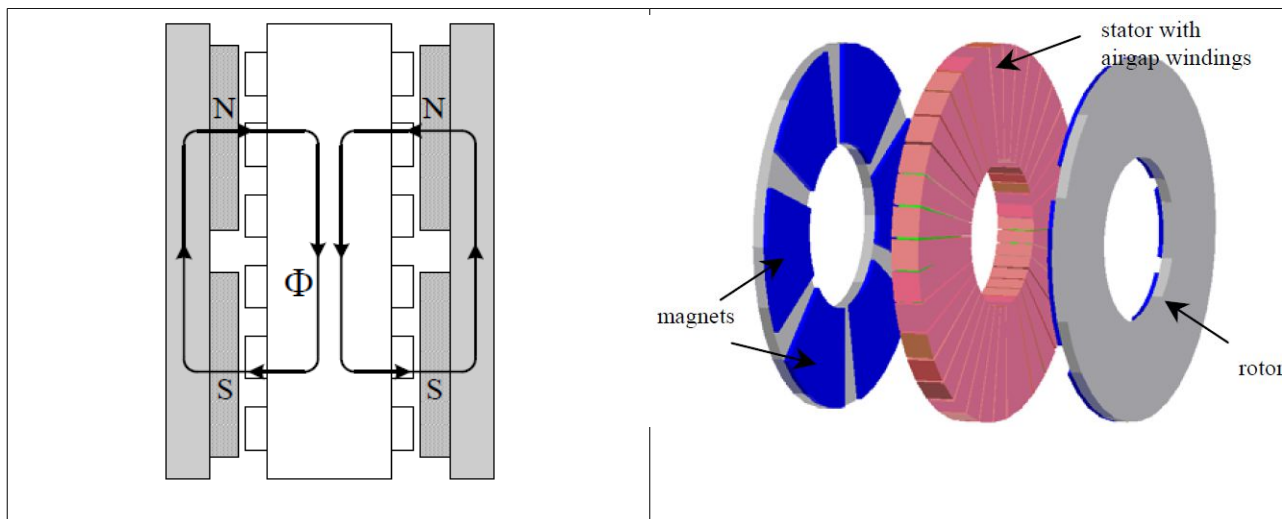


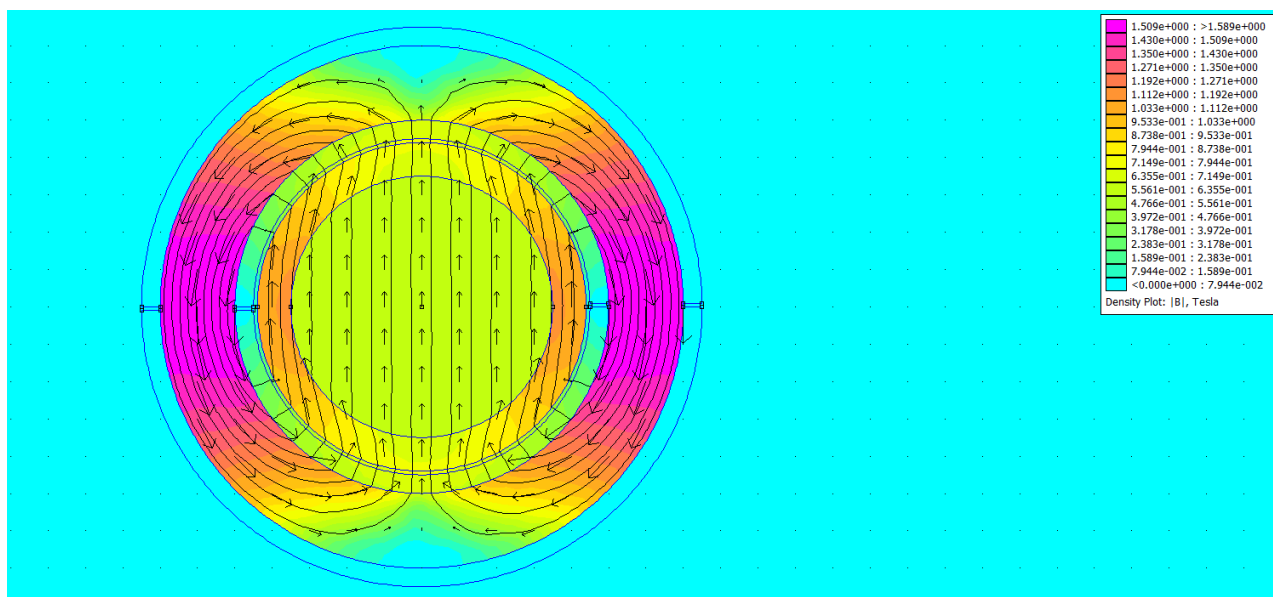
Návrh toroidního generátoru

© Ing. Ladislav Kopecký, květen 2018

Toroidním generátorem budeme rozumět buď konstrukci na obr. 1, kde stator je tvořen toroidním jádrem se dvěma vinutími a jehož rotor tvoří dva železné kotouče s magnety po stranách, nebo konstrukci na obr. 2, která má stejný stator, ale rotor je tvořen magnetickým prstencem s radiální magnetizací (obr. 3).

