pasivní tepelný převodník True RMS/V_{DC}

Topný drát + termočlánek, Teplo vyvíjené průchodem AC proudu $i(t)$ topným drátem je úměrné efektivní hodnotě tohoto proudu (+ měření DC napětí - viz systém d'Arsonval, konec. 19. stol).

$$U_t \cong S_{AB}(\vartheta_2 - \vartheta_1) = \left| \begin{array}{l} \text{pokud} \\ \vartheta_2 \gg \vartheta_1 \end{array} \right| \cong S_{AB}\vartheta_2$$

$$U_t = S_{AB}kR_t I_{RMS}^2$$

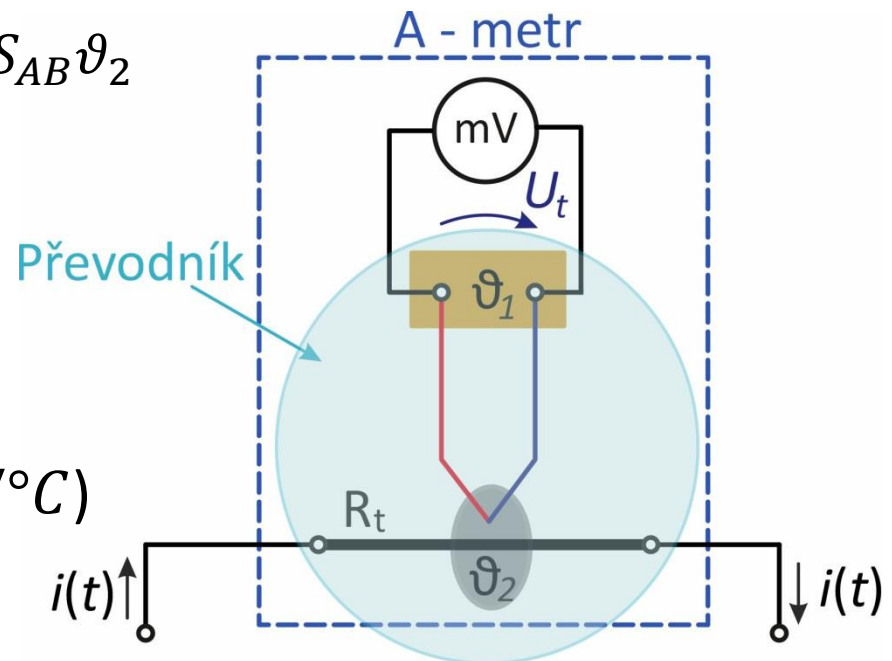
R_t ...odpor topného drátu

ϑ_2 ...teplota topného drátu

ϑ_1 ...teplota na svorkách přístroje

S_{AB} ...Seebeckova konstanta ($\mu V / ^\circ C$)

