

3. ČINNÉ A JALOVÉ ROČNÍ ZTRÁTY

► Příprava interaktivního prostředí v jazyce python

Poznámka:

Pro správnou funkčnost interaktivních prvků tohoto dokumentu je nezbytné provést prvotní přepočít (běh, spuštění) všech buněk. Tedy spustit v menu `Runtime` položku `Run all` nebo použít klávesovou zkratku `CTRL+F9`.

🔍 1 buňka je skryta

▼ Činný a jalový výkon

Okamžitý výkon:

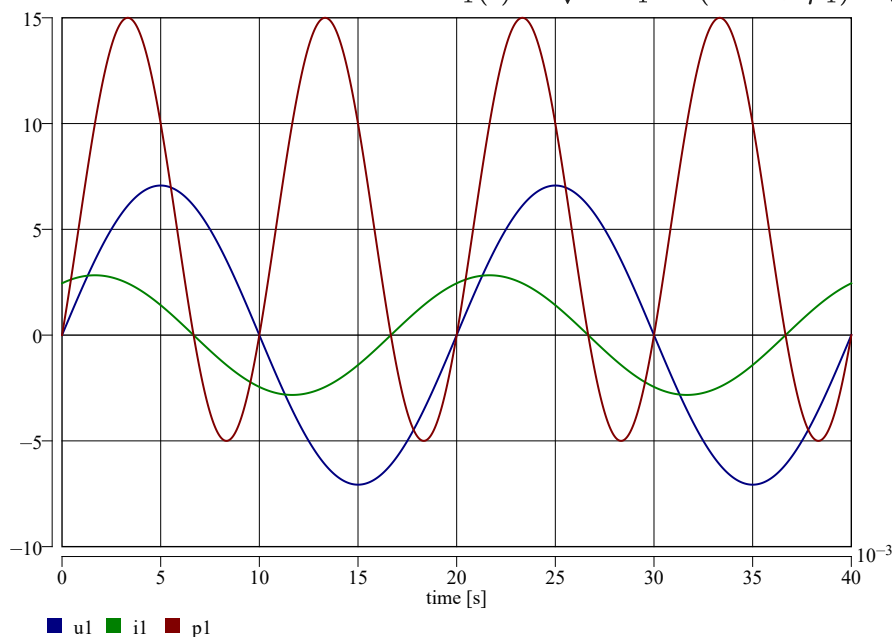
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (W)$$

Příklad:

$$U_1 = 5 \text{ V} \quad I_1 = 2 \text{ A} \quad \varphi_1 = 60^\circ \quad \cos(\varphi_1) = 0.5$$

$$u_1(t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \sin(\omega \cdot t) \quad (V)$$

$$i_1(t) = \sqrt{2} \cdot I_1 \sin(\omega \cdot t + \varphi_1) \quad (A)$$



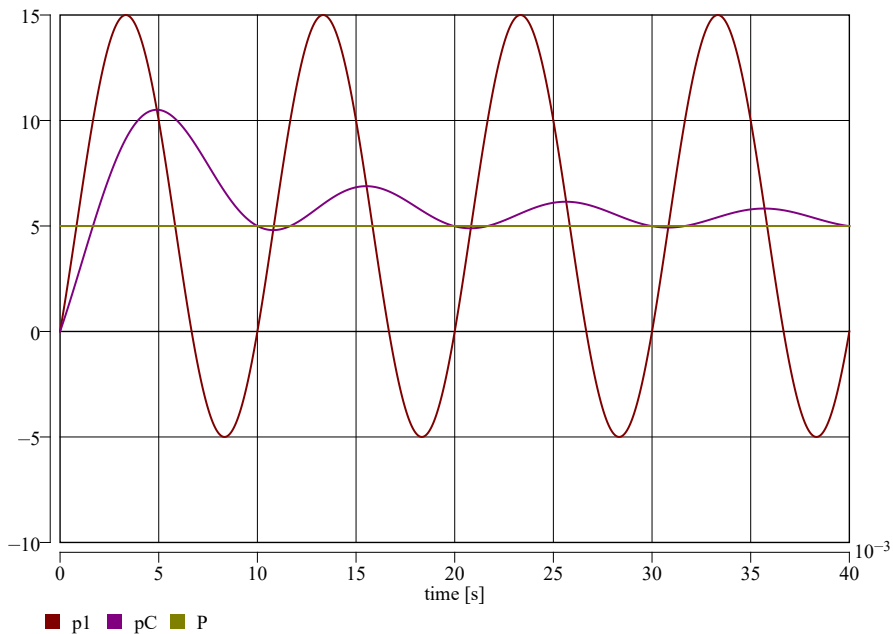
Činný výkon u harmonického průběhu napětí a proudu:

$$p'(t) = \frac{1}{t} \int_0^t p(t) dt = \frac{1}{t} \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt \quad (W)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (W)$$

