

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

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

Měření výkonu elektrického proudu a spotřeby el. energie

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



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

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Měření výkonu a spotřeby

Obsah

- Výkon elektrického proudu – základní vztahy
- Přístroje pro měření výkonu
- Měření výkonu DC proudu
- Měření činného výkonu AC proudu
- Měření jalového výkonu AC proudu
- Měření výkonů ve třífázové soustavě
- Energie elektrického proudu – základní vztahy
- Přístroje pro měření spotřeby elektrické energie
- Přístroje a metody pro zjišťování sledu fází

Měření výkonu el. proudu

Základní vztahy

- Okamžitý výkon: $p(t) = u(t)i(t) \quad (\text{W})$

- Výkon DC proudu: $P = UI \quad (\text{W})$

- Výkon AC proudu:

Činný výkon: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \quad (\text{W})$

Pro harm. proud: $P = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{2}U \sin(\omega t) \sqrt{2}I \sin(\omega t + \varphi) dt \quad (\text{W})$

$$P = UI \cos \varphi \quad (\text{W})$$

Jalový výkon: $Q = UI \sin \varphi \quad (\text{VAr})$

Zdánlivý výkon: $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{VA})$

- Činný výkon neharm. proudu: $P = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n \quad (\text{W})$

- Jalový výkon neharm. proudu: $Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (\text{VAr})$

Měření výkonu el. proudu

Přístroje pro měření výkonu

Voltmetry a ampérmetry (ručkové, elektronické, digitální)

- Nepřímé měření – Samostatnými přístroji se změří proud a napětí. Výkon se určí jako součin změřených hodnot.
- Vhodné pouze pro zjišťování výkonu DC proudu nebo pro měření zdánlivého výkonu AC proudu.
- Příklady konkrétních měřicích přístrojů viz měření napětí a proudu (předchozí přednáška)

Měření výkonu el. proudu

Přístroje pro měření výkonu

Elektrodynamické W-metry

- Přímé měření v DC i AC obvodech
- Frekv. rozsah DC až ~100 Hz

Ferodynamické W-metry

- Přímé měření AC proudu
- Pouze pro 50 Hz

Příklad: C.A.404 (Chauvin Arnoux)

- Napěťové rozsahy: 60 V; ...; 480 V
- Proudové rozsahy: 0,5 A; 1 A
- *TP*: 2,5 (DC); 1 (AC)
- Frekv. rozsah: DC – 500 Hz
- Jm. účiník: 1



*Elektromechanický W-metr C.A.404
(Chauvin Arnoux)*

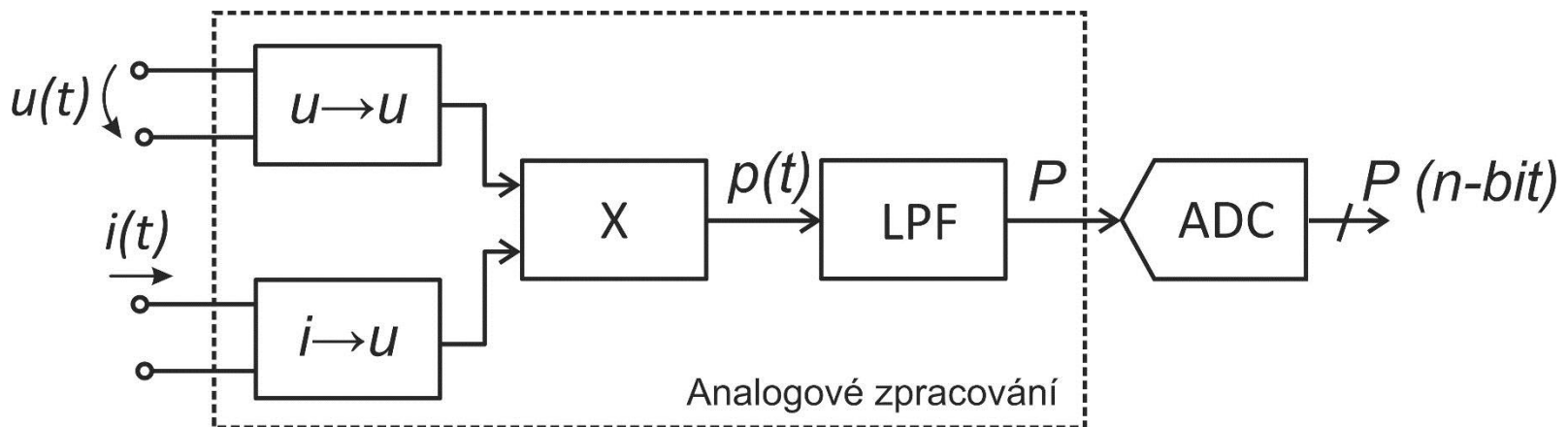
Měření výkonu el. proudu

Přístroje pro měření výkonu

Elektronické W-metry

- Přímé měření v DC i AC obv.
 - Frekv. rozs.: DC až ~100 kHz
 - **Princip 1:** Realizace definičního integrálu činného výkonu:
- $u \rightarrow u \dots$ napěťový dělič/zesilovač
 $i \rightarrow u \dots$ převodník I/U
 $X \dots$ násobička
LPF... filtr, dolní propust
ADC... A/D převodník

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt$$



Princip elektronického měřiče činného výkonu

Měření výkonu el. proudu

Přístroje pro měření výkonu

Elektronické W-metry

- **Princip 2:** Průběhy $u(t)$, $i(t)$ jsou navzorkovány a digitalizovány.
- Další zpracování je číslicové

$u \rightarrow u$... napěťový dělič/zesilovač

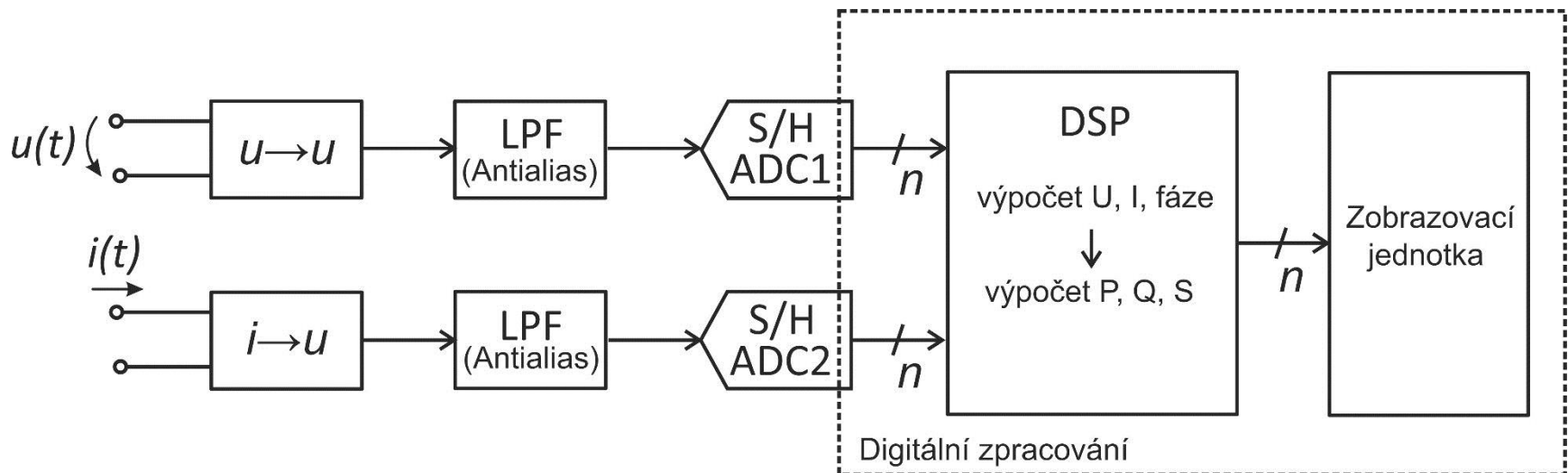
$i \rightarrow u$... převodník proud/napětí