k ...přepočet příkon/teplota

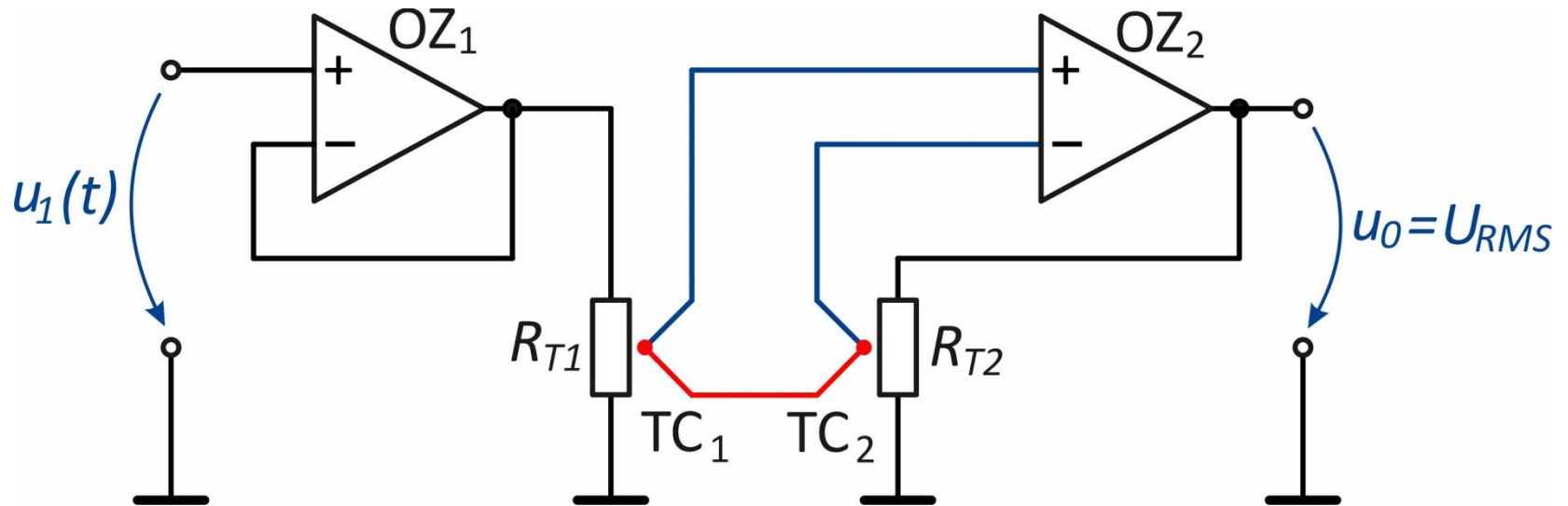


Problém:

- Závislost termoel. napětí na teplotním rozdílu není lineární.
- Není kompenzována teplota studeného konce ϑ_1 .

Převodníky pro měření efektivní hodnoty

Zpětnovazební tepelný převodník True RMS/V_{DC}



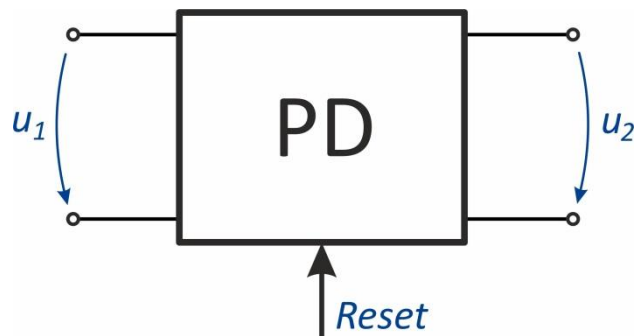
R_{T1}, R_{T2} ...topné články
 TC_1, TC_2 ...termočlánky

Příklady integrovaných převodníků True RMS/V_{DC}

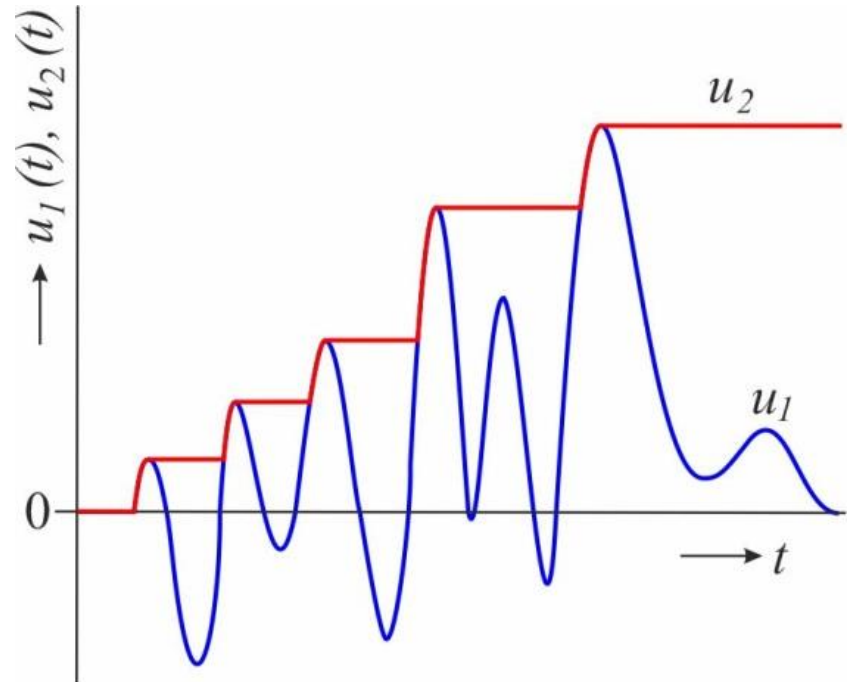
- AD536, AD636, AD736, AD8436, LTC1966...(výpočtové)
- LT1088 (tepelný)