Příklad:

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = 5 \cdot 2 \cdot 0.5 \text{ W} = 5 \text{ W}$$



Zavedení jalového a zdánlivého výkonu:

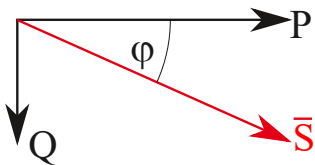
Pro harmonické obvody platí:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{VAR})$$

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{U} \cdot \bar{I}^* = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi_I)} = S \cdot e^{j\varphi} \quad (\text{VA})$$

Na základě konvence v komplexní rovině platí:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad S = \frac{Q}{\sin(\varphi)} \quad Q = P \cdot \tan(\varphi)$$



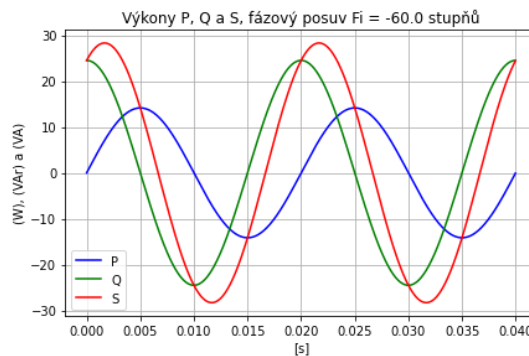
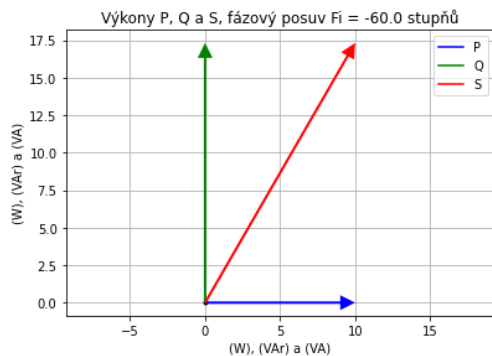
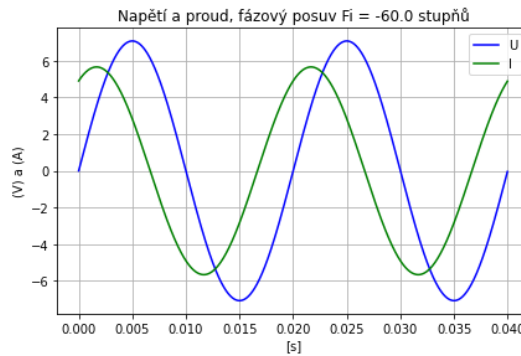
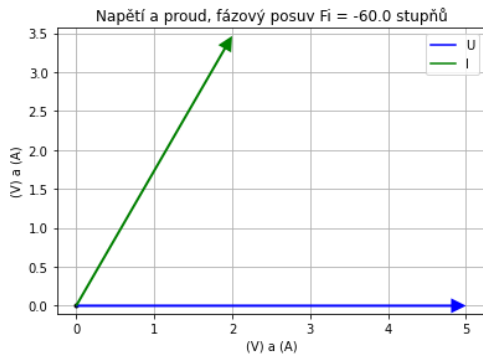
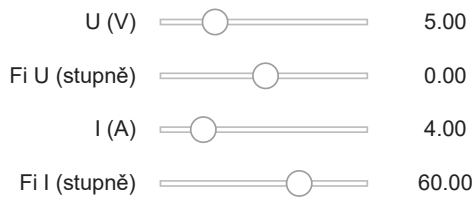
To platí pro všechny výkony všeobecně, tedy i pro jmenovité a maximální parametry:

$$S_N = \frac{P_N}{\cos\varphi_N} \quad S_{MAX} = \frac{P_{MAX}}{\cos\varphi_{MAX}}$$