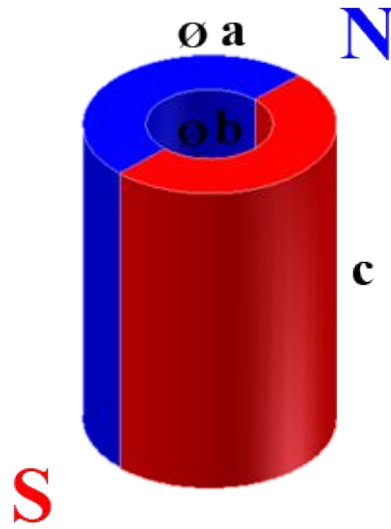


Obr. 1: Toroidní generátor s axiálním magnetickým tokem

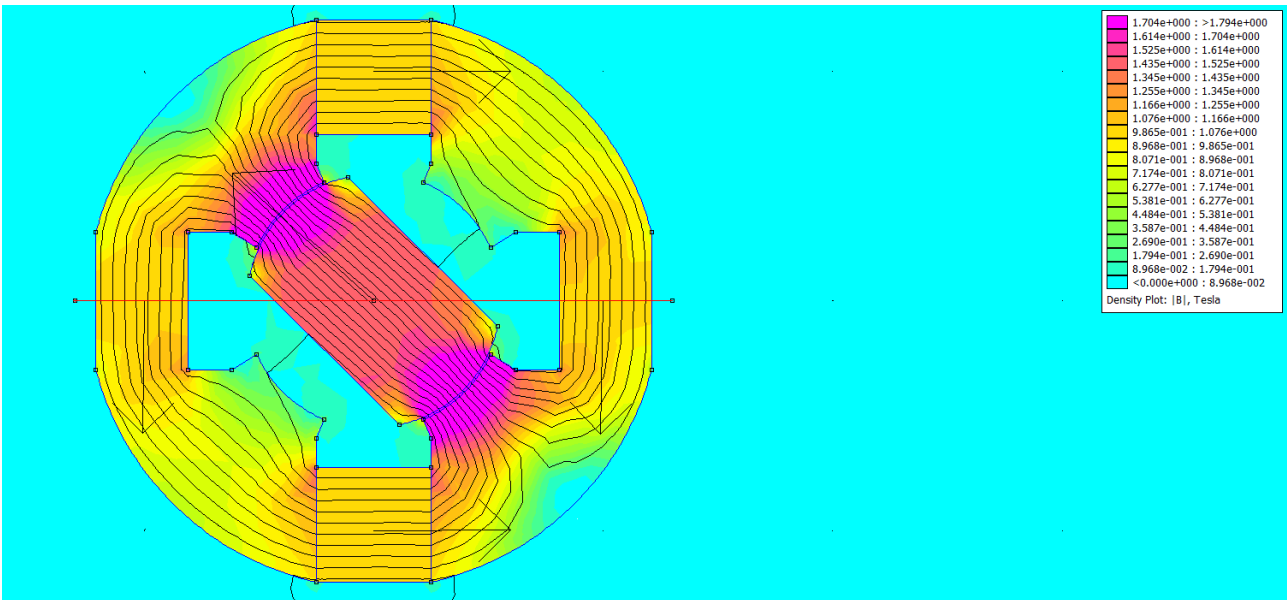


Obr. 2: Simulační model toroidního generátoru bez zátěže

Metodika výpočtu parametrů generátoru je použitelná také pro generátor na obr. 4, jenž nazývám jako Ecklinův generátor. Pro přesnost uvedme, že tento princip ke konstrukci generátoru poprvé použil Američan Robert Zimmermann, který již v roce 1957 obdržel US Patent #2,816,240 (viz. Obr. 5).



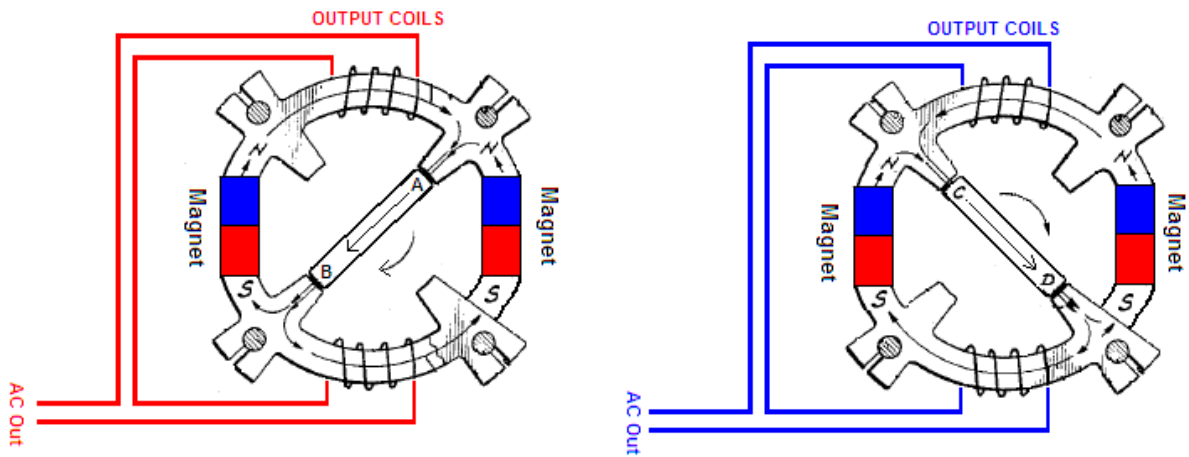
Obr. 3: Rotorový magnet toroidního generátoru