LPF... antialiasing filtr

S/H ... vzorkovač

ADC... A/D převodník

DSP... Signálový procesor



Princip digitálního vzorkovacího W-metru

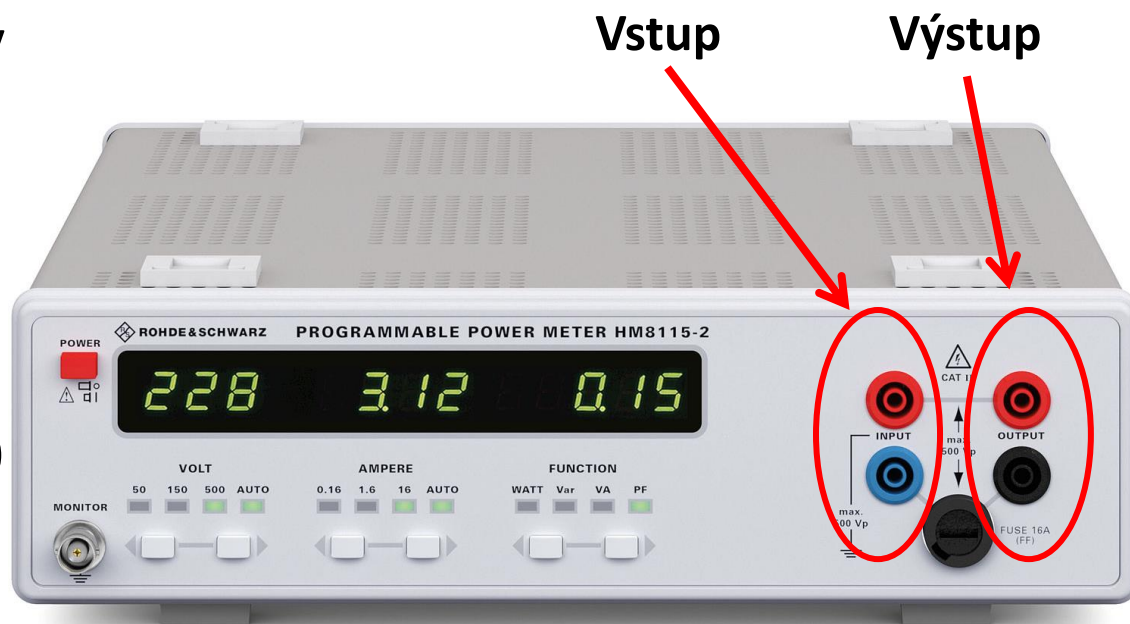
Měření výkonu el. proudu

Přístroje pro měření výkonu

Příklad: HM8115-2 (Hameg, Rohde & Schwarz), [2]:

- Měří: U, I, P, Q, S, PF
- Napěťové rozsahy:
50 V; 150 V; ...; 500 V
- Proudové rozsahy:
160 mA; 1,6A; 16 A
- Frekv. rozsah:
DC až 1 kHz
- Chyba (měření P):
 $\pm (0,5\% + 10 \text{ digs})$
- Ovládání: RS232,
(USB, GPIB)

W-metr je “průchozí” (je vhodný pouze pro jednofázová měření)



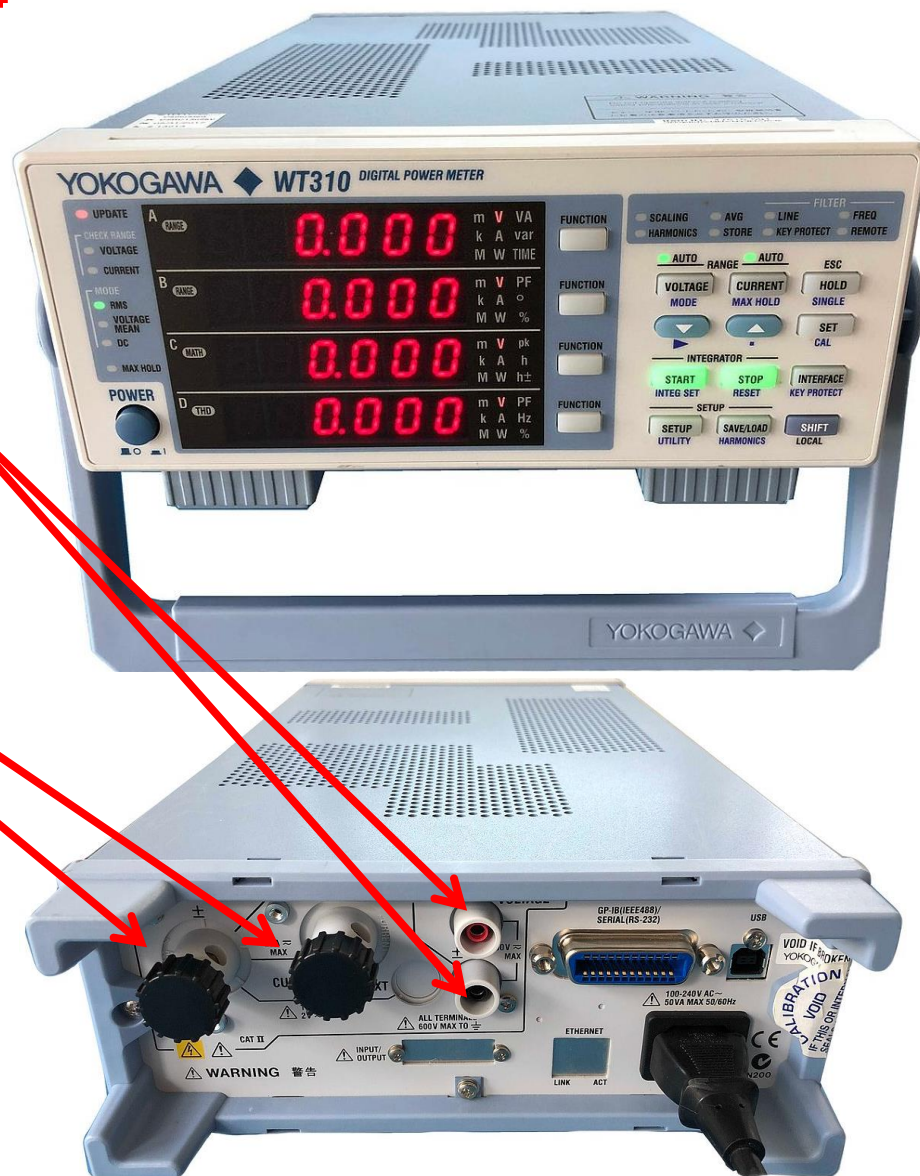
*Digitální W-metr HM8115-2,
Rohde & Schwarz*

Měření výkonu el. proudu

Přístroje pro měření výkonu

Příklad: WT310
(Yokogawa), [3]:

- Samostatné napěťové a proudové svorky
- Napěťové rozsahy:
7,5 V; 15 V; ...; 600 V
- Proudové rozsahy:
2.5 mA; 5 mA; ...; 20 A
- Frekvenční rozsah:
DC až 100 kHz
- Chyba: 0,1 %
- Ovládání: USB, GPIB, RS232

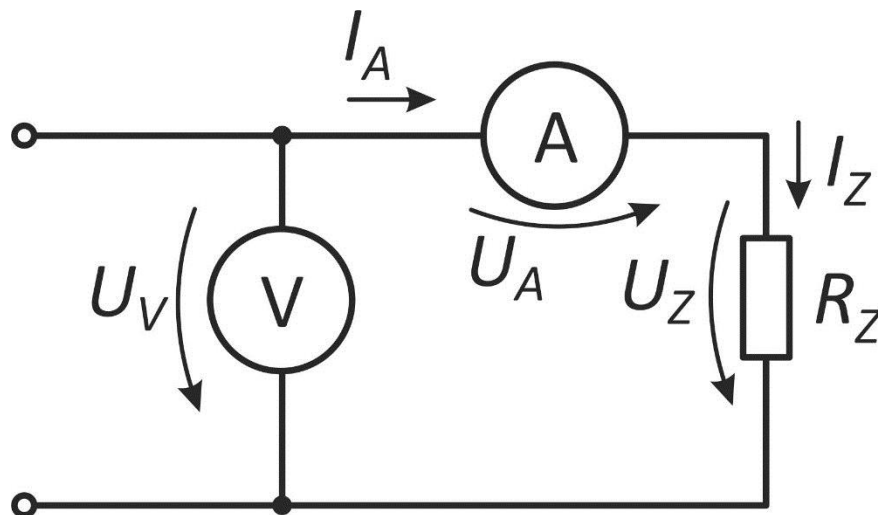


Digitální W-metr WT310, Yokogawa

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonu DC proudu

Výkon na zátěži měřený
V-metrem a A-metrem,
varianta 1



$$P = U_V I_A$$

(součin údajů přístrojů)