▼ Zavedení trojfázového výkonu

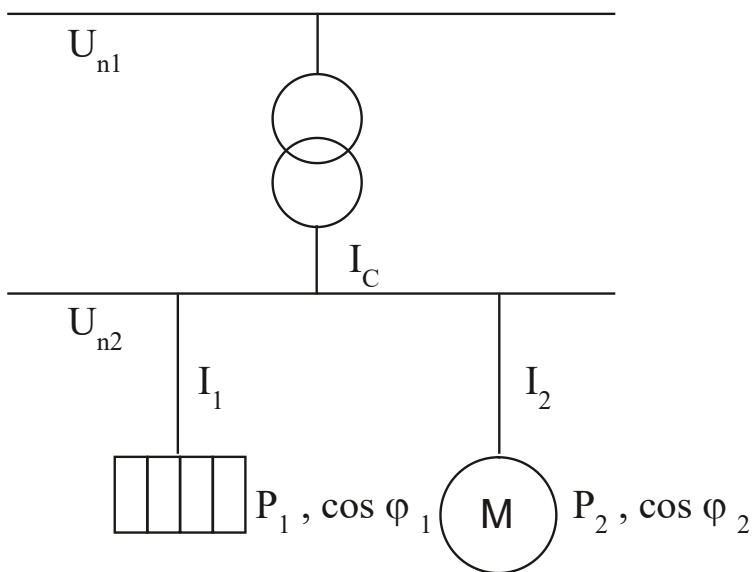
Pro symetrické trojfázové harmonické obvody platí:

$$S_{3F} = 3 \cdot U_f \cdot I = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (\text{VA})$$



▼ Určení celkového proudu dodávaného napájecím transformátorem

Příklad určení poměrů při napájení dvou spotřebičů o nesterélném účinníku:



Pro výkony spotřebičů platí:

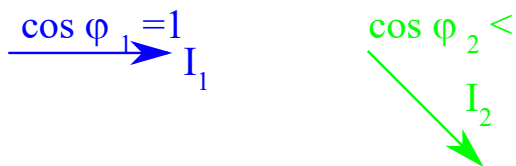
$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} \quad S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_{MAX}}$$

$$P_C = P_1 + P_2 \quad Q_C = Q_1 + Q_2$$

$$S_C = \sqrt{P_C^2 + Q_C^2} \neq S_1 + S_2 \quad \cos \varphi_C = \frac{P_C}{S_C}$$

$$I_C = |\bar{I}_C| = \frac{S_C}{\sqrt{3} \cdot U_{N2}} \neq I_1 + I_2 \quad \bar{I}_C = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$$

Charakter fázorů proudů I_1 a I_2 pro čistě činnou zátěž (elektrický ohřev) a asynchronní pohon (činná i jalová induktivní zátěž):



Příklad:

$$I_1 = 2A \quad \cos \varphi_1 = 1 \quad I_2 = 3A \quad \cos \varphi_2 = 0.5$$

$$\bar{I} = (\cos \varphi - j \sin \varphi) \cdot I = (\cos \varphi - j \sin(\arccos(\cos \varphi))) \cdot I$$

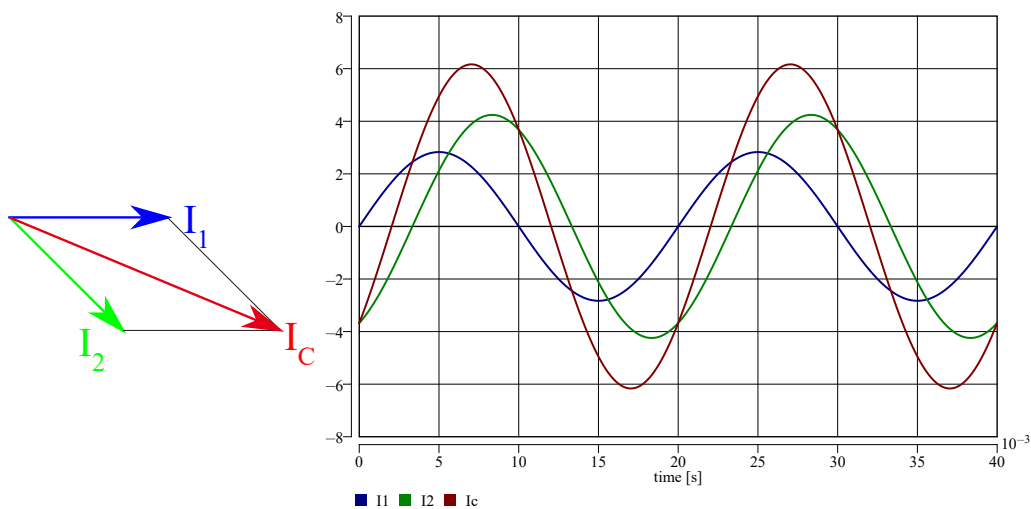
$$\bar{I}_1 = (1 - j \sin(\arccos(1))) \cdot 2A \quad \bar{I}_2 = (0.5 - j \sin(\arccos(0.5))) \cdot 3A$$

