

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čtyřvrstvá vinutí v elektrických strojích točivých

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel PEKÁRNA**
Osobní číslo: **E13B0052K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Čtyřvrstvá vinutí v elektrických strojích točivých**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte přehled druhů vinutí a jejich použití v elektrických strojích.
2. Popište zásady pro výpočet dvouvrstevných vinutí točivých strojů.
3. Definujte použití čtyřvrstevných vinutí v asynchronních strojích a strojích s permanentními magnety včetně jejich výhod a nevýhod oproti vinutím dvouvrstevným.
4. Parametry vybraných vinutí spočítejte a porovnejte.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bartoš, V.: Teorie elektrických strojů. ZČU v Plzni, Plzeň 2009.
2. Články z databáze IEEE.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Laksar


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2016

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá rozdělením, výpočtem a porovnáním vinutí v elektrických strojích točivých. V první části této práce je popsáno základní rozdělení vinutí. V druhé části jsou definována dvouvrstvá vinutí a zásady pro jejich výpočet. Poslední kapitoly jsou potom věnovány čtyřvrstvým vinutím a jejich porovnáním s vinutím dvouvrstvým.

Klíčová slova

Činitel vinutí, čtyřvrstvé vinutí, diferenční rozptyl, dvouvrstvé vinutí, fázorová hvězdice, Görgesův diagram, krok vinutí, Tingleyho schéma, zlomkové vinutí, zubové vinutí.

Abstract

The subject of this thesis is the division, calculation and comparison of windings in rotating electrical machines. The first part of this thesis describes the basic distribution of windings. The second part provides a definition of two-layer windings and their calculation basic. The last chapters are devoted to the four-layer windings and its comparison with the two-layer windings.

Key words

Winding factor, four-layer windings, differential scattering, two-layer windings, phasor star, Görges diagram, winding pitch, Tingley scheme, fractional winding, tooth winding.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2017

Pavel Pekárna

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Laksarovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl touto cestou00 poděkovat mé rodině a přátelům za podporu při studiu.

Obsah

<u>OBSAH</u>	8
<u>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</u>	8
<u>ÚVOD</u>	9
<u>1. PŘEHLED ROZDĚLENÍ VINUTÍ</u>	10
1.1 <u>DŮLEŽITÉ POJMY</u>	10
1.2 <u>JEDNOVRSTVÁ VINUTÍ</u>	11
1.2.1 <i>Se soustřednými cívkami</i>	11
1.2.2 <i>Se stejnými cívkami</i>	12
1.3 <u>DVOUVRSTVÁ VINUTÍ</u>	12
1.3.1 <i>Uzavřená vinutí</i>	13
1.3.2 <i>Rozstříhaná vinutí</i>	14
1.4 <u>ROZDĚLENÍ DRÁŽEK VINUTÍ</u>	15
<u>2. ZÁSADY PRO VÝPOČET DVOUVRSTVÝCH VINUTÍ</u>	16
2.1 <u>FÁZOROVÁ HVĚZDICE A NAPĚŤOVÝ POLYGON</u>	16
2.2 <u>TINGLEYHO SCHÉMA</u>	17
2.3 <u>DEFINOVÁNÍ KROKU VINUTÍ</u>	18
2.4 <u>ČINITEL VINUTÍ</u>	20
2.4.1 <i>Činitel zkrácení kroku</i>	20
2.4.2 <i>Činitel rozlohy</i>	21
2.5 <u>VÍCEFÁZOVÁ VINUTÍ</u>	22
2.5.1 <i>Zlomková vinutí</i>	22
2.5.2 <i>Rozstříhaná vinutí</i>	22
2.6 <u>GÖRGESŮV DIAGRAM</u>	23
2.7 <u>PŘÍKLAD DVOUVRSTVÉHO VINUTÍ</u>	24
<u>3. DEFINOVÁNÍ ČTYŘVRSTVÝCH VINUTÍ</u>	28
3.1 <u>ČTYŘVRSTVÉ VINUTÍ V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH</u>	28
3.2 <u>ČTYŘVRSTVÉ VINUTÍ VE STROJÍCH S PERMANENTNÍMI MAGNETY</u>	28
<u>4. POROVNÁNÍ DVOUVRSTVÝCH A ČTYŘVRSTVÝCH VINUTÍ</u>	30
4.1 <u>VINUTÍ S PLNÝM KROKEM</u>	30
4.2 <u>VINUTÍ SE ZKRÁCENÝM KROKEM</u>	31
4.3 <u>ZLOMKOVÉ VINUTÍ</u>	32
4.4 <u>ZUBOVÉ VINUTÍ</u>	33
<u>ZÁVĚR</u>	34
<u>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</u>	35