- Při $R_A = 0$ platí:

$$U_Z = U_V \text{ a } I_Z = I_A$$

$$P_Z = P = U_V I_A$$

- Při $R_A > 0$ platí:

$$U_Z \neq U_V \text{ a } I_Z = I_A$$

$$\begin{aligned} P_Z &= U_Z I_Z = (U_V - U_A) I_A = \\ &= U_V I_A - U_A I_A = P - P_A \end{aligned}$$

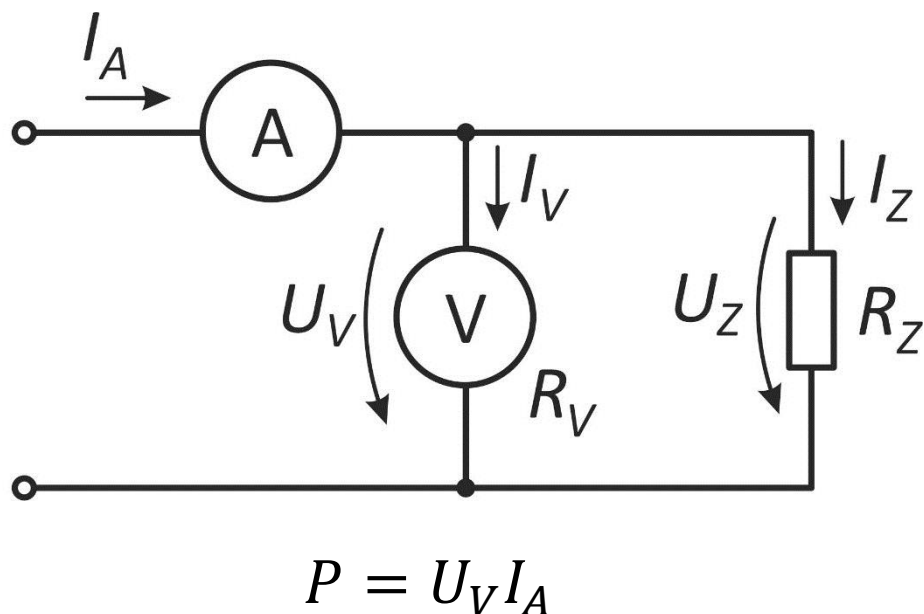
- Výsledek je třeba korigovat
(vlastní spotřeba A-metru)

$$P_Z = P - R_A I_A^2$$

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonu DC proudu

Výkon na zátěži měřený
V-metrem a A-metrem,
varianta 2



(součin údajů přístrojů)

- Výsledek je třeba korigovat
(vlastní spotřeba V-metru)

- Při $R_V \rightarrow \infty$ platí:

$$U_Z = U_V \text{ a } I_Z = I_A$$

$$P_Z = P = U_V I_A$$

- Při $R_V < \infty$ platí:

$$U_Z = U_V \text{ a } I_Z \neq I_A$$

$$\begin{aligned} P_Z &= U_Z I_Z = U_V (I_A - I_V) = \\ &= U_V I_A - U_V I_V = P - P_V \end{aligned}$$

$$P_Z = P - \frac{U_V^2}{R_V}$$

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonu AC proudu

Činný výkon na zátěži měřený W-metrem, varianta 1

$$P = k_W \alpha$$

(údaj W-metru)

$$k_W = \frac{U_n I_n}{\alpha_m} \cos \varphi_{jm}$$

α ...výchylka v dílcích stupnice

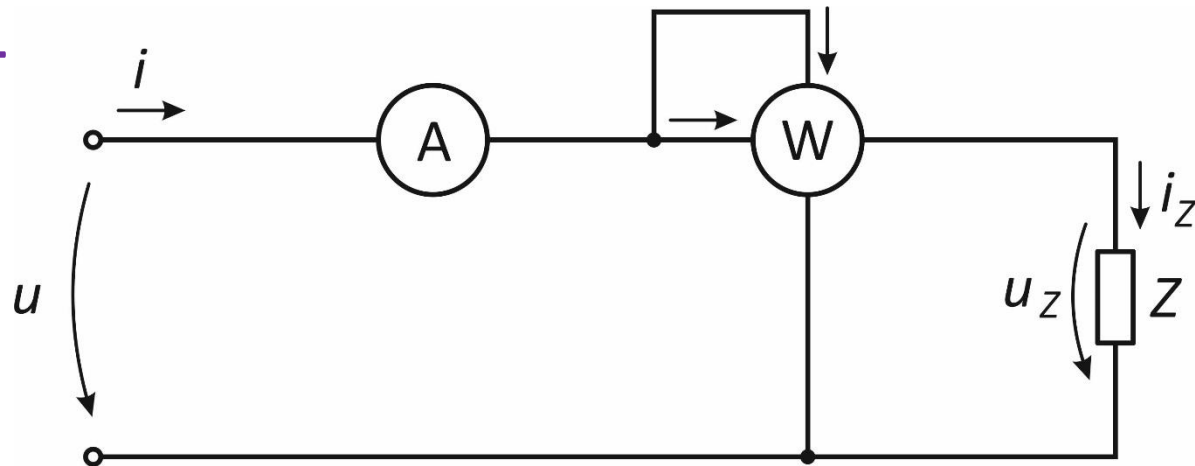
k_W ...konstanta W-metru (W/d)

U_n ...napěťový rozsah

I_n ...proudový rozsah

α_m ...počet dílků stupnice

$\cos \varphi_{jm}$...jmen. účinník W-metru



- Výsledek je třeba korigovat (vlastní spotřeba proudové cívky W-metru)

$$P_Z = P - P_A = P - R_{IC} I^2$$

R_{IC} ... odpor proudové cívky

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonu AC proudu

Činný výkon na zátěži měřený W-metrem, varianta 2

$$P = k_W \alpha$$

(údaj W-metru)

$$k_W = \frac{U_n I_n}{\alpha_m} \cos \varphi_{jm}$$

α ...výchylka v dílcích stupnice

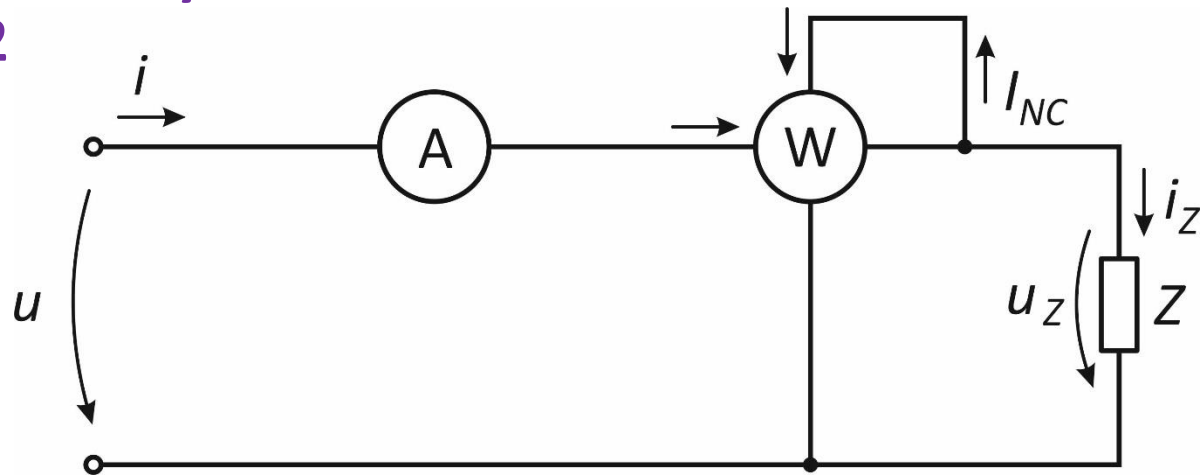
k_W ...konstanta W-metru (W/d)