$$\bar{I}_1 = 2A \quad \bar{I}_2 = 1.5 - 2.5681jA$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 2 + 1.5 - 2.5681jA = 3.5 - 2.5681jA$$

$$I_C = |\bar{I}_C| = \sqrt{3.5^2 + (-2.5681)^2}A = 4.3589A$$

Výsledek je rozdílný od prostého součtu velikostí proudů: $I_1 + I_2 = 2 + 3A = 5A$

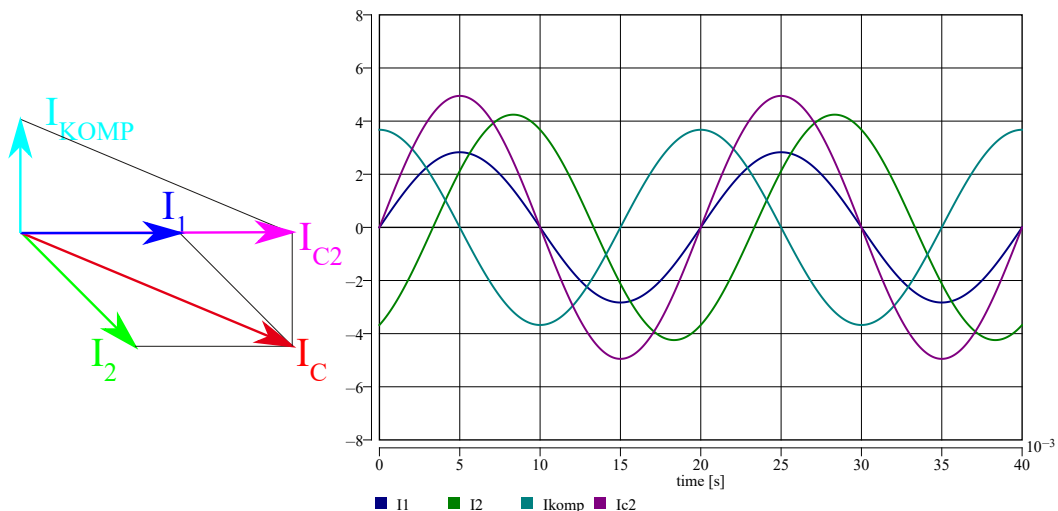


▼ Možnost zlepšení poměrů pomocí kompenzace účinníku

$$I_{KOMP} = -\text{Imag}(\bar{I}_C) = 2.5981jA$$

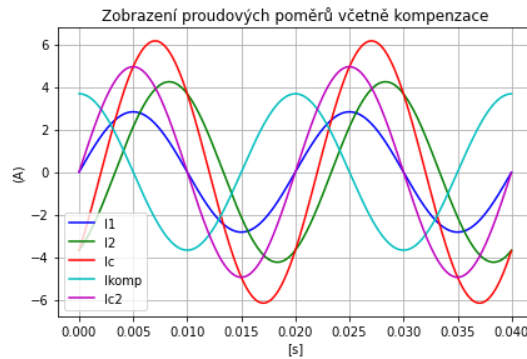
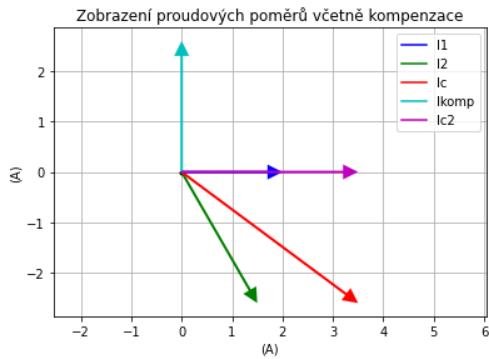
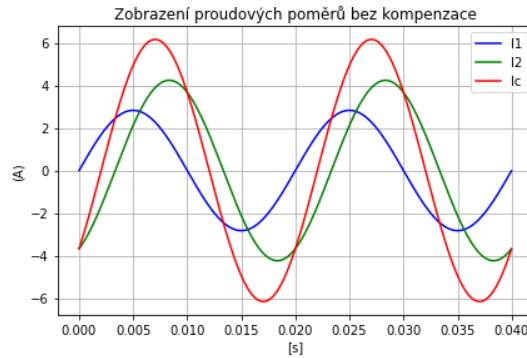
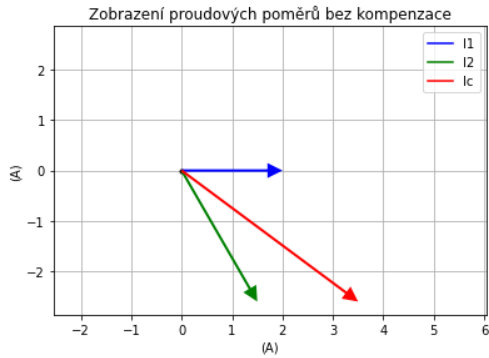
$$\bar{I}_{C2} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_{KOMP} = 3.5 - 2.5681j + 2.5681j = 3.5A$$