Špičkové detektory

- Špičkový detektor (**Peak Detector - PD**) sleduje maximální hodnotu napětí. Dle způsobu zapojení umožňuje měřit kladná nebo záporná maxima napěťových průběhů.
- Hlavní význam: Měření maxima impulzních signálů z různých detektorů (optické snímače, měřiče jaderného záření, měření částečných výbojů izolačních materiálů atd.)

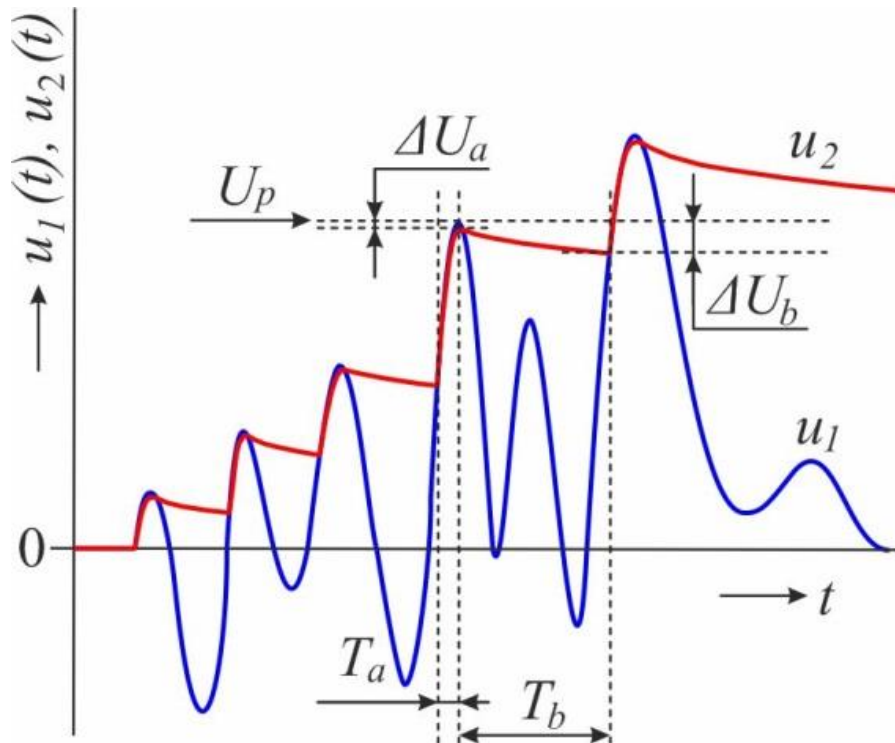
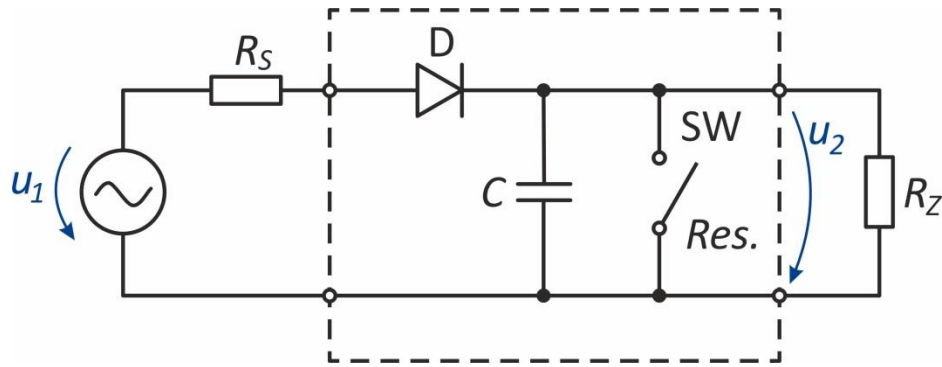


Reset umožňuje vynulování dosaženého maxima (většinou polovodičový spínač).



