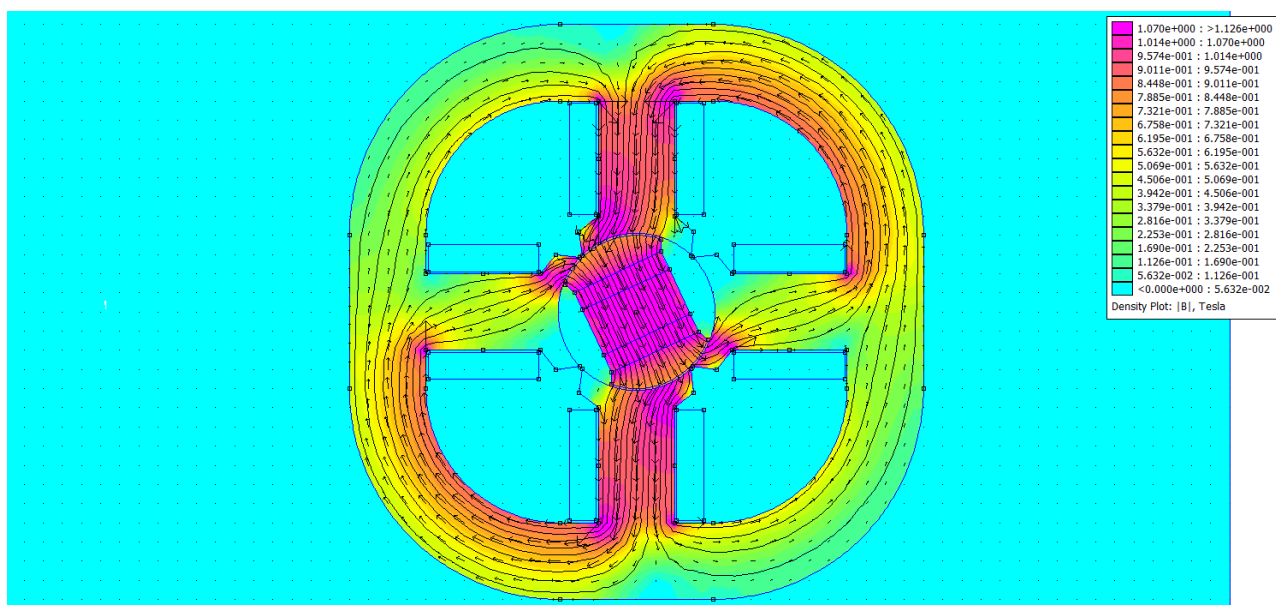


Ověření principu motorgenerátoru

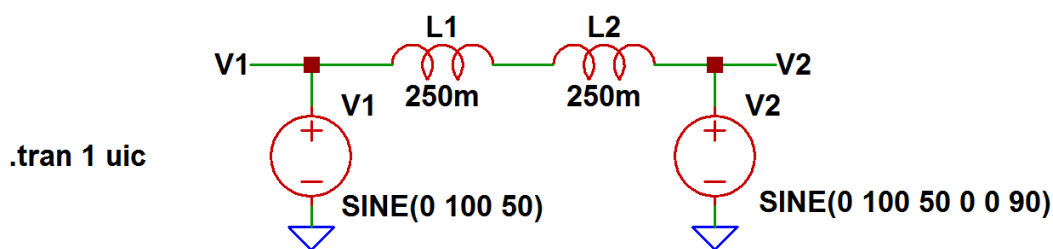
© Ing. Ladislav Kopecký, prosinec 2017

Nejdříve stručně popíšeme, o co se jedná. Základem je dvoufázový generátor, který má minimálně dvě satorové cívky a jejich výstupní napětí jsou vzájemně posunuta o 90° . Tyto cívky elektricky propojíme. V důsledku toho se změní fázový posun mezi indukovaným napětím v cívkách a proudem tak, že magnetické účinky proudu napomáhají rotaci místo aby proud generátor brzdil jako je tomu u běžných generátorů. Ověřování budeme provádět na dvoufázovém alternátoru se čtyřmi satorovými cívkami a dvoupólovým permanentním magnetem v rotoru. Simulační schéma alternátoru najdete na obr. 1.