$$I_{C2} = 3.5A < I_C = 4.3589A$$



NastaveníProudu

I1 (A)	<input type="text" value="2.00"/>	2.00
CosFil1 (-)	<input type="text" value="1.00"/>	1.00
I2 (A)	<input type="text" value="3.00"/>	3.00
CosFil2 (-)	<input type="text" value="0.50"/>	0.50
Ikomp (A)	<input type="text" value="2.60"/>	2.60



Roční činné ztráty

Celkové činné roční ztráty

$$\Delta P|_{ROK} = \Delta P_0|_{ROK} + \Delta P_K|_{ROK} (Wh)$$

Činné roční ztráty naprázdno:

$$\Delta P_0|_{ROK} = \Delta P_0 \cdot \tau_P (Wh)$$

$$I = I_0 \approx 1\% I_N (A)$$

$$\Delta P_0 = 3 \cdot R_0 \cdot I_0^2 (W)$$

$$\Delta p_0\% = \frac{\Delta P_0}{S_N} 100 (-)$$

Činné roční ztráty nakrátko:

$$\Delta P_K|_{ROK} = \Delta P_K \cdot \tau_Z \left(\frac{S_{MAX}}{S_N} \right)^2 (Wh)$$

$$I = I_N = 100\% I_N (A)$$

$$\Delta P_K = 3 \cdot R_K \cdot I_N^2 \text{ (W)}$$

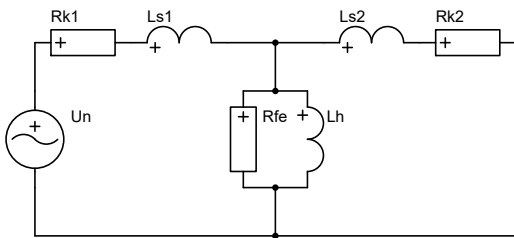
$$\Delta p_{K\%} = \frac{\Delta P_K}{S_N} 100 \text{ (-)}$$

Procentní podíl činných ztrát na vyrobené elektrické energii:

$$\Delta p_{\%} = \frac{\Delta P|_{ROK}}{A_P|_{ROK}} 100 \text{ (\%)}$$

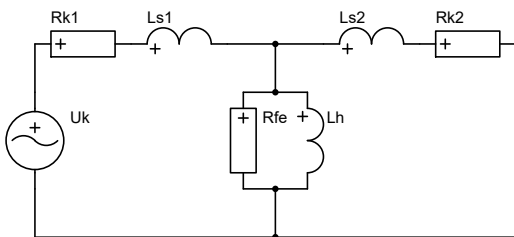
▼ Výpočet činných ročních ztrát na transformátoru

Okamžité činné ztráty naprázdno



$$\Delta P_{0T} \approx 3 \cdot R_{Fe} \cdot I_{Fe}^2 = 3 \cdot R_{Fe} \left(\frac{U_{Nf}}{R_{Fe}} \right)^2 = \frac{U_N^2}{R_{Fe}} \text{ (W)}$$

Okamžité činné ztráty nakrátko



$$\Delta P_{KT} \approx 3 \cdot (R_{K1} + R_{K2}) \cdot I_N^2 = 3 \cdot R_K \cdot I_N^2 \text{ (W)}$$

▼ Parametry transformátorů ŠKODA

Typ	Sn [MVA]	Převod [kV]	dPo [kW]	dPo [%]	dPk [kW]
Jednofázový zvyšovací	220	242/3/15	31	0.014	225
Řadový, pro rozvodny	40	110/23	23	0.058	123
Nízkonapětový	16	35/6.3	11	0.069	80
Se sníženým hlukem	25	110/23	14	0.056	90