U_n ...napěťový rozsah

I_n ...proudový rozsah

α_m ...počet dílků stupnice

$\cos \varphi_{jm}$...jmen. účinník W-metru



- Výsledek je třeba korigovat (vlastní spotřeba napěťové cívky W-metru)

$$P_Z = P - P_{NC} = P - \frac{U^2}{R_{NC}}$$

R_{NC} ... odpor napěťové cívky

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonu AC proudu

Měření jalového výkonu W-metrem

$$Q = UI \sin \varphi =$$

$$= UI \cos \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) =$$

$$k_W \alpha = \alpha \frac{U_n I_n}{\alpha_m} \cos \varphi_{jm}$$

α ...výchylka v dílcích stupnice

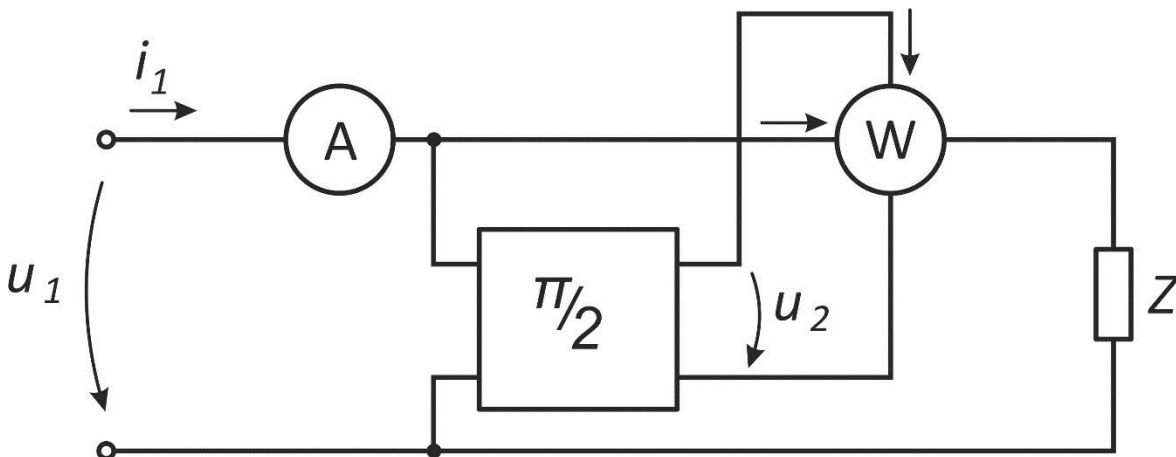
k_W ...konstanta W-metru (W/d)

U_n ...napěťový rozsah

I_n ...proudový rozsah

α_m ...počet dílků stupnice

$\cos \varphi_{jm}$...jmen. účinník W-metru



- V případě, že obvod fázového posuvu neumí zajistit napěťový přenos 1:1, je třeba provést korekci změřené hodnoty:

$$Q_Z = Q \frac{U_1}{U_2}$$

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonů ve třífázové soustavě

Blondelův teorém:

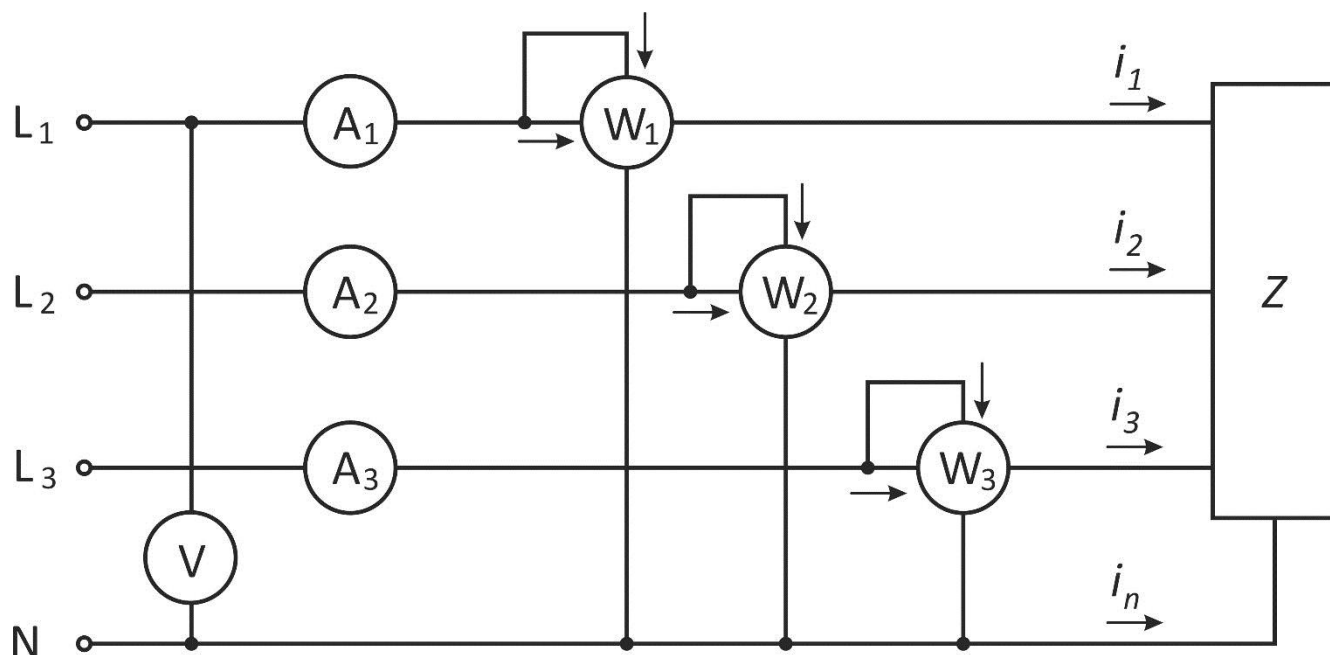
Pro měření celkového
činného výkonu
v n – vodičové soustavě
je zapotřebí minimálně
($n - 1$) W-metrů.