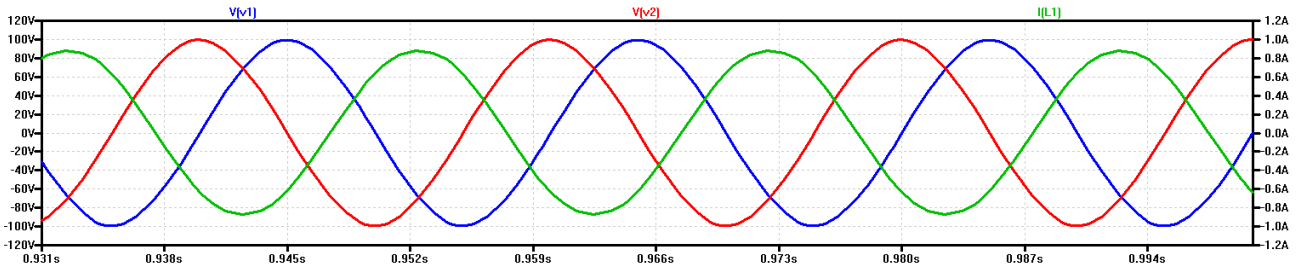


Obr. 1: Simulace dvoufázového generátoru – poloha rotoru: 25°

Nejdříve provedeme elektrickou simulaci napodobující spojení dvou sousedních cívek motorgenerátoru. Přitom budeme předpokládat, že průběh indukovaného napětí je sinusový. Na obr. 2 máme elektrické schéma simulace, kde druhá cívka generuje napětí U_2 , které je fázově posunuto o 90° . To znamená, že U_2 předbíhá U_1 o 90° . Graf 1 ukazuje výstup simulace, který ukazuje fázový posun mezi napětím U_1 a proudem protékajícím cívku L_1 , jež představuje indukčnost vinutí. Tento fázový posun je 135° . Když zatížíme cívku generátoru odporovou zátěží, bude fázový posun menší než 90° a generátor bude brzděn. Jestliže je větší než 90° , měl by generátor naopak pomáhat rotaci.



Obr. 2: Elektrická simulace dvou spojených cívek - fázový posun: 90°



Graf 1: Fázový posun mezi U1, U2 a I(L1)

Nyní se vrátíme k magnetickému modelu generátoru a provedeme magnetickou simulaci. Budeme si přitom všimnout pouze dvou sousedních cívek, které budou mít společný proud. Nejdříve musíme určit orientaci cívek, abychom mohli říci, který proud je kladný a které napětí je kladné. Vyjdeme přitom z Faradayova indukčního zákona, který říká: „Indukované elektromotorické napětí v elektrickém obvodu je rovno rychlosti změny magnetického indukčního toku procházejícího obvodem.“ Matematicky to můžeme vyjádřit následovně:

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Znaménko minus ve výše uvedeném vztahu vyjadřuje jev, že indukované napětí je takového směru, že brání změně magnetického indukčního toku, která jej vyvolala. Tak to vyjádřil r. 1834

H. F. Lenz (1804 – 1865) a jev se označuje jako Lenzův zákon.

Podívejme se na obr. 1 a předpokládejme, že rotor se otáčí v kladném směru, tj. proti směru rotace hodinových ručiček. V tom případě v jádru cívky v pravo vzrůstá magnetická indukce $B.n$ (Jedná se o označení v simulačním programu FEMM: n jako normála, na rozdíl od t jako tečna.). To znamená, že indukované napětí bude záporné a proud v cívce se bude snažit působit proti vzrůstajícímu magnetickému toku $\Phi = B.S$, kde S je plocha, jíž magnetický tok prochází. Kladná $B.n$ bude v kladném směru osy x . Jako druhou cívku vezmeme cívku horní a zde kladná $B.n$ bude ve směru kladné osy y . Nejdříve zjistíme průběh $B.n$ v závislosti na poloze rotoru a potom podle vztahu pro indukované napětí vypočítáme U_i .