Špičkové detektory

Pasivní PD



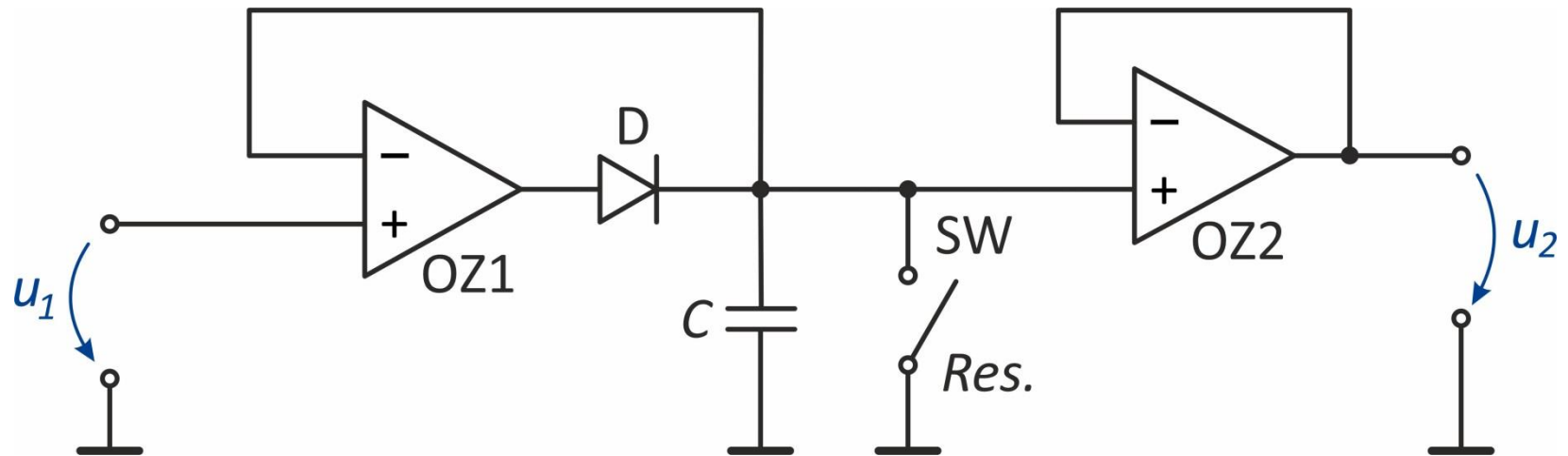
- Při $u_1 > (u_2 + U_D)$ se C nabíjí (interval T_a).
- Po dosažení špičkové hodnoty $u_1 = U_p$ je na výstupu napětí:
$$u_2 = U_p - \Delta U_a$$
- Velikost ΔU_a je ovlivněna nabíjecí časovou konstantou τ_n
$$\tau_n = C(r_d + R_s)$$
- Po uplynutí doby T_b klesne výstupní napětí o ΔU_b a bude:
$$u_2 = U_p - \Delta U_a - \Delta U_b$$
- Velikost ΔU_b je ovlivněna vybíjecí časovou konstantou τ_v

$$\tau_v = C \left(R_z \parallel \frac{1}{G_c} \right)$$

Špičkové detektory

Aktivní PD

Zapojení I.