Měření činného výkonu ve čtyřvodičové síti

$$P_Z = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$



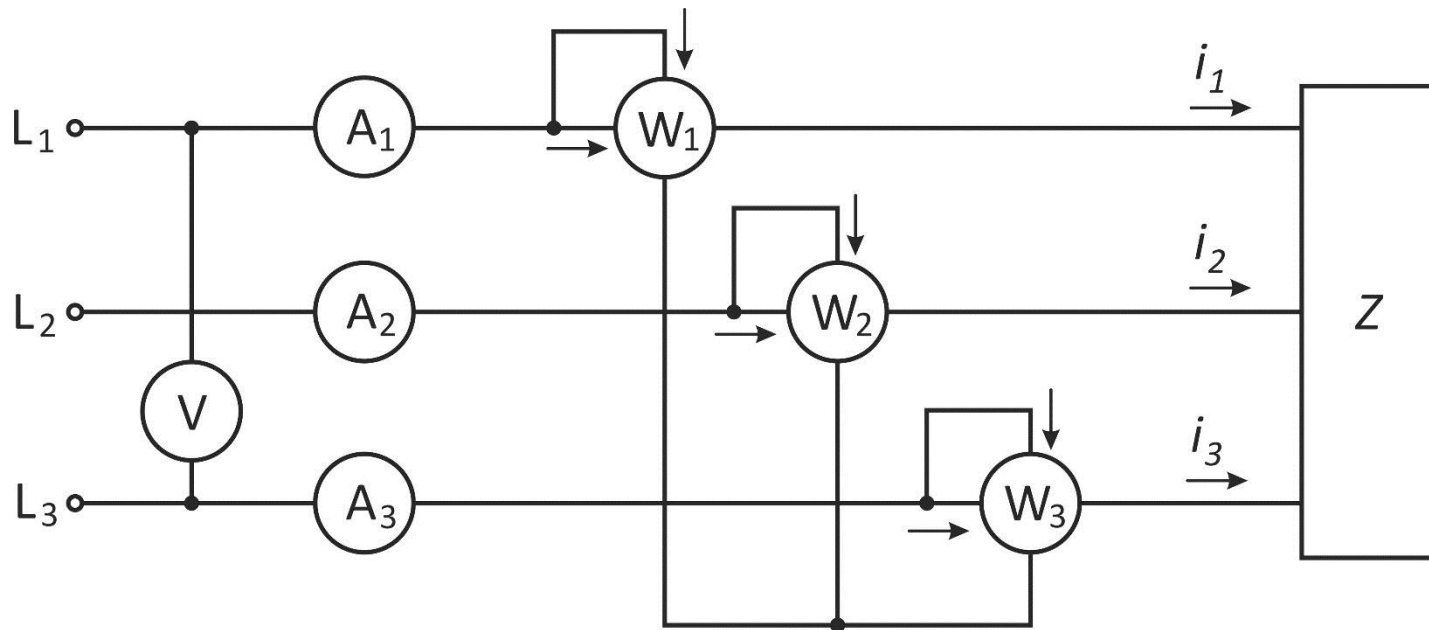
André Blondel
(1863-1938)



Měření výkonu el. proudu

Měření výkonů ve třífázové soustavě

Měření činného výkonu ve třívodičové síti



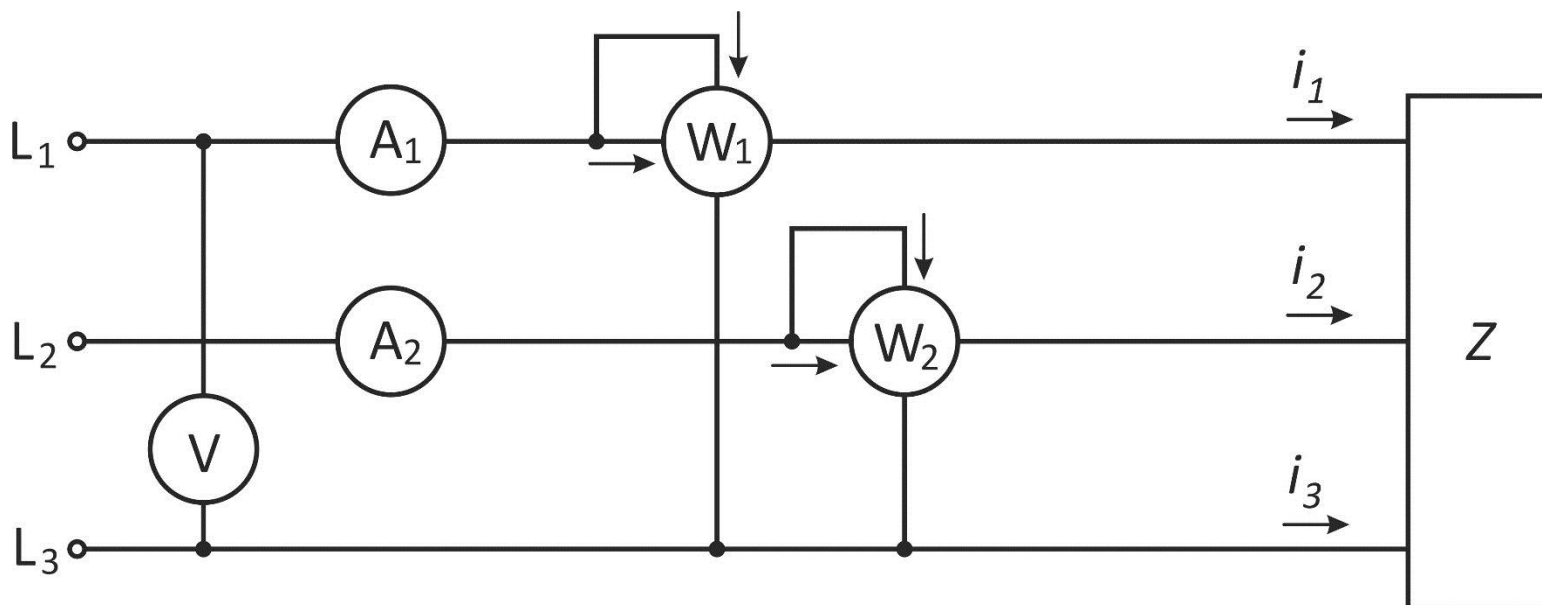
Spojením výstupů napěťových cívek vzniká “umělá nula” – tj. pomocný vztažný potenciál pro měření napětí.

$$P_Z = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}$$

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonů ve třífázové soustavě

Měření činného výkonu ve třívodičové síti – Aronovo zapojení



Základní podmínka: $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ ($i_n = 0$)

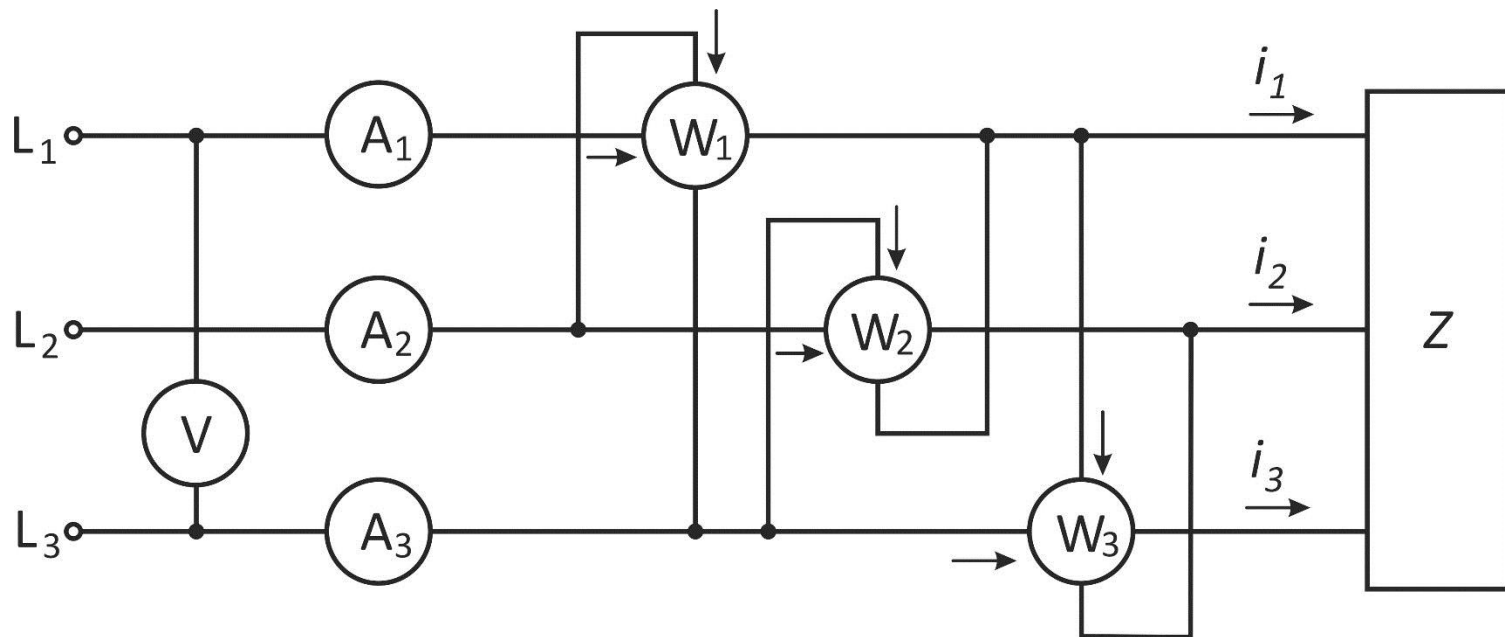
$$P_{3f} = P_{W1} + P_{W2} \quad (W) \quad (\text{Obecná platnost})$$

$$Q_{3f} = \sqrt{3}(P_{W1} - P_{W2}) \quad (\text{VAr}) \quad (\text{Jen pro symetrickou síť a zátěž a harmonické průběhy})$$

Měření výkonu el. proudu

Měření výkonů ve třífázové soustavě

Měření jalového výkonu ve třífázové síti pomocí 3 W-metrů



$$Q_{3f} = \frac{P_{W1} + P_{W2} + P_{W3}}{\sqrt{3}} \quad (VAr)$$

(Platí jen pokud je soustava symetrická.)