Seznam symbolů a zkratek

a	počet párů paralelních větví
J	moment setrvačnosti
K	počet cívek vinutí
K_1	počet cívek v jednom fázovém svazku
k_r	činitel rozlohy
k_v	činitel vinutí
k_y	činitel kroku
m	počet fází vinutí
m'	matematický počet fází
N_s	počet závitů cívky
P	počet paprsků fázorové hvězdice
p	počet pólových dvojic stroje
P'	počet obdélníků v jedné řádce Tingleyho schématu
q	počet drážek na pól a fázi
Q	počet drážek stroje
S_c	počet fázových svazků vinutí
S_f	počet fázových svazků na jednu fázi
u	počet cívek v drážce
y	celkový krok vinutí v počtu cívkových stran
y_1	cívkový krok vinutí v počtu cívkových stran
y_2	krok spojkový v počtu cívkových stran
y_{d1}	cívkový krok vinutí v počtu drážek
y_k	krok na komutátoru v počtu lamel
y_p	krok potenciální nebo ekvipotenciální
α	elektrický úhel dvou sousedních drážek
α'	elektrický úhel dvou sousedních fázorů
α''	elektrický úhel dvou sousedních obdélníků
κ_1	počet fázorů drážkových napětí ztotožněných v jednom fázorovém směru
κ_2	počet oběhů nutných k uzavření napěťového polygonu
τ_{dif}	diferenční rozptyl

Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá rozdělením, výpočtem a porovnáním vinutí v elektrických strojích točivých.

Práce je rozdělena na čtyři části, kdy v té první jsou definovány důležité pojmy z oblasti vinutí, jako je závit, cívka, nebo krok. Dále je zde zpracováno základní rozdělení vinutí a jeho způsoby vkládání do drážek.

Druhá část je věnována zásadám pro výpočet dvouvrstvých vinutí, kde jsou definovány veličiny důležité nejen k sestrojení vinutí, ale také k určení některých jeho vlastností.

Ve třetí části je probráno provedení čtyřvrstevných vinutí, kde je práce více zaměřena na vinutí ve strojích s permanentními magnety, protože se v nich používá speciální provedení vinutí, tzv. zubové. Provedení čtyřvrstevného vinutí v asynchronních strojích se totiž příliš neliší od vinutí dvouvrstevného, kde se v podstatě jedná pouze o dvě dvouvrstevná vinutí umístěná nad sebou.

V závěrečné části bakalářské práce jsou vybrána čtyři vinutí, s různými parametry, která jsou použita jak pro dvouvrstevné, tak i čtyřvrstevné provedení a jejich vlastnosti jsou porovnány.

1. Přehled rozdělení vinutí

1.1 Důležité pojmy

- **Závit**

Nejjednodušší prvek vinutí. Jedná se o spojení dvou vodičů, tedy drátů, účastnících se přenosu energie, uložených v drážkách.

- **Cívka**

Několik závitů, zapojených do série, umístěných ve stejných drážkách a opatřených celkovou izolací, tvoří cívku. Cívka může být někdy složena pouze z jednoho závitu, takové vinutí pak nazýváme tyčové.

- **Cívková strana**

Každá cívka má dvě aktivní strany, přední a zadní. Každá aktivní strana je umístěna v samostatné drážce. Pokud je celá drážka zaplněna aktivní stranou pouze jedné cívky, nazývá se takové vinutí jednovrstvé. Jestliže jsou v každé drážce umístěny aktivní strany dvou cívek nad sebou, jedná se o dvouvrstvé vinutí. Pokud umístíme dvě dvouvrstvá vinutí nad sebe, tak vytvoříme vinutí čtyřvrstvé, kde budou v každé drážce čtyři aktivní strany čtyř různých cívek.

- **Cívková skupina**

Několik sériově spojených cívek, uložených v sousedních drážkách tvoří cívkovou skupinu. Několik navzájem spojených cívkových skupin tvoří fázi vinutí. Cívkové skupiny ve fázi je možné spojovat jak sériově tak paralelně.

- **Cívkový krok**

Vzdálenost mezi dvěma cívkovými stranami téže cívky. Pokud je cívkový krok roven pólové rozteči, což je celkový počet drážek dělený počtem pólů, jedná se o cívku s plným krokem. Pokud je cívkový krok kratší, jedná se o cívku se zkráceným krokem. Cívkový krok může být i delší, pak se jedná o cívku s prodlouženým cívkovým krokem.

1.2 Jednovrstvá vinutí

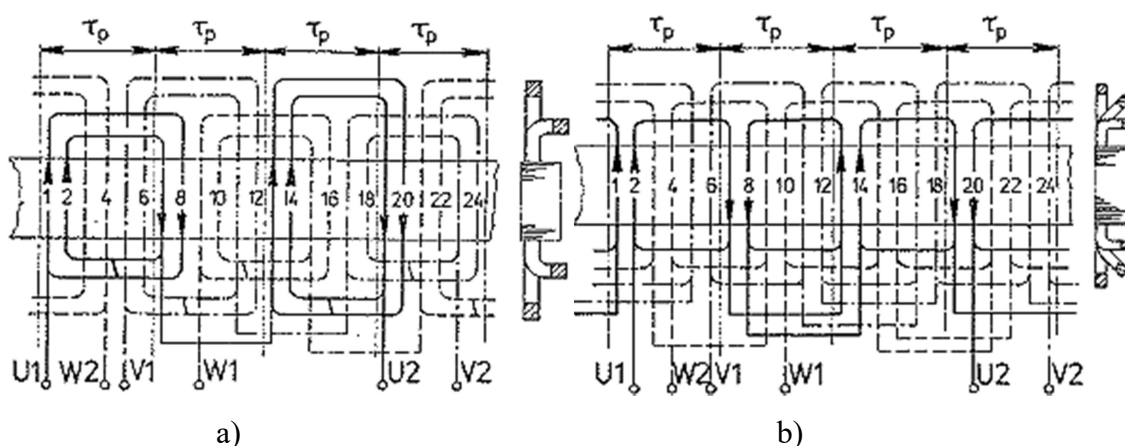
Pokud v drážce leží pouze jedna aktivní strana cívky, tak nazýváme takové vinutí jednovrstvé. Všechny cívkové strany tedy leží v jedné vrstvě. Počet cívek K je roven polovině drážek Q , tedy $K=Q/2$. Nevýhodou jednovrstvých vinutí je nemožnost použití cívek se zkráceným krokem. Jednovrstvá vinutí můžeme provést buďto se soustřednými, nebo se stejnými cívkami.