Typ	Sn [MVA]	dPk [%]	dPo/dPk [-]	Uk [%]	Io [%]
Jednofázový zvyšovací	220	0.10	0.138	13.5	0.15
Řadový, pro rozvodny	40	0.31	0.187	11.0	0.20
Nízkonapětový	16	0.50	0.138	9.0	0.45
Se sníženým hlukem	25	0.36	0.156	11.5	0.15

Odhad obvyklých parametrů transformátorů

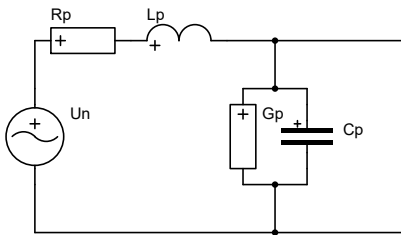
Uk [%]	přibližně 10
Io [%]	1 a méně
dPo [%]	0.3 přibližně 1/3 z dPk a méně
dPk [%]	1 (kratší odvěsna tam, kde Uk je přeponou)

```
widgets.HBox([widgets.VBox([Un, Pmax, CosFi, Sn, T, Tz, dP0p, dPkp, Ukp, I0p]),
widgets.VBox([dP0, dPk, dP0r, dPkr, dPr, Ap, dPp])])
```

Un (kV)	110	dP0 (kW)	120
Pmax (MW)	40	dPk (kW)	400
cos Fi (-)	0.95	dP0r (MW)	1051
Sn (MVA)	40	dPkr (MW)	1373
T (hod)	4380	dPr (MW)	2424
Tz (hod)	3097	Ap (MWh)	175200
dP0 (%)	0.3	dPp (%)	1.38
dPk (%)	1		
Uk (%)	10		
Io (%)	1		

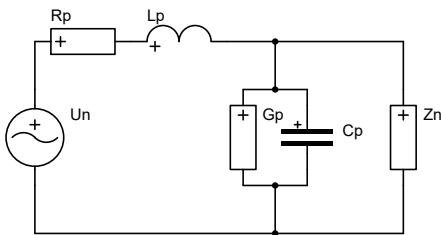
▼ Výpočet činných ročních ztrát na vedení

Okamžité ztráty naprázdno



$$\Delta P_{0V} = 3 \cdot R_P \cdot I_C^2 = 3 \cdot R_P (U_{Nf} \cdot \omega \cdot C_P)^2 = R_P (U_N \cdot \omega \cdot C_P)^2 \text{ (W)}$$

Okamžité ztráty vedení zatíženého jmenovitým proudem



$$\Delta P_{NV} = 3 \cdot R_P \cdot I_N^2 = 3 \cdot R_P \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 = R_P \left(\frac{S_N}{U_N} \right)^2 \text{ (W)}$$

Parametry venkovních vedení a kabelových vedení

Parametry venkovních vedení

U_n [kV]	S [mm ²]	$R_{20^\circ\text{C}}$ [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	G [nS/km]	I_z [A]
22	50	0,69	0,35	3,1	—	200
22	70	0,49	0,35	3,1	—	240
22	95	0,37	0,4	2,8	—	370
22	120	0,28	0,38	2,9	—	440
22	150	0,22	0,36	3,1	—	510
35	50	0,69	0,38	2,9	—	200
35	95	0,36	0,38	2,9	—	370
35	150	0,23	0,38	2,9	—	510
110	120	0,31	0,27	2,9	—	440
110	150	0,26	0,35	2,9	—	510
110	185	0,18	0,404	2,8	50	580
110	210	0,16	0,4	2,8	50	620
110	240	0,15	0,4	2,8	50	670
110	300	0,12	0,4	2,8	50	760
110	350	0,1	0,41	2,8	50	840
110	450	0,08	0,396	2,8	50	950
110	670	0,06	0,38	2,9	50	1200
220	2 x 210	0,08	0,324	3,4	30	1000
220	2 x 300	0,06	0,32	3,5	30	2000
400	3 x 350	0,03	0,307	3,6	20	2200
400	3 x 450	0,03	0,35	3,9	20	2500