Použijeme k tomu následující Lua skript:

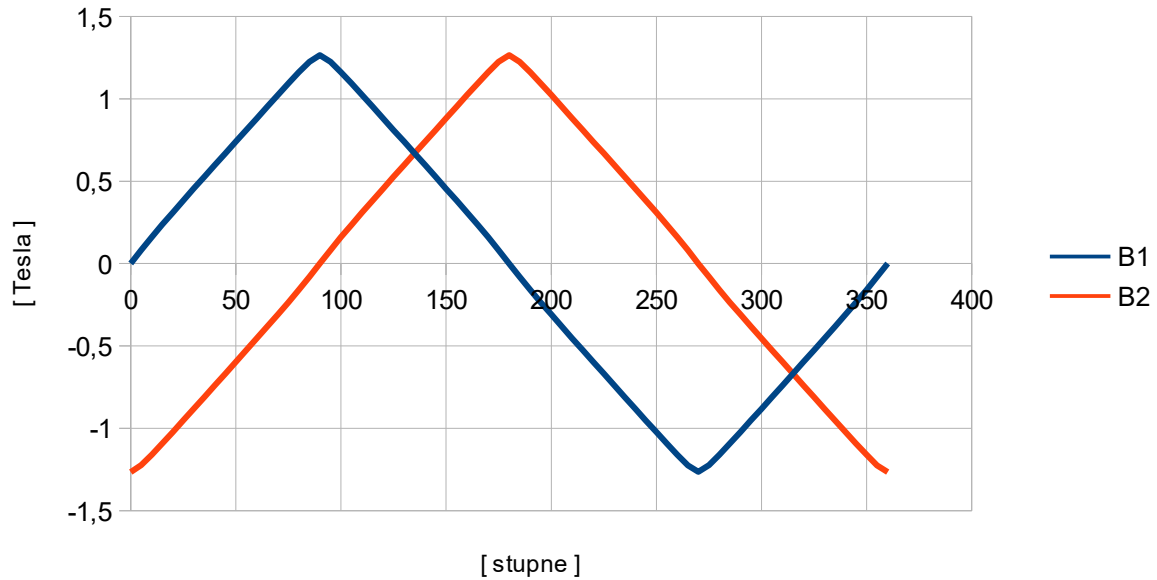
```
showconsole()
clearconsole()
print("angle , B1 , B2")
open("MG.fem")
mi_saveas("temp.fem")
for n=0,360,5 do
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
mo_addcontour(80,20)
mo_addcontour(80,-20)
f,B1=mo_lineintegral(0)
mo_clearcontour()
mo_addcontour(-20,80)
mo_addcontour(20,80)
f,B2=mo_lineintegral(0)
    print(n,B1,B2)
mo_close()
```

```

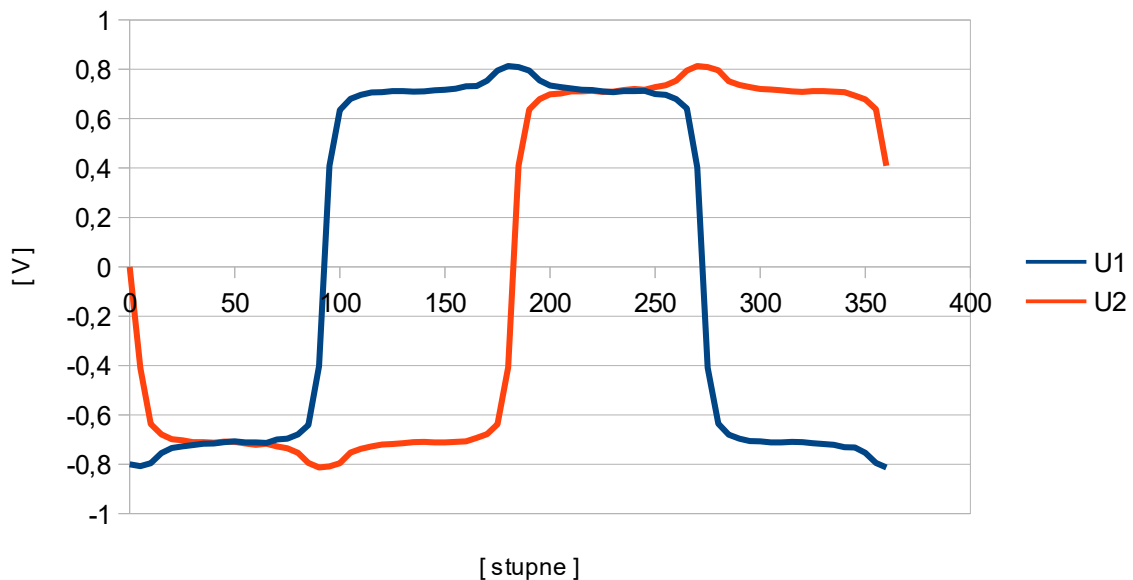
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(1)
mi_moverotate(0,0,5)
end