1.2.1 Se soustřednými cívkami

Využíváme výhody, že střídavá vinutí nemusí mít stejný krok, můžeme tedy použít cívky s různou velikostí i tvarem. Toto vinutí může být provedeno jako pólové nebo pólpárové.

Pólpárové vinutí je v každé fázi provedeno z různých cívek, jak je vidět na *Obr. 1.1a*). Cívka uložená v drážkách 1-8 má větší krok než je pólová rozteč, cívka uložená v drážkách 2-7 má naopak krok menší. Tyto dvě cívky tvoří jednu cívkovou skupinu a tvoří dva póly fáze [4]. Čela vinutí jsou umístěna ve dvou patrech, proto toto vinutí nazýváme dvoupatrové.

Pólové vinutí, které je zobrazeno na *Obr. 1.1b*), může být také provedeno jako patrové, kdy je každá cívková skupina stejná, nevýhodou je však větší spotřeba materiálu, protože jsou čela vinutí delší. Pólové vinutí je v každé fázi provedeno ze stejných cívek, ve stroji je tedy tolik tvarů cívek kolik má stroj fází. „Z technologického hlediska je pólové vinutí výhodnější než pólpárové, ale odpory a reaktance jednotlivých fází nejsou stejné“ [4]. Čela vinutí jsou umístěna ve třech patrech, toto vinutí je tedy třípatrové.



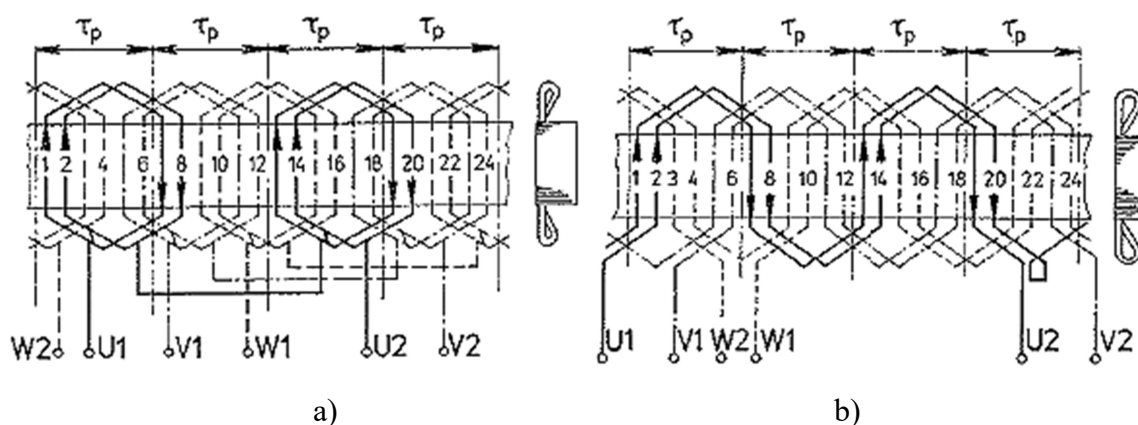
Obr. 1.1 a) trojfázové jednovrstvé dvoupatrové vinutí s pólpárovými cívkami

b) trojfázové jednovrstvé třípatrové vinutí s pólovými cívkami [4]

1.2.2 Se stejnými cívkami

Vinutí se stejnými cívkami může být rovněž provedeno jako pólové nebo pólpárové, s různým počtem fází. „V tomto vinutí používáme jen jeden tvar cívek, proto mají jednotlivé fáze stejný odpor a reaktanci, vinutí je tedy jak technologicky, tak elektricky výhodnější než vinutí soustředné.“[4]. Toto vinutí můžeme realizovat jako smyčkové, nebo vlnové.

U smyčkového vinutí, které je zobrazeno na *Obr. 1.2 a)*, tvoří cívky smyčky, kde jsou konce cívkové skupiny spojeny s koncem následující cívkové skupiny. Na *Obr. 1.2 b)*, je zobrazeno vinutí vlnové, kde cívky tvoří vlny, konec první cívky je spojen se začátkem cívky následující. Výhodou u vlnového vinutí je menší spotřeba vodičů na spojky mezi cívkovými skupinami.