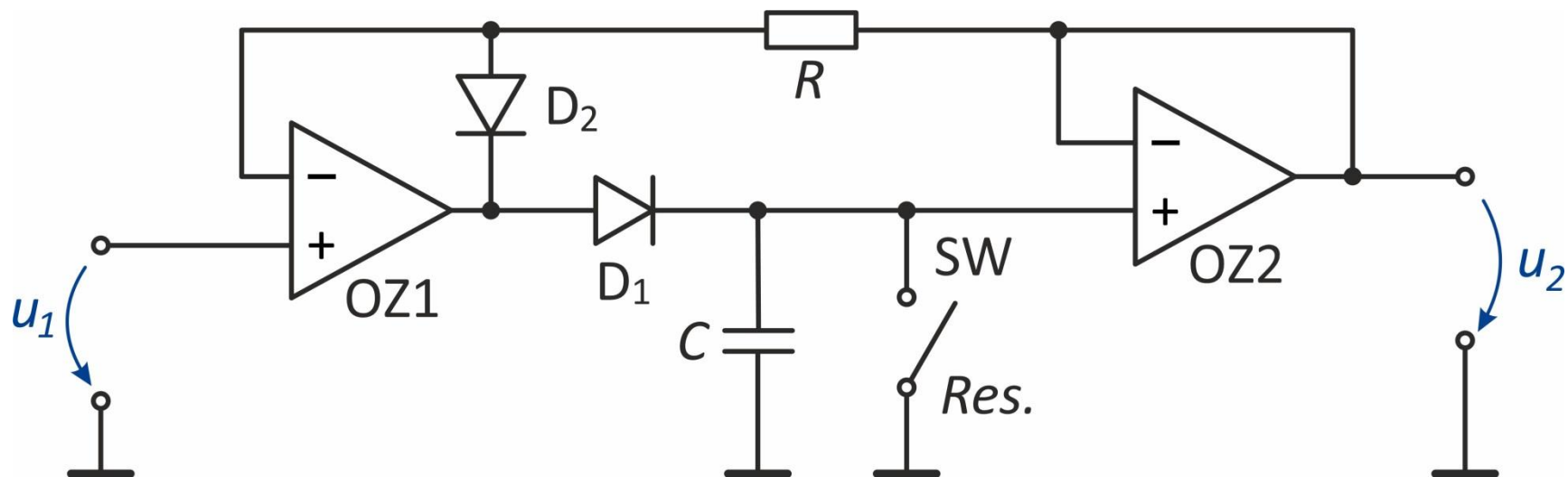


- Nabíjení kondenzátoru je téměř okamžité a nezávislé na vnitřním odporu R_s měřeného zdroje
- Odpor zátěže R_z neovlivňuje vybíjení kondenzátoru C .
- Stále vadí závěrný proud diody (Při $u_1 < u_c$ je na výstupu OZ_1 napětí $-U_{sat}$)

Špičkové detektory

Aktivní PD

Zapojení II.



- Nabíjení kondenzátoru je téměř okamžité a nezávislé na vnitřním odporu R_s měřeného zdroje
- Odpor zátěže R_z neovlivňuje vybíjení kondenzátoru C .
- Závěrný proud diody D_1 je minimalizován (výstupu OZ_1 neklesá pod hodnotu $u_1 - U_{D2}$).

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018.
- [2] Ragazzini J. R., Randall R. H., Russell F. A.: Analysis of Problems in Dynamics by Electronics Circuits, Proceedings of I.R.E., May 1947.
- [3] 3B Scientific Physics: Measurement amplifier 1001021, 1001022, Data Sheet, <https://www.3bscientific.com>
- [4] Texas Instruments: INA117 High Common-Mode Voltage Difference Amplifier, Data Sheet, SBOS154A, Dec. 2000, www.ti.com
- [5] Analog Devices: AD8226 Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output Instrumentation Amplifier, Data Sheet, D07036-0-10/19(D), www.analog.com
- [6] Kitchin C., Counts L.: RMS to DC conversion application guide, 2nd edition, Analog Devices, 1986.
- [7] Ducu D.: Op Amp Rectifiers, Peak Detectors and Clamps, Application Note AN1353, DS01353A, Microchip Technology Inc., 2011.
- [8] Vedral J., Svatoš J.: Zpracování a digitalizace analogových signálů v měřicí technice, ČVUT, 2018.