```

Graf 2 ukazuje průběh B.n a graf 3 průběh indukovaného napětí. Vidíme, že napětí U2 je za napětím U1 zpožděno o 90°, čili fázový posun mezi U1 a U2 je -90°.



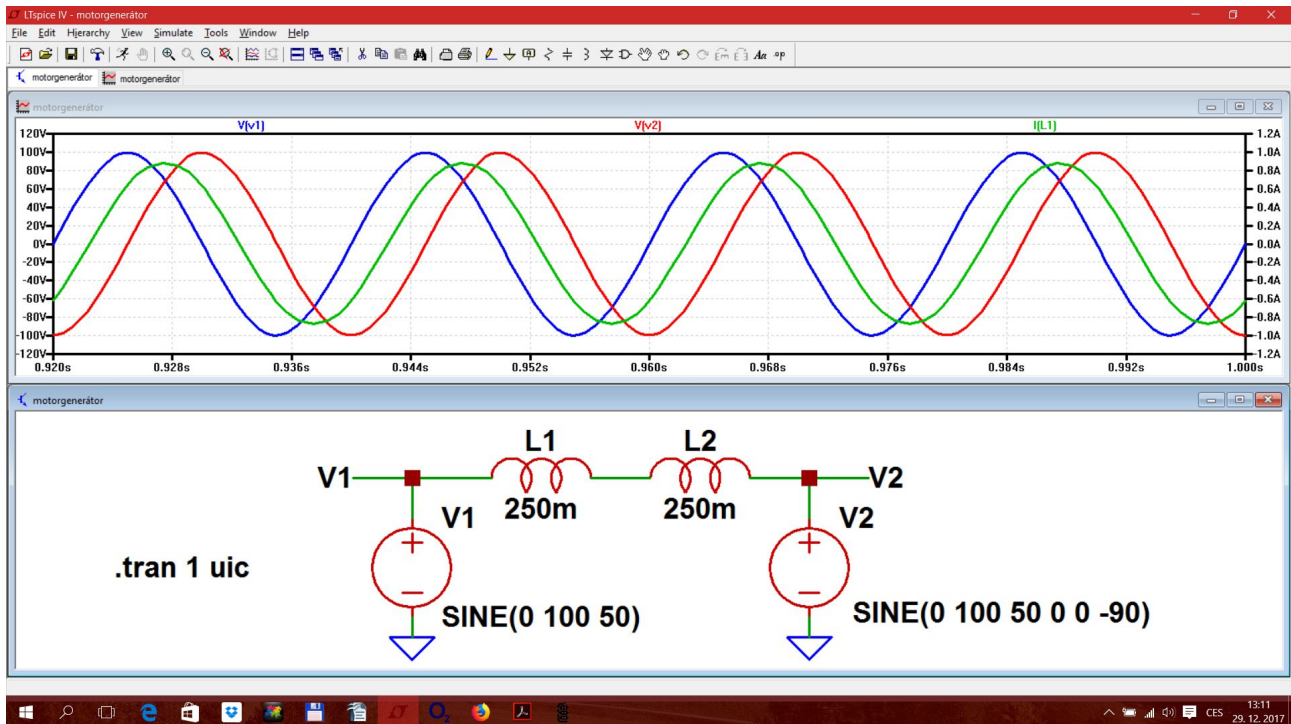
Graf 2: Průběhy B.n v jádrech dvou sousedních cívek



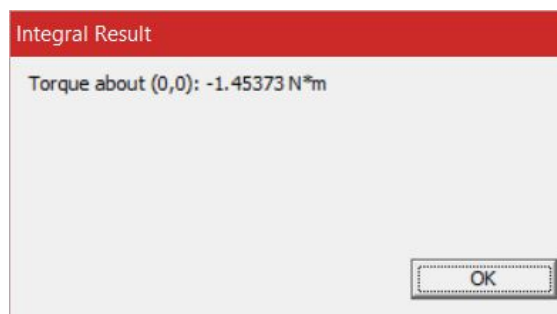
Graf 3: Průběhy indukovaného napětí při nesprávné volbě sousedních cívek