Obr. 1.2. a) trojfázové jednovrstvé smyčkové vinutí s pólpárovými cívkami

b) trojfázové jednovrstvé vlnové vinutí s pólpárovými cívkami [4]

1.3 Dvouvrstvá vinutí

U dvouvrstvých vinutí leží v každé drážce dvě aktivní strany dvou cívek umístěných nad sebou. Počet cívek K je roven celkovému počtu drážek Q , tedy $K=Q$. Dvouvrstvá vinutí se zhotovují z cívek stejných tvarů a rozměrů, což přináší řadu technologických výhod.

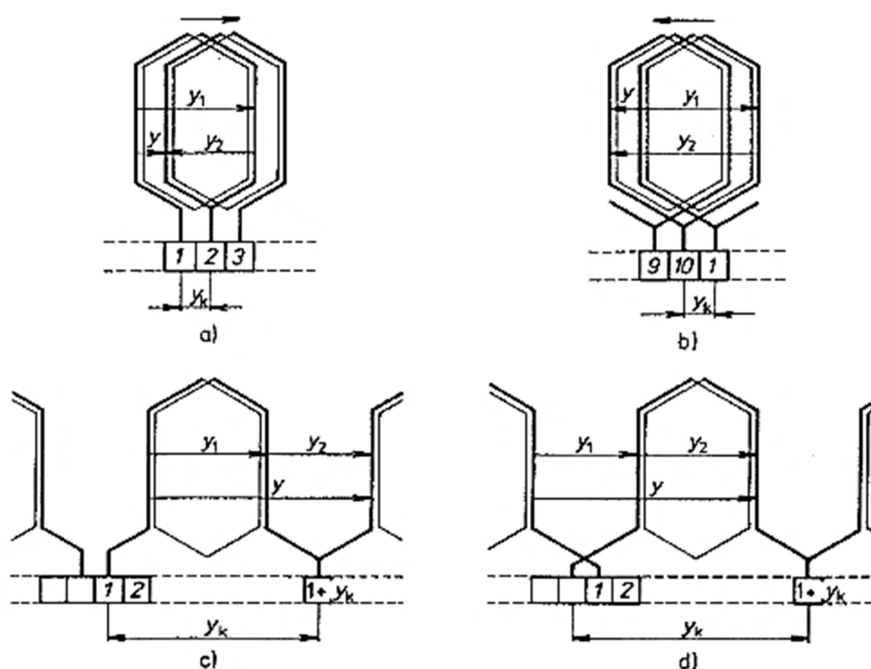
„Největší výhodou dvouvrstvých vinutí je možnost zkrácení kroku k potlačení vyšších harmonických v křivce elektromotorického napětí. Toto vinutí má ale i další přednosti, jako možnost navrhnout různé počty paralelních větví, zlomkového počtu drážek na pól a fázi, nebo rovnoměrnější rozložení čel cívek“[2].

Dvouvrstvá vinutí mají ale také pár nevýhod, jako složitější zakládání cívek do drážek, nebo jejich složitější opravu. Tato vinutí můžeme rozdělit na uzavřená, nebo na rozstříhaná.

1.3.1 Uzavřená vinutí

Uzavřená vinutí se používají většinou u stejnosměrných strojů, kde se vinutí skládá z navzájem spojených pravidelných bubnových cívek vyvedených na komutátor. Vinutí můžeme rozdělit na tyčové, které má jeden závit na cívku, nebo závitové, s více závity na cívku. Dle tvaru cívek rozdělujeme vinutí na smyčkové nebo vlnové. Podle počtu paralelních větví ve vztahu k počtu pólů můžeme tato vinutí rozdělit na sériová, sérioparalelní, paralelní, nebo víceparalelní.

V závislosti na kroku komutátoru, může být uzavřené vinutí provedeno jako křížené nebo nekřížené. Pokud bude u smyčkového vinutí krok komutátoru kladný, tak se vývody cívek nebudou křížit a vinutí bude tedy nekřížené, při záporném kroku komutátoru bude vinutí křížené. U vlnového vinutí je to přesně naopak. „Obě vinutí jsou elektricky rovnocenná, s ohledem na úsporu materiálu však dáváme přednost vinutí nekříženému, neboť má kratší spojky ke komutátoru“ [1]. Základní rozdělení stejnosměrných uzavřených vinutí je uvedeno na Obr. 1.3.



Obr. 1.3 Schématické znázornění základních stejnosměrných uzavřených vinutí

a) smyčkové nekřížené b) smyčkové křížené c) vlnové nekřížené d) vlnové křížené [2]

Uzavřená vinutí je možno použít i u střídavých strojů, kde není vinutí připojené na komutátor, ale na vhodných místech napojené na vývody. Chceme-li použít toto vinutí jako vícefázové, musí být vzhledem k počtu fází symetrické.