Měření spotřeby elektrické energie

Základní vztahy

$$P = \frac{E}{t} \quad \text{resp.} \quad p(t) = \frac{dE}{dt}$$

$$dE = p(t)dt$$

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt \quad (\text{J})$$

- Měřič elektrické energie funguje jako integrační W-metr.
- Obvykle se spotřebovaná elektrická energie udává v *kWh* (1 J je příliš malá hodnota)

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Měření spotřeby elektrické energie

Přístroje pro měření spotřeby

Indukční elektroměry

- Princip: Ferrarisův stroj s počítadlem.
- Pouze pro 50/60 Hz
- Relativně nízká přesnost
- Nízká citlivost
- Problematické měření neharmon. průběhů
- Vysoká vlastní spotřeba
- Velká přetížitelnost
- Nízké nároky na údržbu
- Relativně levné

Příklad: ET426, Křižík, [4]

- 120 ot/kWh (konstanta)
- Třífázový
- $TP = 2$



Měření spotřeby elektrické energie

Přístroje pro měření spotřeby

Elektronické (statické) elektroměry

Výhody:

- Větší přesnost měření
- Menší vlastní spotřeba
- Měří přesně i při malých odběrech
- Přesné měření i při neharmonickém odběru
- Možnost měřit další param. ($P, Q, S, U_{RMS}, I_{RMS} \dots$)
- Možnost časového záznamu odběru
- SW konfigurace
- Digitální výstup
- Pulzní výstup
- Komunikace po napájecí síti
- Možnost automatického odečtu
- Registrace výpadků sítě

Typy elektronických elektroměrů

- Impulzní
- Vzorkovací

Měření spotřeby elektrické energie

Přístroje pro měření spotřeby

Elektronické impulzní elektroměry

Princip: Analogová realizace definičního integrálu činného výkonu + převodník napětí/kmitočet a čítač.

X ... násobička

$u \rightarrow u$...dělič/zesilovač

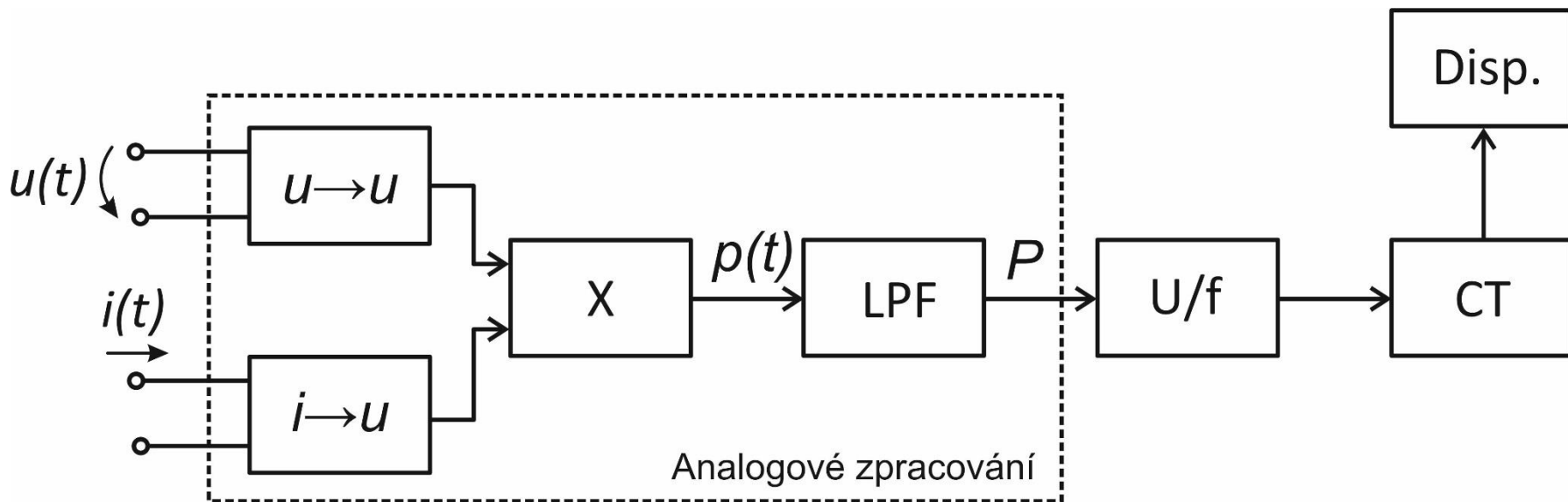
$i \rightarrow u$... převodník proud/napětí

LPF... filtr, dolní propust

U/f ... převodník napětí – frekv.

CT... čítač impulsů

Disp.... zobrazovač



Měření spotřeby elektrické energie

Přístroje pro měření spotřeby

Elektronické vzorkovací elektroměry

Princip: Průběhy $u(t)$, $i(t)$ jsou navzorkovány a digitalizovány. Následné zpracování je číslicové.

$u \rightarrow u$...dělič/zesilovač

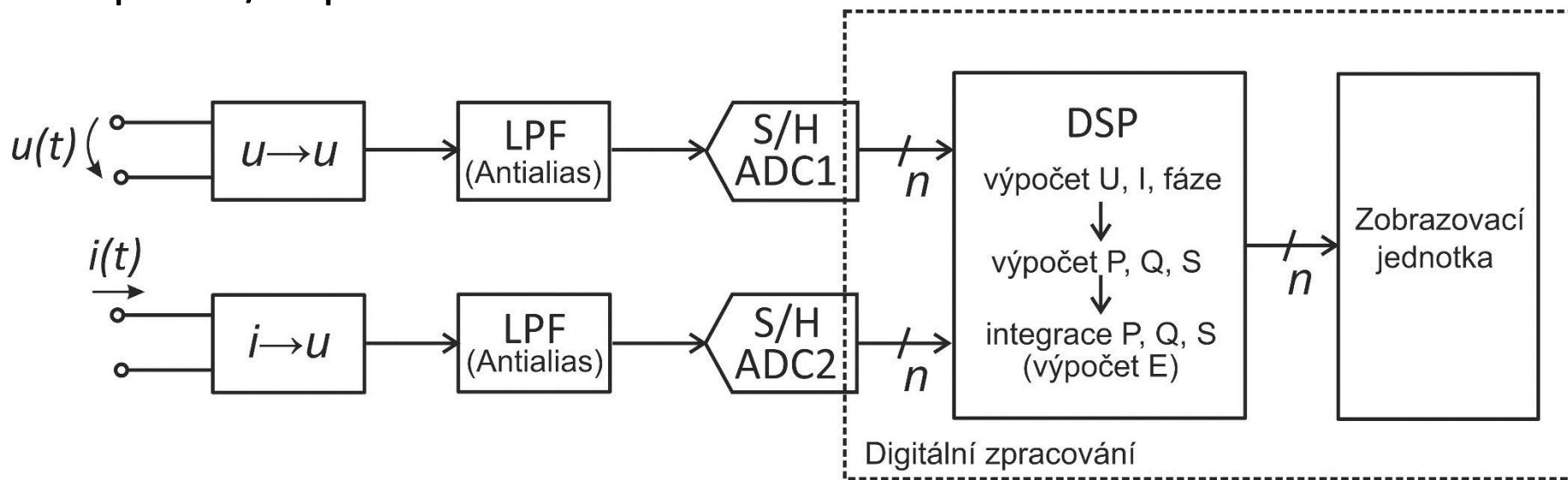
$i \rightarrow u$... převodník
proud/napětí