Provedeme tedy elektrickou simulaci ještě jednou a u zdroje V2 nastavíme fázový posun -90. Výsledek můžete vidět na obr. 3. Předpokládejme, že máme polohu rotoru 25°, jak ukazuje obr. 1. V této poloze jsou obě napětí záporná a podle obr. 3 je záporný také proud. Když v této poloze rotoru změříme moment, zjistíme, že je záporný (obr. 4). Pokud bychom dokázali, aby proud byl v protifázi (viz graf 1) proti napětím U1 a U2, dosáhli bychom toho, že rotor nebude bržděn, ale

urychlován. Jak toho dosáhneme? Jednoduše tak, že u horní cívky prohodíme vývody. To znamená, že propojíme začátek jedné cívky s koncem cívky a naopak. V tom případě připočteme 180° , takže výsledný fázový posun bude $180 - 90 = 90^\circ$. Další možností je změnit směr rotace a poslední možností je jako druhou cívku zvolit dolní cívku místo horní cívky. Zvolíme třetí možnost. Znamená to provést změnu v Lua skriptu a upravit magnetický model generátoru.



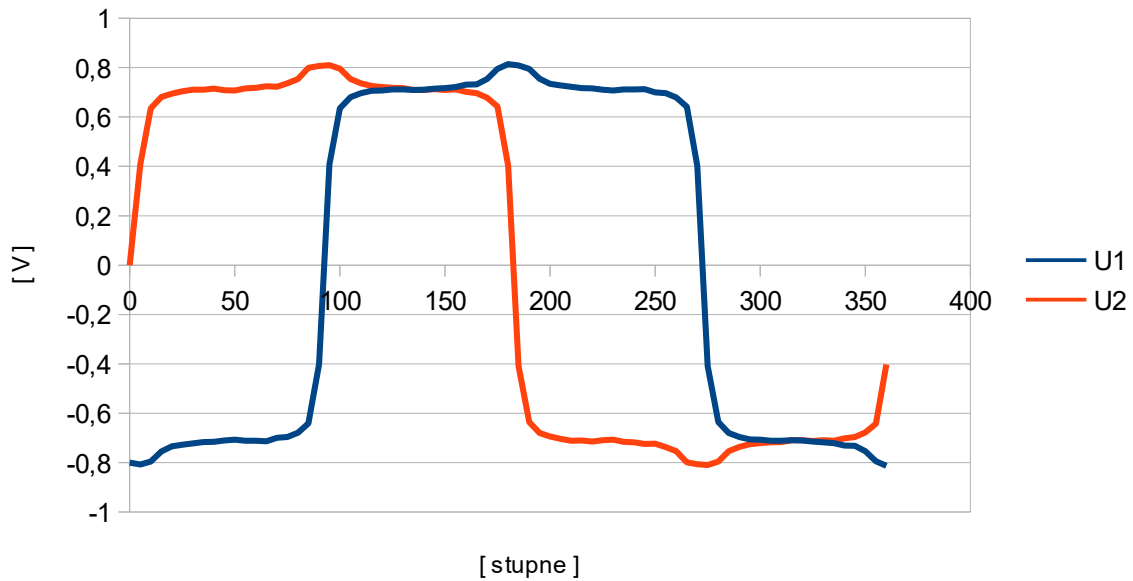
Obr. 3



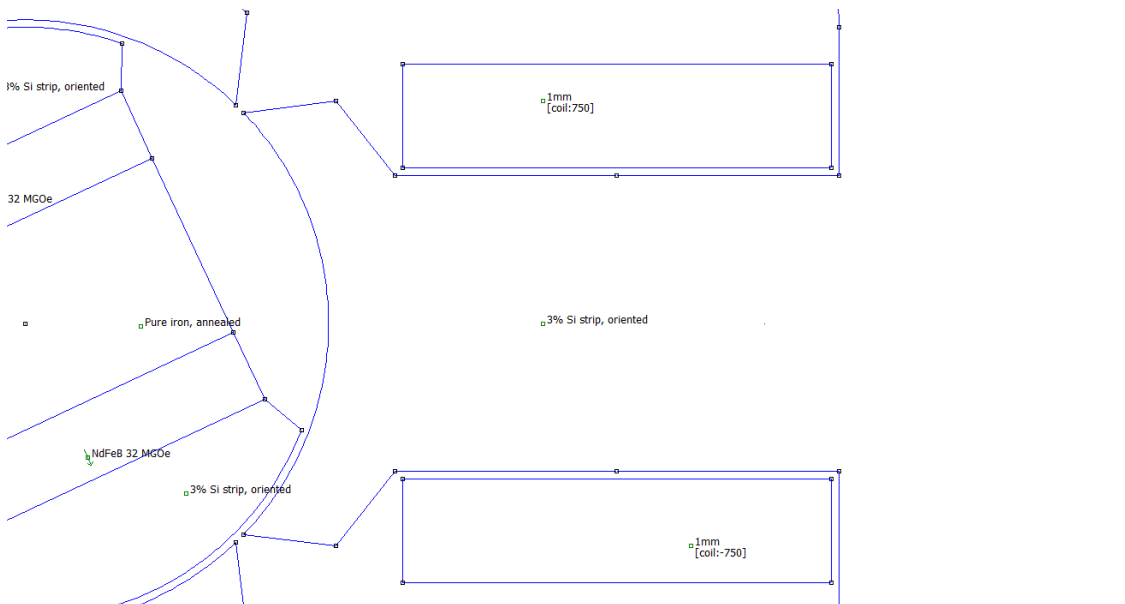
Obr. 4