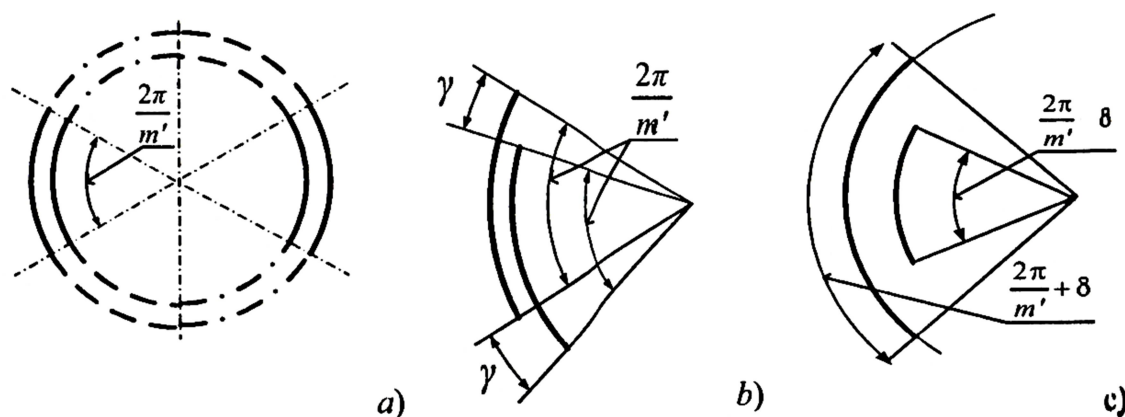
1.3.2 Rozstříhané vinutí

U střídavých strojů se většinou používají vinutí rozstříhaná. Využívá se zde výhody, že vinutí těchto strojů nemusí být uzavřené, protože není připojeno ke komutátoru. Díky této skutečnosti je možné původní stejnosměrné vinutí rozstříhat na určitý počet částí a po rozstříhání jej jiným vhodným způsobem opět spojit.

„Při opětovném spojování vinutí se bere ohled na získání maximálního činitele rozlohy a napěťovou symetrii systému, což vede k lepšímu ekonomickému využití materiálu ve stroji“ [1].

Vinutí se obvykle rozstříhá na matematický počet fází, což u třífázového vinutí je $m' = 6$, tj. každá fáze je tvořena dvěma dílky, které se algebraicky sčítají. Při porovnání tohoto vinutí s třífázovým vinutím uzavřeným, se zlepší využití mědi o 15,5%. Jinak řečeno, se při stejném množství mědi zlepší o 15,5% vnitřní výkon stroje, proto je výhodné u střídavých strojů rozstříhané vinutí používat [1].

Na Obr. 1.4 je znázorněno rozložení fází po obvodu stroje při rozstříhání vinutí, jak je z obrázku patrné, tak vinutí může být rozstříháno nejen na stejné dílce, ale také na dílce různé délky, s plným, nebo zkráceným krokem.



Obr. 1.4 Rozložení fází po obvodu stroje při rozstříhaném dvouvrstvěm vinutí

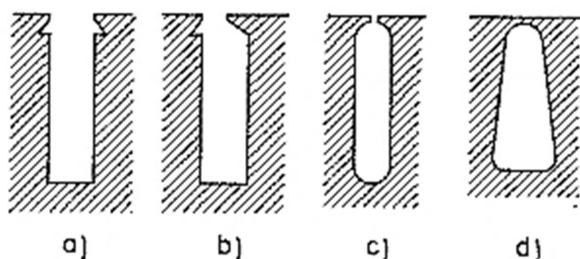
a) vinutí s plným krokem rozstříhané na stejné dílce

b) vinutí rozstříhané na stejné dílce se zkráceným krokem o úhel γ

c) vinutí s plným krokem rozstříhané na nestejné dílce, rozloha vinutí se zvětší o úhel δ [1]

1.4 Rozdělení drážek vinutí

Drážky vinutí mohou být různých tvarů, nejdůležitějším rozdělením drážek je však rozdělení podle stupně otevření, a to na otevřené, polozavřené, nebo zavřené, viz *Obr. 1.5* „Tvary otevřených a polozavřených drážek se značí písmenem velké abecedy např. *M, N, S, T, V, W*, zavřené drážky se naopak značí písmenem malé abecedy“[4]. Podle způsobu vkládání vinutí do drážek rozdělujeme vinutí na vsypávané, vkládané nebo protahované.



Obr. 1.5 Drážky elektrického stroje a) otevřené b), c) polozavřené d) zavřené [4]

- **Vsypávané vinutí**

Jednotlivá vinutí kruhového průřezu se zavádějí do polozavřených drážek. Principem je úzké otevření drážky, kterým se poté jednotlivé vodiče vsypávají. Konečný tvar cívek se formuje až uvnitř stroje. „Vsypávaná vinutí se používají u strojů, jejichž výkon nepřesahuje 100KW při jmenovitém napětí do 660V“[2].

- **Vkládané vinutí**

Vkládané vinutí se používá u strojů o výkonech nad 100KW. Pokud jmenovité napětí stroje nepřekročí 660V, je možné použít polotuhé cívky, tedy cívky bez cívkové izolace[2]. Při větších výkonech se používají tuhé cívky, které již jsou opatřené cívkovou izolací. Cívky vinutí obdélníkových průřezů se navíjejí na tvarovacích šablonách a konečný tvar cívek se získá ještě před vložením cívek do stroje.