LPF... antialiasing filtr

S/H... vzorkovač

ADC... A/D převodník

DSP... Digitální signálový
procesor



Měření spotřeby elektrické energie

Přístroje pro měření spotřeby

Elektronické vzorkovací elektroměry

Příklad: Elektroměr HT3PD,
Hütermann

- Třífázový, impulzní
- Proud. rozsah:
0,05-50 A
- Napětí: 3x400 V
- Prac. frekvence:
50-60 Hz
- Chyba: 1 %
- Vlastní spotřeba: < 2 W
- Konstanta: 400 imp/kWh
- Montáž: DIN lišta



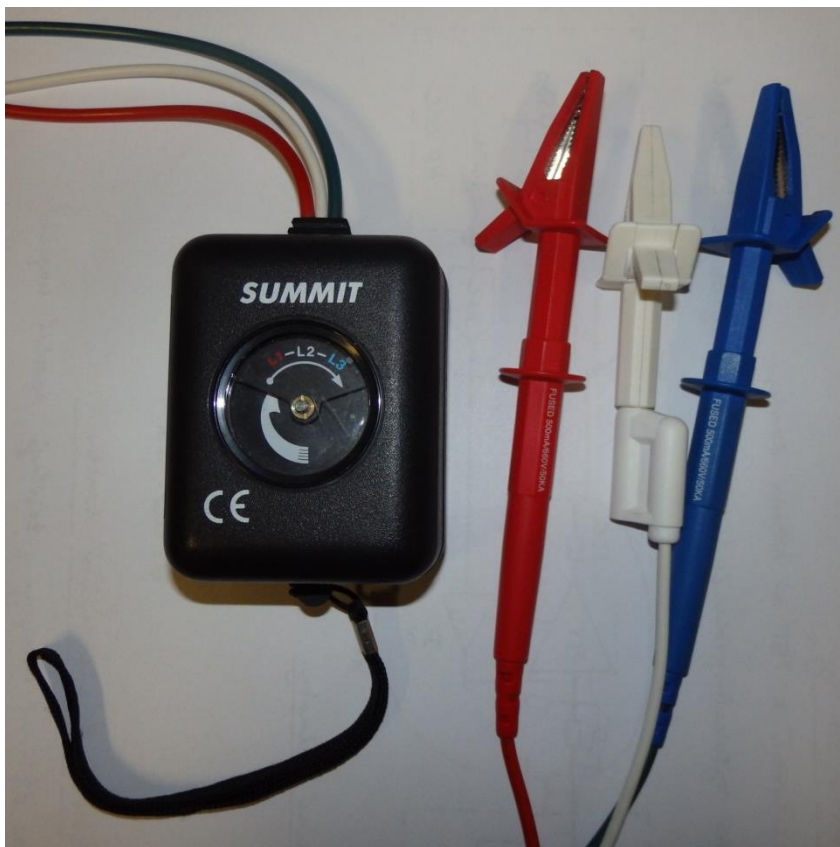
*Elektronický impulzní elektroměr
HT3PD, Hütermann*