Graf 4 ukazuje, že nyní je napětí U_2 (generované dolní cívkou) posunuto o $+90^\circ$. Z grafů 4 a 1 můžeme dále vyčíst, že v intervalu 90° až 180° bude společný proud záporný a v intervalu 270° až 360° bude tento proud kladný. Abychom správně zvolili polaritu cívek, musíme si uvědomit, že když magnetický tok Φ klesá, indukované napětí je kladné a naopak. Když se podíváme na obr. 1, vidíme, že při pohybu rotoru v kladném směru Φ stoupá, takže je generováno záporné napětí. Musíme tedy zvolit takovou orientaci cívky, která bude odpovídat směru Φ v jádru pravé cívky. Když nastavíme záporný proud v cívce, bude tato cívka na zvyšující se Φ reagovat správně, tedy bude působit proti němu. Orientaci spodní cívky zvolíme stejně. Na obr. 5 máme detail cívky v simulačním modelu. V obdélníku nahoře, který znamená řez vinutím, máme v hranaté závorce: „[coil: 750]”. V obdélníku dole je text: „[coil: -750]”. Tím je určena polarita cívky. Přitom platí pravidlo pravé ruky: Prsty ukazují směr proudu a palec ukazuje směr magnetického toku. Nastavíme správnou orientaci dolní a pravé cívky, zvolíme záporný proud -1A a provedeme simulaci v intervalu 45° až 225° . Potom zvolíme proud obou cívek 1A a provedeme simulaci v

intervalu 225° až 405° (45°). Pokud bude v obou případech moment převážně kladný, můžeme princip motorgenerátoru považovat za prokázáný.