- **Protahované vinutí**

Cívky vodičů vznikají protahováním vodiče do jednotlivých zavřených drážek izolační trubicou. Celá cívka se tedy vytvoří z jediného protaženého vodiče. Tento postup se dnes již téměř nepoužívá, protože protahování jednotlivých vodičů bylo pracné a drahé.

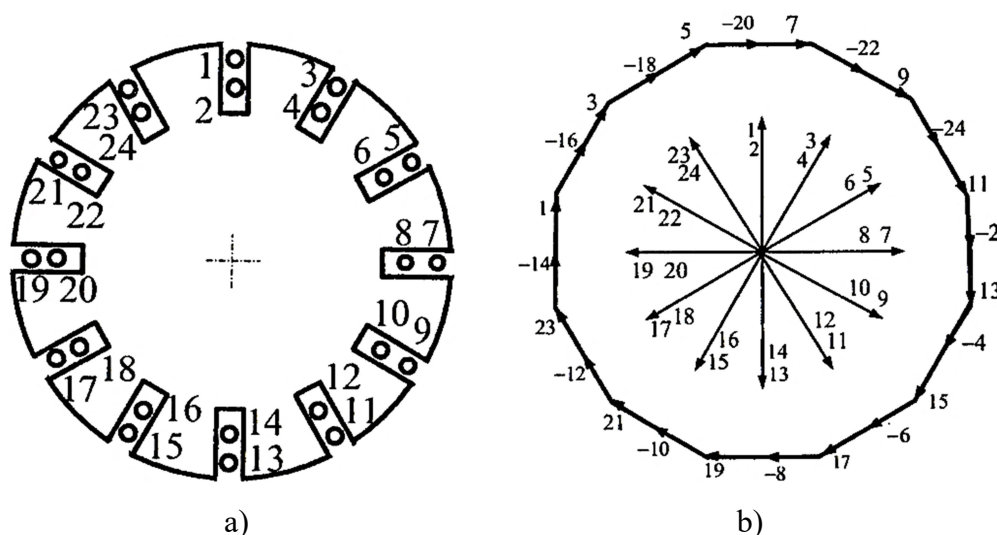
2. Zásady pro výpočet dvouvrstevných vinutí

2.1 Fázorová hvězdice a napěťový polygon

Při elektromechanické přeměně, se ve vinutí stroje indukují napětí U_i . Velikost zatěžovacího proudu je dána průřezem vodiče, pak pro získání maximálního výkonu se musí vodiče vinutí uspořádat a vzájemně pospojovat tak, aby se získala maximální hodnota tohoto napětí, což vede k uspořádání vodičů vinutí do drážek stroje, které jsou většinou rovnoměrně rozložené po obvodu stroje.

Pohybem vodičů v magnetickém poli, se v každém z nich indukují střídavé napětí a za předpokladu symetrie stroje, bude velikost všech napětí stejná. Rozdílný však bude fázorový posuv těchto napětí, který se zobrazí na fázorovém diagramu. Jednotlivé vodiče se s ohledem na jejich napětí spojují do cívek tak, aby se získalo maximální napětí na cívce. Při jiném provedení cívky bude výsledné napětí U_c klesat[1].

U dvouvrstevného vinutí se počítá s tím, že ve vodičích umístěných v téže drážce, se indukují stejné napětí jak velikostí, tak i fázorovým posuvem. Jak je vidět na *obr. 2.1 a)*, tak u těchto vinutí jsou v drážce umístěny dvě cívkové strany, které se musí rozlišit. Strany na dně drážky jsou číslovány sudým číslem a strany na vrchu drážky naopak číslem liché. Z napěťového polygonu, který je zobrazen na *Obr. 2.1 b)*, je vidět, že se vinutí při plném cívkovém kroku uzavře spojením sousedních cívek za sebou.



Obr. 2.1 a) Uspořádání vodičů u dvouvrstevných vinutí

b) fázorová hvězdice a napěťový polygon vinutí s plným cívkovým krokem[1]

Nyní definujeme základní vztahy pro sestrojení fázorové hvězdice. Z předchozího textu je patrné, že fázory jednotlivých drážek se liší vzájemným natočením o úhel α , potom tedy platí vztah:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Q} \cdot p \quad (2.1)$$

Další důležitou veličinou, potřebnou pro sestrojení fázorové hvězdice, je největší společný dělitel počtu drážek a pólových dvojic stroje κ_1 . Výrazy $\frac{Q}{\kappa_1}, \frac{p}{\kappa_1}$ musí být tedy celá čísla. Po určení tohoto dělitele definujeme počet paprsků fázorové hvězdice, tedy:

$$P = \frac{Q}{\kappa_1} \quad (2.2)$$

Zavedeme ještě veličinu α' , která definuje úhel dvou sousedních fázorů, platí tedy:

$$\alpha' = \frac{360^\circ}{Q} \cdot \kappa_1 \quad (2.3)$$

Z výše uvedených závislostí vyplývá, že relace mezi úhlem dvou sousedních drážek a úhlem dvou sousedních fázorů bude záviset na velikosti κ_1 , v podstatě mohou nastat dvě situace, buďto $\alpha' = \alpha$, nebo $\alpha' = 2\alpha$.