Přístroje a metody zjišťování sledu fází

Přístroje

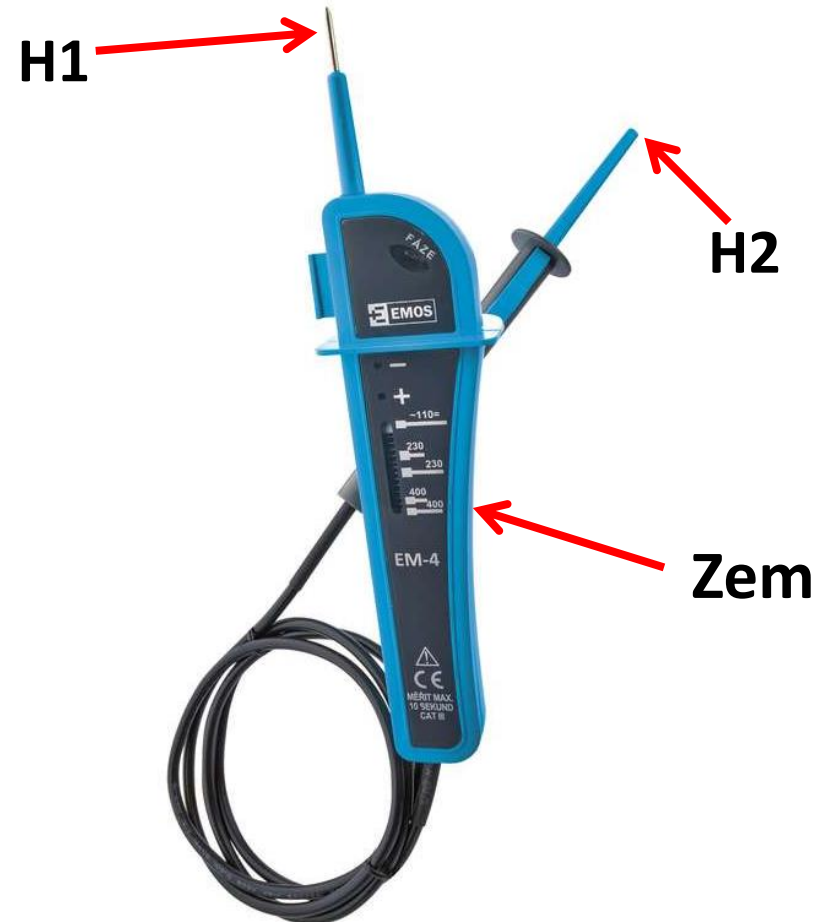
Měřič sledu fází

Princip: asynchronní motor



Univerzální sledovač fází

Napěťová zkoušečka – tzv. vadaska



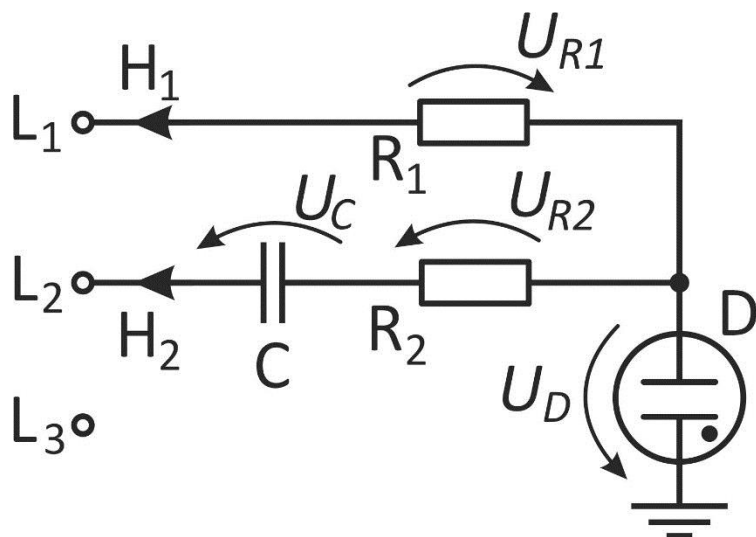
Vadaska EM4

Přístroje a metody zjišťování sledu fází

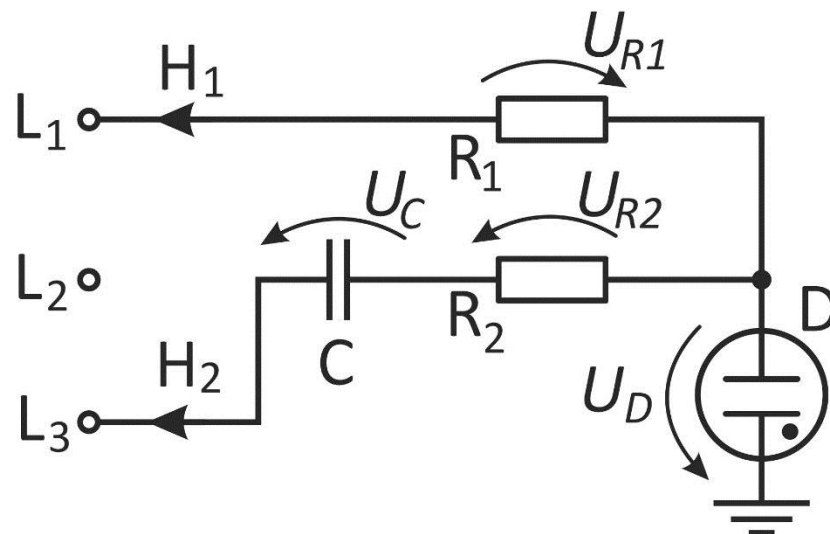
Přístroje

Napěťová zkoušečka – tzv. vadaska

Princip: RC obvod + doutnavka. Napětí přivedené na doutnavku je při správném sledu fází větší než zápalné a doutnavka svítí.



Správný sled fází, D svítí



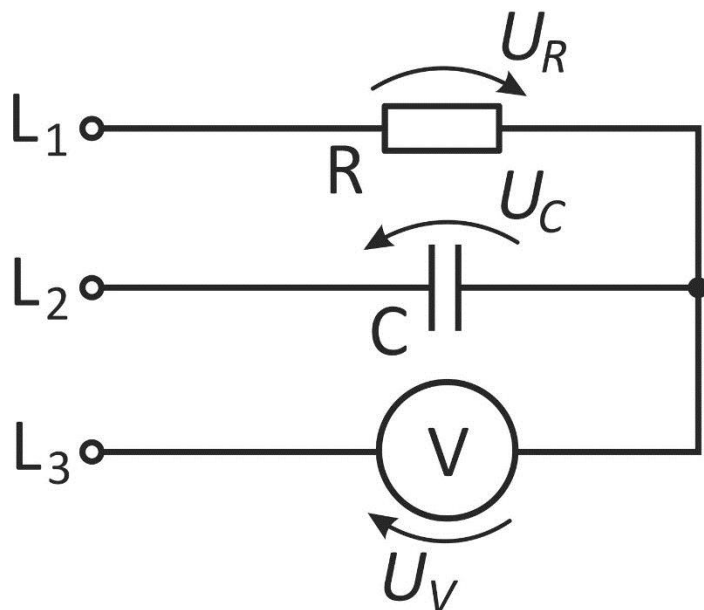
Špatný sled fází, D nesvítí

Přístroje a metody zjišťování sledu fází

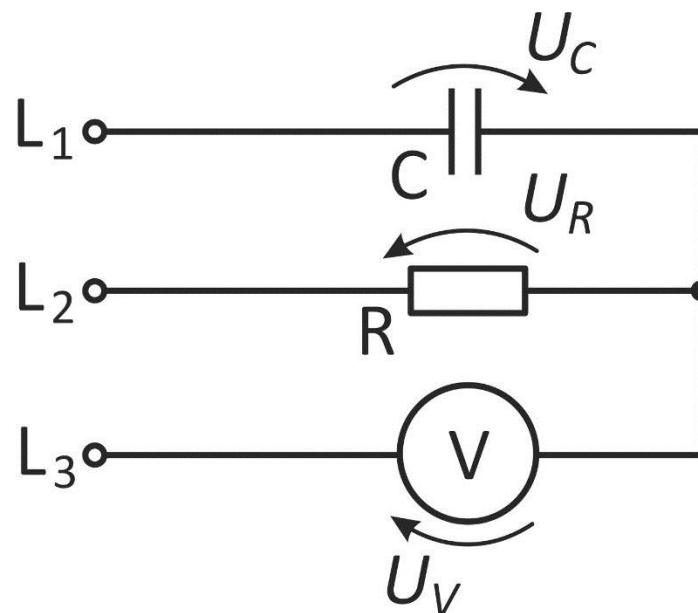
Alternativní metody měření

RC obvod s V-metrem

Princip: Podobně jako s vadaskou. Jako indikátoru je místo doutnavky používán V-metr jehož druhý pól je připojen na zbývající fázi. Při správném sledu fází ukazuje voltmetr vyšší hodnotu napětí než je sdružené napětí sítě.



Správný sled fází, $U_V > U_S$



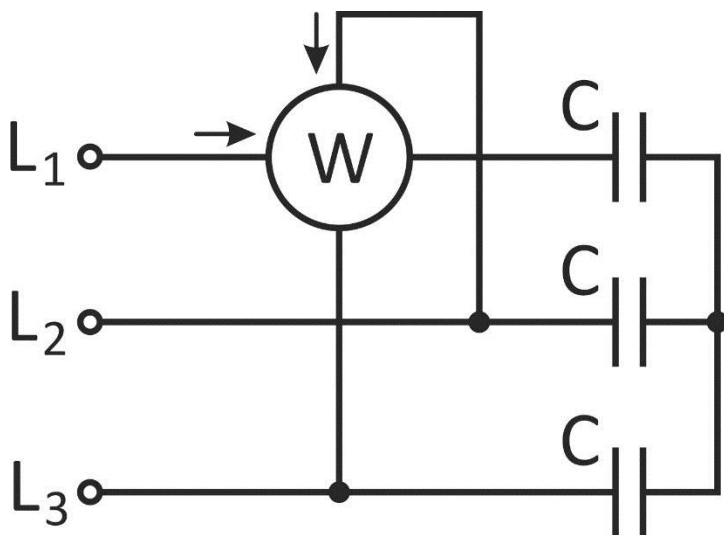
Špatný sled fází, $U_V < U_S$

Přístroje a metody zjišťování sledu fází

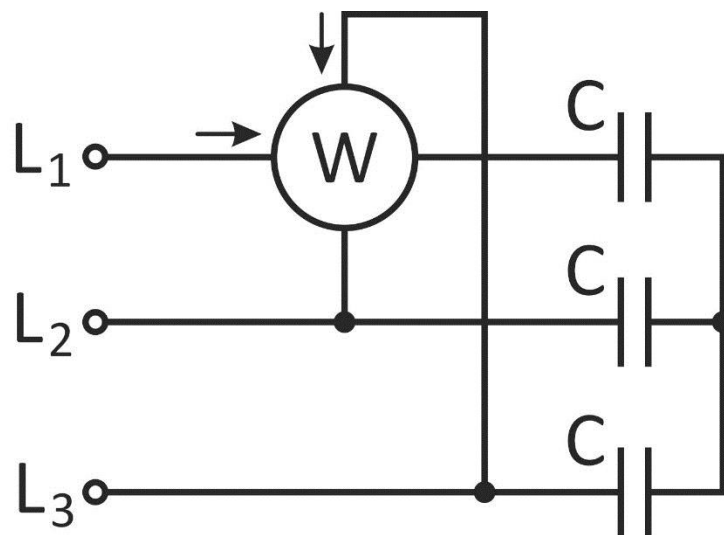
Alternativní metody měření

Měření jalového výkonu na kapacitní zátěži pomocí W-metru

Princip: W-metr registruje jalový výkon. Při správném sledu fází a při kapacitní zátěži je výchylka přístroje záporná.



Správný sled fází, $\alpha < 0$



Špatný sled fází, $\alpha > 0$

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018
- [2] Hameg Inst.: 8kW Power Meter HM8115-2, Specifications, www.rohde-schwarz.com
- [3] Yokogawa: WT310/WT310HC/WT330 Digital Power Meter, User's Manual, IM WT310-01EN, January 2013, www.yokogawa.com
- [4] Křížík: Trojfázové elektromechanické elektromery ET32./ET42., Katalogový list, 2001
- [5] Tůmová O. a kol.: Elektrická měření – měřicí metody, ZČU, 2005