Graf 4: Průběhy indukovaného napětí při správné volbě sousedních cívek

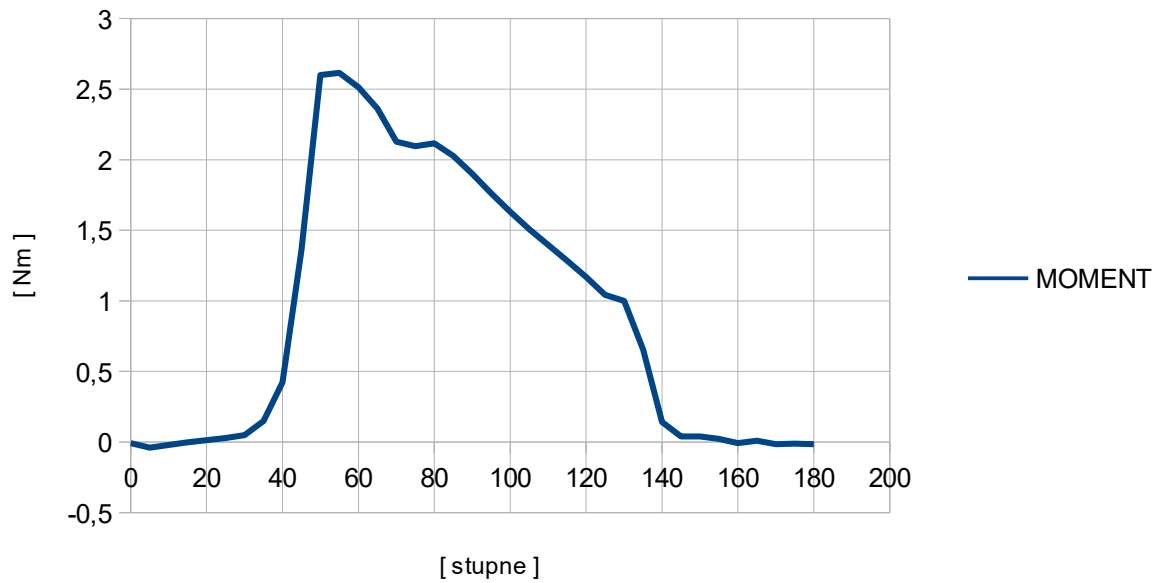


Obr. 5: Kladná orientace statorové cívk

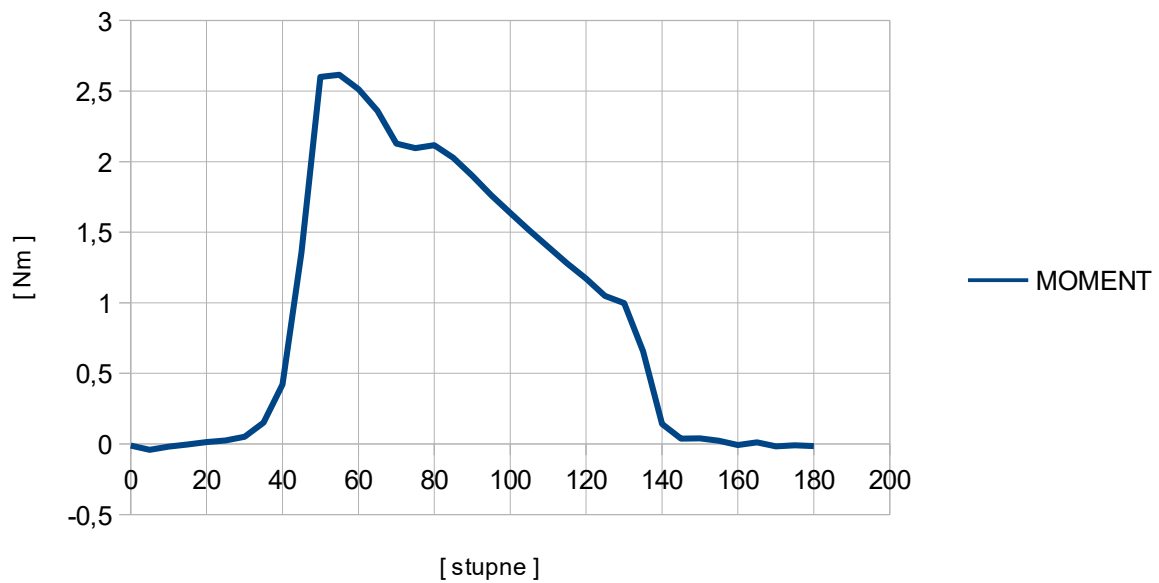
Grafy 5 a 6 ukazují, že kladný moment naprosto převládá, proto můžeme konstatovat, že výše popsaný princip motorgenerátoru je v souladu s přírodními zákony a tudíž by měl fungovat.

Ještě pro klid duše provedeme elektrickou simulaci dvou spojených cívek pro nesinusový průběh indukovaného napětí, protože generátor vyrábí napětí, které se více podobá obdélníku (viz grafy 3 a 4). Výsledek simulace najdete na obr. 6, který ukazuje, že tvar U_i nemá vliv na fázové poměry mezi napětími a proudem. Motorgenerátor by tedy měl fungovat nejen pro sinusový průběh U_i , ale přinejmenším by měl fungovat i při obdélníkovém nebo lichoběžníkovém tvaru U_i .