Obr. 4: Ecklinův generátor

From Robert L. Zimmerman's December 10, 1957 US Patent #2,816,240

VIDBID 2014.01.08



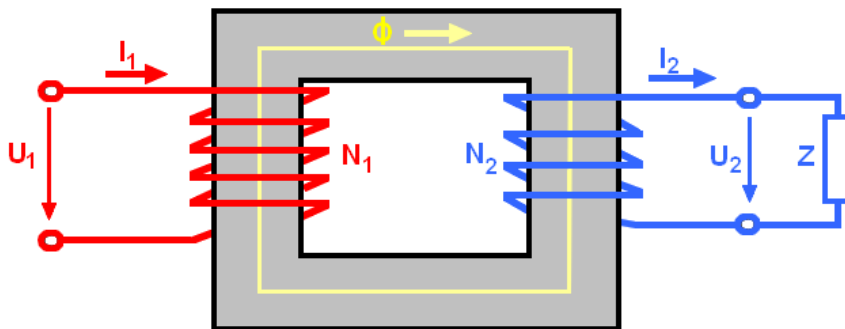
Obr. 5: Zimmermannův generátor

Všechny tři konstrukce generátoru mají společný princip generování elektrického napětí, a sice ten, že indukované napětí U_i ve statorovém vinutí generátoru je způsobeno časovou změnou magnetického toku Φ v jádru statorové cívky a řídí se indukčním zákonem, který se dá vyjádřit vztahem:

$$U_i = -N \cdot d\Phi/dt \quad (1)$$

kde N je počet závitů cívky.