Parametry kabelových vedení

U_n [kV]	S [mm ²]	$R_{20^\circ\text{C}}$ [Ω/km]	X [Ω/km]	B [μS/km]	I_z [A]
6	50	0,62	0,082	90	210
6	70	0,44	0,079	90	250
6	95	0,33	0,076	98	310
6	120	0,26	0,075	98	350
6	150	0,21	0,073	98	420
6	185	0,17	0,072	115	470
6	240	0,13	0,071	115	540
10	50	0,62	0,09	80	210
10	70	0,44	0,094	90	250
10	95	0,33	0,09	90	310
10	120	0,26	0,088	90	350
10	150	0,21	0,085	90	420
10	185	0,17	0,084	100	470
10	240	0,13	0,082	100	540
22	50	0,62	0,155	75	210
22	70	0,44	0,14	94	250
22	95	0,33	0,13	100	310
22	120	0,26	0,13	107	350
22	150	0,21	0,12	114	420
22	185	0,17	0,12	125	470
22	240	0,13	0,11	130	540

Roční jalové ztráty

Celkové jalové roční ztráty

$$\Delta Q|_{ROK} = \Delta Q_0|_{ROK} + \Delta Q_K|_{ROK} \text{ (VA} \cdot \text{h)}$$

Jalové roční ztráty naprázdno:

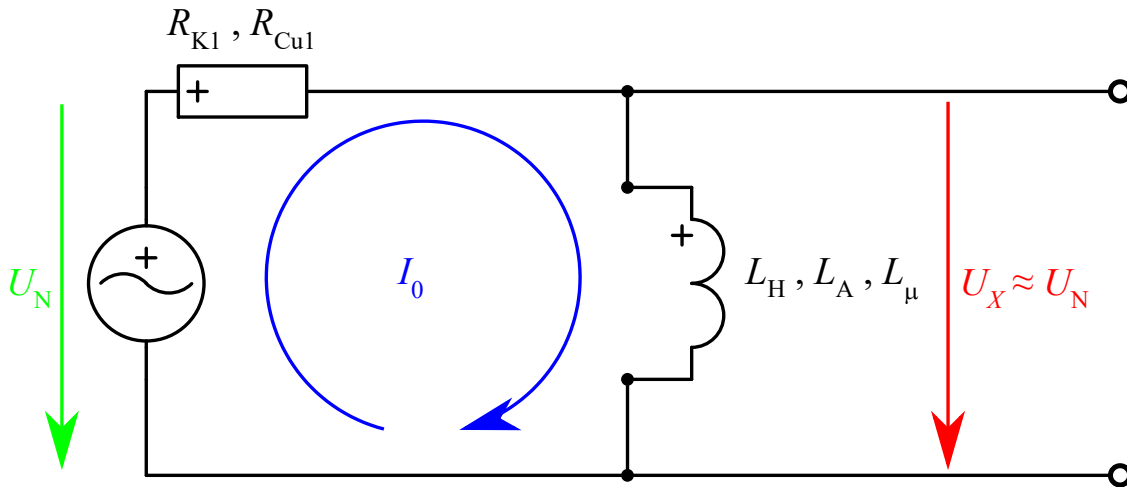
$$\Delta Q_0|_{ROK} = \Delta Q_0 \cdot \tau_P \text{ (VA} \cdot \text{h)}$$

Jalové roční ztráty nakrátko:

$$\Delta Q_K|_{ROK} = \Delta Q_K \cdot \tau_Z \left(\frac{S_{MAX}}{S_N} \right)^2 \text{ (VAr h)}$$

▼ Výpočet jalových ročních ztrát na transformátoru

Okamžité jalové ztráty naprázdno

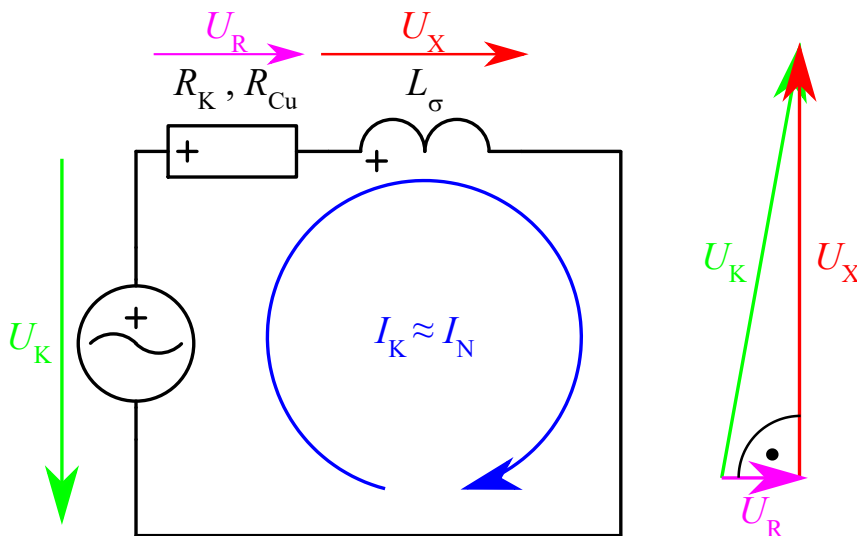


$$\Delta Q_{0T} \approx Q_0 \approx 3 \cdot U_{Xf} \cdot I_{Lh} \approx \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_0 \text{ (VAr)}$$