Z analýzy dále vyplývá, že volbou dvojice cívek určujeme, na kterou stranu se motorgenerátor bude točit: Bude se točit na tu stranu, kde bude zajištěn fázový posun $+90^\circ$. Dále směr rotace můžeme ovlivnit prohozením vývodů jedné z dvojice cívek.



Graf 5: Průběh momentu v intervalu 45° až 225° při proudu -1A



Graf 6: Průběh momentu v intervalu 225° až 45° při proudu 1A

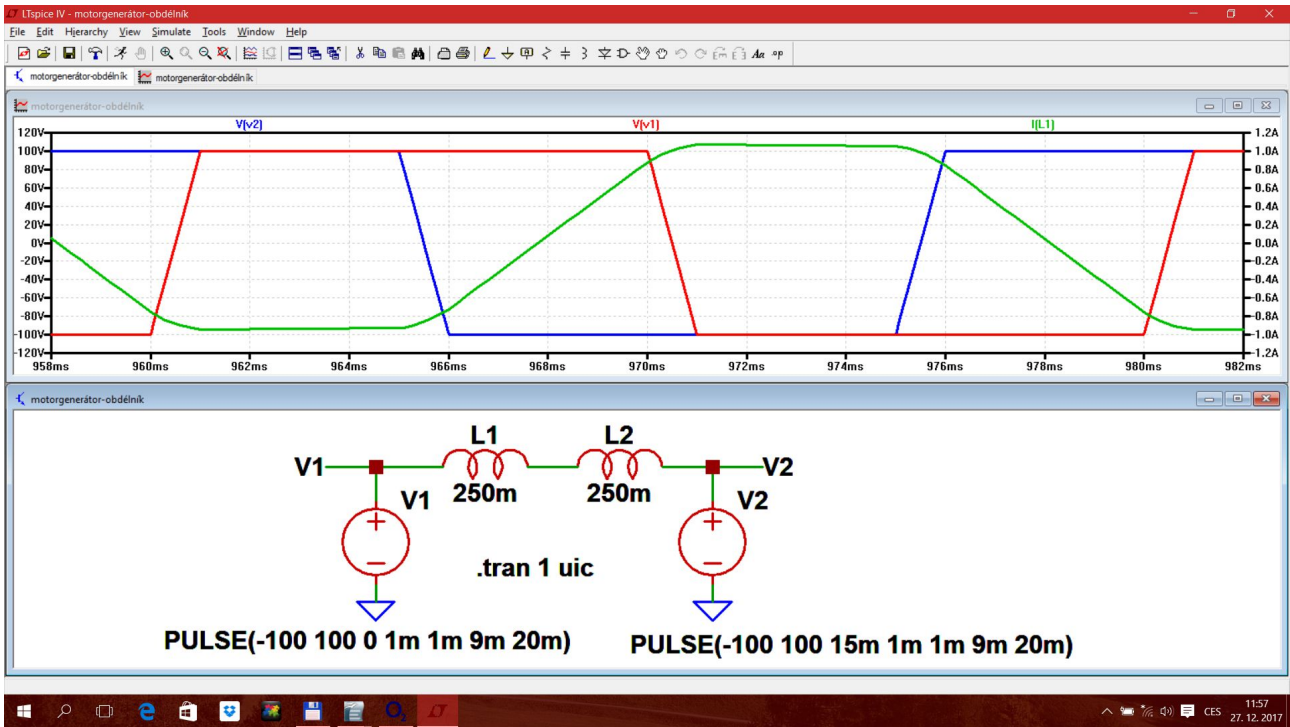
Pro úplnost sem ještě vložíme Lua skript pro výpočet momentu:

```
showconsole()
clearconsole()
print("UHEL , MOMENT")
open("MG.fem")
mi_saveas("temp.fem")
for n=0,180,5 do
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
```

```

mo_groupselectblock(1)
m=mo_blockintegral(22)
print(n,m)
mo_close()
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(1)
mi_moverotate(0,0,5)
end

```



Obr. 6: Elektrická simulace dvou spojených cívek při nesinusovém průběhu U_i .