Na principu indukčního zákona pracuje také transformátor, proto pro návrh toroidního generátoru můžeme použít matematický aparát návrhu transformátoru. Proto nyní svou pozornost upřeme k principu transformátoru a zásadám jeho návrhu.



Obr. 1: Princip transformátoru

Připojíme-li na primární vinutí střídavé sinusové napětí (obr. 1), začne jím procházet střídavý proud, který vybudí v magnetickém obvodu střídavý magnetický tok Φ . Tento magnetický tok indukuje v sekundárním vinutí napětí U_i , jehož velikost je dána indukčním zákonem a je úměrná počtu N závitů:

$$\text{Předpokládejme, že platí } \Phi = \Phi_{\max} \cdot \sin \omega \cdot t$$

Po dosazení do indukčního zákona $u_i = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$ dostaneme

$$u_i = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega \cdot \cos \omega \cdot t$$

kde amplituda průběhu je $U_{i\max} = N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega$

Efektivní hodnotu získáme dělením $\sqrt{2}$

$$U_i = \frac{N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega}{\sqrt{2}} = \frac{N \cdot \Phi_{\max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot N \cdot \Phi_{\max} \cdot f$$

$$U_i = 4.44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N$$



Při návrhu transformátoru se volí taková hodnota indukovaného napětí U_i , která je rovna napětí napájecímu. Kdybychom měli ideální transformátor, který má nulové ztráty v železe (v náhradním

schématu na obr. 2 představované R_{FE}) a nekonečně velkou permeabilitu μ , byl by magnetizační proud I_0 roven nule.

V technické praxi se při návrhu transformátoru počítá parametr N_{1V} , který představuje počet závitů na 1 Volt. Ten na základě výše uvedeného vypočítáme následovně:

$$N_{1V} = 1/(4,44 \cdot \Phi_{\max} \cdot f) \quad (2)$$

U běžných síťových transformátorů ($f = 50\text{Hz}$), jejichž feromagnetické jádro je složeno z izolovaných plechů vyrobených z elektrotechnické oceli (se 3% křemíku), volíme maximální magnetickou indukci $B = 1\text{T}$. Jestliže v homogenním magnetickém poli pro magnetický tok platí $\Phi = B \cdot S_{Fe}$, kde S_{Fe} je průřez jádra, potom počet závitů na Volt u síťového transformátoru vypočítáme následovně:

$$N_{1V} = 1/(4,44 \cdot 1 \cdot 50 \cdot S_{Fe}) = 1/(222 \cdot S_{Fe}) \quad [-, \text{m}^2] \quad (3)$$

Hodnota S_{Fe} ve výše uvedeném vzorci je v m^2 . V praxi se běžně používá tento vzorec:

$$N_{1V} = 45/S_{Fe} \quad [-, \text{cm}^2] \quad (4)$$

kde S_{Fe} je v cm^2 . Zvědavý čtenář možná přemýšlí, kde se v (4) vzala konstanta 45. Velmi jednoduše: $1/222 = 0,0045045045$ a když průřez jádra převedeme ze čtverečních metrů na čtvereční centimetry, tak dostaneme číslo 45. Pokud bychom zvolili jiné sycení jádra než 1 Tesla, dostali bychom jinou konstantu. Například při $B_{\max} = 1,5\text{T}$ bychom dospěli ke vzorci $N_{1V} = 30/S_{Fe}$.