Z fázorové hvězdice již lehce získáme napěťový polygon postupným sčítáním napětí cívkových stran, tak jak jsou zapojené za sebou. Poslední veličinou, s kterou se v této kapitole seznámíme, je veličina κ_2 , která definuje nutný počet oběhů k uzavření napěťového polygonu. Jedná se tedy o největší dělitel počtu cívek a dvojic paralelních větví, kdy výrazy $\frac{K}{\kappa_2}, \frac{a}{\kappa_2}$ musí být celá čísla.

2.2 Tingleyho schéma

Z předchozí kapitoly je patrné, že sestrojení fázorové hvězdice musí být přesné, což u složitějších vinutí může být poměrně pracné, proto je v některých případech výhodné nahradit fázorovou hvězdici tzv. Tingleyho schématem. „Tingleyho schéma je tabulka, kde jsou drážkové úhly nahrazeny lineární vzdáleností os čtverečků položených vedle sebe a odpovídajících polohám drážek“ [2].

Čísla cívkových stran jedné pólové rozteče se zapisují do jednoho řádku, kdy počet řádků Tingleyho schématu je roven počtu pólů stroje. U složitějších vinutí můžeme pro přehlednost všechny póly napsat pouze do dvou řádků, a to do jednoho póly sudé a do druhého liché.

Protože má Tingleyho schéma definovaný řádek počtem drážek na jeden pól a pólová rozteč v počtu drážek nemusí být vždy celé číslo, tak u Tingleyho schématu vyšetřujeme dělitelnost $\kappa_1' (Q, 2p)$. Počet obdélníků v jedné řádce potom bude dán vztahem:

$$P' = \frac{Q}{2p} \cdot x \quad (2.4)$$

„ x je zde takové nejmenší celé číslo, které je nutné použít, aby bylo P' rovněž celé číslo“ [1].

Další veličinu, kterou potřebujeme pro sestavení Tingleyho schématu, je úhel dvou sousedních polí α . Tato veličina je shodná jak pro fázorovou hvězdičku, tak pro Tingleyho schéma. Šířka Tingleyho schématu je však 180° a jedné pólové rozteči musí odpovídat celistvý počet polí, můžeme vztah upravit, a psát:

$$\alpha = \frac{180^\circ}{Q} \cdot 2p \quad (2.5)$$

Podobně jako u fázorové hvězdičky, zavedeme i druhý úhel, a to úhel dvou sousedních obdélníků α'' , pro který platí vztah:

$$\alpha'' = \frac{360^\circ}{P'} \quad (2.6)$$

Tingleyho schéma se využívá převážně ve střídavém vinutí, kde z něj snadno určíme rozdělení cívek pro jednotlivé fáze a činitel vinutí, což si ukážeme na konkrétním příkladu.

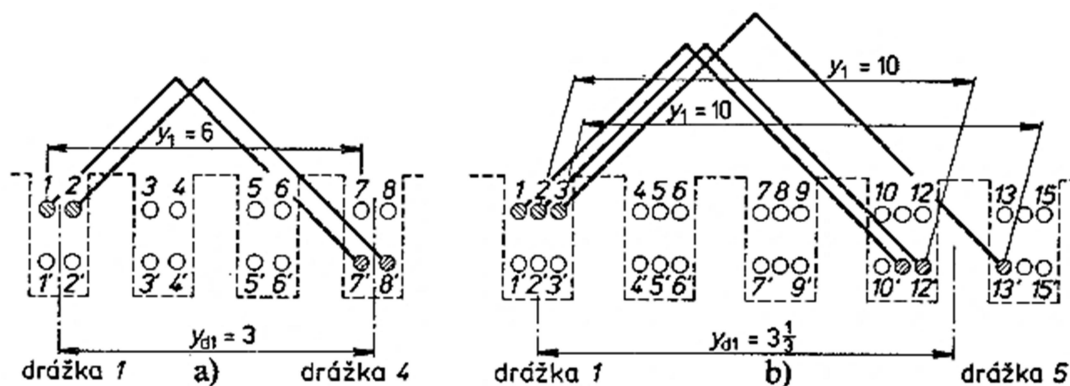
2.3 Definování kroku vinutí

Zatím jsme předpokládali, že při plném kroku vinutí bude drážkový krok roven pólové rozteči, tedy:

$$y_{d1} = t_{pd} = \frac{Q}{2p} \quad (2.7)$$

Takové vinutí pak nazýváme šablonové, krok vinutí však můžeme volit zkrácený, nebo prodloužený, pak tato rovnost platit nebude a vznikne vinutí přestupné.