$$i_0\% = \frac{I_0}{I_N} 100 \text{ (\%)} \quad I_0 = i_0\% \frac{I_N}{100} \text{ (A)}$$

$$S_N = 3 \cdot U_{Nf} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \text{ (VA)} \quad I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \text{ (A)}$$

Okamžité jalové ztráty nakrátko



$$\Delta Q_{KT} \approx Q_K \approx 3 \cdot \Delta U_{Xf} \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot \Delta U_X \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot \frac{\Delta u_{X\%}}{100} U_N \cdot I_N = \Delta u_{X\%} \frac{S_N}{100} \text{ (VAr)}$$

Přibližně lze uvažovat

$$\Delta u_{X\%} \approx \Delta u_{K\%} \text{ (\%)}$$

nebo přesněji

$$\Delta u_{X\%} = \sqrt{\Delta u_{K\%}^2 - \Delta u_{R\%}^2} \text{ (\%)}$$

kde

$$\Delta u_{R\%} = \Delta p_{K\%} \text{ (\%)}$$

se zdůvodněním:

$$\Delta U_R = \sqrt{3} \cdot \Delta U_{Rf} = \sqrt{3} \cdot I_N \cdot R_K \text{ (V)}$$

$$\Delta u_{R\%} = \frac{\Delta U_R}{U_N} 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_N \cdot R_K}{U_N} 100 \text{ (\%)}$$

$$\Delta P_K = 3 \cdot R_K \cdot I_N^2 \text{ (W)}$$

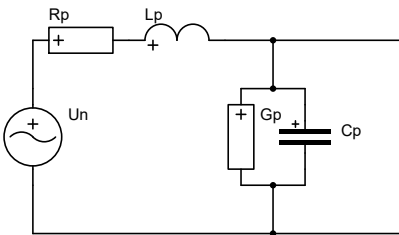
$$\Delta p_{K\%} = \frac{\Delta P_K}{S_N} 100 = \frac{3 \cdot R_K \cdot I_N^2}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N} 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot R_K \cdot I_N}{U_N} 100 \text{ (\%)}$$

```
widgets.HBox([widgets.VBox([Un, Pmax, CosFi, Sn, T, Tz, dP0p, dPkp, Ukp, I0p]),
widgets.VBox([Inorm, I0, Q0, dQ0r, Urp, Uxp, Qk, dQkr, dQr])])
```

Un (kV)	110	In (kA)	0.21
Pmax (MW)	40	I0 (A)	2.1
cos Fi (-)	0.95	Q0 (kVAr)	400
Sn (MVA)	40	dQ0r (MVAh)	3504
T (hod)	4380	Ur (%)	1
Tz (hod)	3097	Ux (%)	9.95
dP0 (%)	0.3	Qk (kVAr)	3980
dPk (%)	1	dQkr (MVAh)	13658
Uk (%)	10	dQr (MVAh)	17162
I0 (%)	1		

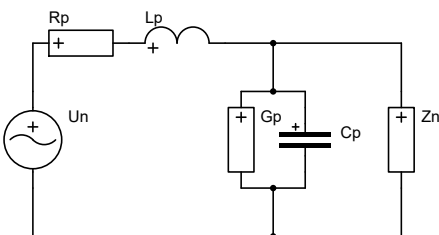
Výpočet jalových ročních ztrát na vedení

Okamžité ztráty naprázdno



$$\Delta Q_{0V} = -3 \cdot X_C \cdot I_C^2 = -3 \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_P} (U_{Nf} \cdot \omega \cdot C_P)^2 = -U_N^2 \cdot \omega \cdot C_P \text{ (VAh)}$$

Okamžité ztráty vedení zatíženého jmenovitým proudem



$$\Delta Q_{NV} = 3 \cdot X_P \cdot I_N^2 = 3\omega L_P \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 = \omega L_P \left(\frac{S_N}{U_N} \right)^2 \text{ (VAh)}$$