Průřez jádra se určí z příkonu P_1 pomocí následujícího vztahu:

$$S_{Fe} = \sqrt{P \cdot 1,2} \quad (5)$$

kde P je výkon transformátoru.

Vztah (5) je empirický a konstanta 1,2, která platí pro síťové transformátory u rotačních generátorů nemusí platit. Proto do tohoto vztahu zavedeme obecnou konstantu k :

$$S_{Fe} = \sqrt{P \cdot k} \quad (6)$$

Vztah (2) upravíme pro naše potřeby následovně:

$$N_{1V} = 1/(\sqrt{2} \cdot \pi \cdot B_{\max} \cdot S_{Fe} \cdot f) \quad (7)$$

Z výše uvedeného je zřejmé, že uvedené vztahy platí pouze pro sinusový průběh indukovaného napětí U_i . To znamená, že čím více se bude průběh U_i blížit sinusovce, tím bude výpočet přesnější.

Protože konstanta k ve vztahu (6) je neznámá, musíme ji pro daný typ generátoru určit experimentálně. Stejně tak experimentálně určíme hodnotu B_{\max} , protože rozložení B v jádře není homogenní, ale závisí na konkrétní konstrukci generátor. Hodnota B_{\max} , kterou zjistíme kombinací experimentu a výpočtu, bude aproximací více hodnot.

Při experimentálním určování hodnot k , a B_{\max} budeme postupovat následovně:

- 1) Na toroidní jádro o vhodném průřezu S_{Fe} navimeme N závitů drátem o vhodném průměru D_{Cu} .
- 2) Pomocí statické magnetické simulace určíme vhodnou velikost rotorových magnetů.
- 3) Sestavíme generátor a připojíme ho k vhodnému elektrickému pohonu.

- 4) Vypočteme průřez S_{Cu} drátu podle vzorce $S_{Cu} = \pi \cdot D_{Cu}^2 / 4$
- 5) Vypočteme jmenovitý proud I_n pro zvolenou hodnotu proudové hustoty J v rozsahu 2,5 až 4 A/mm^2 podle vztahu $I_n = S_{Cu} \cdot J$. Pro začátek zvolíme $J = 4 \text{ A/mm}^2$.
- 6) Roztočíme generátor a zatížíme ho rezistorem vhodné velikosti tak, abychom dosáhli jmenovitého proudu I_n , přičemž použijeme Ohmův zákon $R = U_n / I_n$, kde U_n je svorkové napětí generátoru.
- 7) Generátor necháme cca hodinu běžet a potom zjistíme oteplení vinutí. Pokud rozdíl mezi teplotou okolí a teplotou vinutí bude větší než 30° , po vychladnutí generátoru měření zopakujeme při menším proudu I_n .
- 8) Na základě změřeného napětí U_n a proudu I_n vypočítáme jmenovitý výkon generátoru $P_n = U_n \cdot I_n$.
- 9) Vypočítáme konstantu $k = S_{Fe} / \sqrt{P_n}$.
- 10) Změříme indukované napětí U_i (tj. svorkové napětí generátoru bez zátěže), frekvenci f a vypočteme B_{max} podle vztahu $B_{max} = U_i / (\sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot f \cdot S_{Fe})$.

Nyní již můžeme přistoupit k návrhu generátoru podobným způsobem, jakým navrhujeme transformátory. To znamená, že zvolíme výkon generátoru a svorkové napětí. Vypočítáme jmenovitý proud a průměr drátu. Podle vztahu (6) určíme velikost (toroidního) jádra a podle (7) vypočteme počet závitů na Volt. Celkový počet závitů N cívky bude $N = N_{iV} \cdot U_n$. Dále, podobně jako u transformátoru, provedeme kontrolu, jestli se vinutí vejde na jádro pro zvolenou vzdálenost rotorových magnetů od jádra statoru. Pokud budeme mít štěstí, povode se nám to napoprvé a nebudeme muset výpočet a simulaci opakovat pro větší mezeru mezi magnety a statorovým jádrem.