Šablonové vinutí je zobrazeno na Obr. 2.3 a), jeho výhodou je, že ho lze navinout na jednom druhu šablon. Na Obr. 2.3 b), je zobrazeno vinutí přestupné. „U přestupného vinutí leží vodiče předních aktivních stran např. v horní vrstvě jedné drážky, kdežto vodiče zadních aktivních stran jsou umístěny v dolní vrstvě v různých drážkách“ [2]



Obr. 2.3 a) Šablonové vinutí, počet cívek v drážce $u=2$

b) přestupné vinutí, počet cívek v drážce $u=3$ [2]

Z výše uvedeného schématu je patrná další veličina y_1 , která zde definuje krok vinutí v počtu cívek. My si tuto veličinu pro přehlednější návrh vinutí modifikujeme a budeme jí definovat jako krok vinutí v počtu cívkových stran, kterých je v drážce $2u$, potom můžeme psát:

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 \quad (2.8)$$

Celkový krok vinutí pak získáme součtem dílčích kroků:

$$y = y_1 + y_2 \quad (2.9)$$

Jedním z nejdůležitějších kroků, který musíme definovat, je krok na komutátoru počítaný v počtu lamel y_k . Jelikož jsme definovali celkový krok v počtu cívkových stran, tak mezi celkovým a komutátorovým krokem potom bude platit vztah:

$$y = 2y_k \quad (2.10)$$

Samotný krok na komutátoru pak defínujeme vztahem:

$$y_k = \frac{\varepsilon K \pm a}{p} \quad (2.11)$$

„Tento vztah udává tzv. mechanickou proveditelnost vinutí, aby bylo kritérium proveditelnosti splněno, musí být y_k celé číslo“ [2]. Podle činitele ε volíme, zda bude vinutí smyčkové, nebo vlnové. Pokud zvolíme $\varepsilon=0$, tak získáme vinutí smyčkové, pokud naopak zvolíme $\varepsilon=1$, vinutí bude vlnové.

Důležitá je rovněž volba znaménka ve výrazu $\pm \frac{a}{p}$, z kterého určíme, zda bude vinutí křížené, nebo nekřížené. Zvolíme-li u smyčkového vinutí kladné znaménko, dostaneme vinutí nekřížené, při volbě záporného znaménka získáme vinutí křížené. U vlnového vinutí je to přesně naopak. Provedení těchto vinutí, včetně okótovaných kroků, je zobrazeno na *Obr. 1.3*, v kapitole 1.3.1.

U střídavých strojů, kde nemáme vinutí připojené ke komutátoru, nazveme y_k fiktivním komutátorovým krokem, princip vinutí však zůstane stejný.

U smyčkového vinutí musí být ještě splněna podmínka $a \geq p$, proto definujeme rozdělení vinutí podle počtu paralelních větví ve vztahu k počtu pólů, tedy:

sériová $a = 1$, sérioparalelní $1 < a < p$, paralelní $a = p$, nebo více paralelní $a > p$.

Z výše uvedeného vyplývá, že smyčkové vinutí může být provedeno pouze jako paralelní, nebo více paralelní vinutí.

2.4 Činitel vinutí

„Činitel vinutí uvažuje zmenšení napětí indukovaného ve fázi vinutí elektrického stroje, uloženého v drážkách, ve srovnání s napětím, které by se indukovalo ve vinutí s týmž počtem závitů, ale s plným krokem, jež by bylo soustředěno do jedné cívky“ [2].

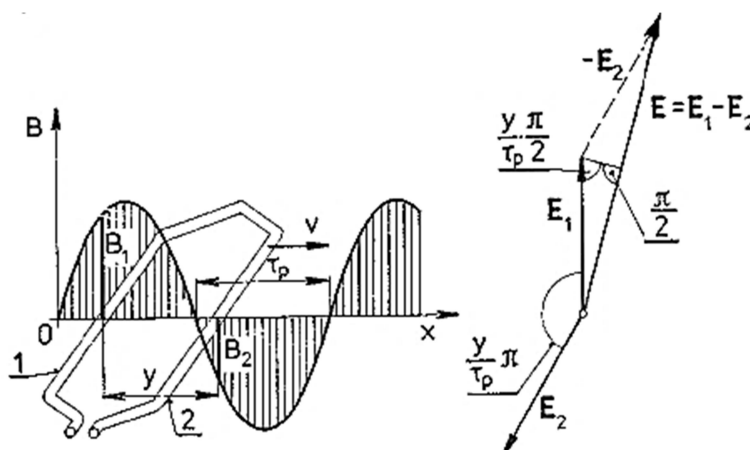
Činitel vinutí je dán součinem dvou dílčích činitelů, a to činitele zkrácení kroku a činitele rozlohy, tedy:

$$k_v = k_y \cdot k_r \quad (2.12)$$

V některých případech, hlavně u malých strojů, kde je obtížné zvětšit q , se vinutí pro potlačení zubových harmonických ukládá v natočených drážkách [2]. Potom definujeme ještě jeden dílčí činitel, tzv. činitel natočení drážek, který se musí do vztahu 2.12 doplnit.

2.4.1 Činitel zkrácení kroku

Činitel zkrácení kroku uvažuje zmenšení napětí v závitě vlivem zkrácení kroku. „Pohybuje-li se v sinusovém magnetickém poli závit, který je tvořený dvěma sériově spojenými vodiči 1 a 2, vzdálenými od sebe o délku y , bude se elektromotorická síla indukovaná v tomto závitě, rovnat geometrickému rozdílu E_1 a E_2 , vzájemně pootočených o úhel $\pi \left(\frac{y}{tp} \right)$, viz *Obr. 2.4*“ [4].



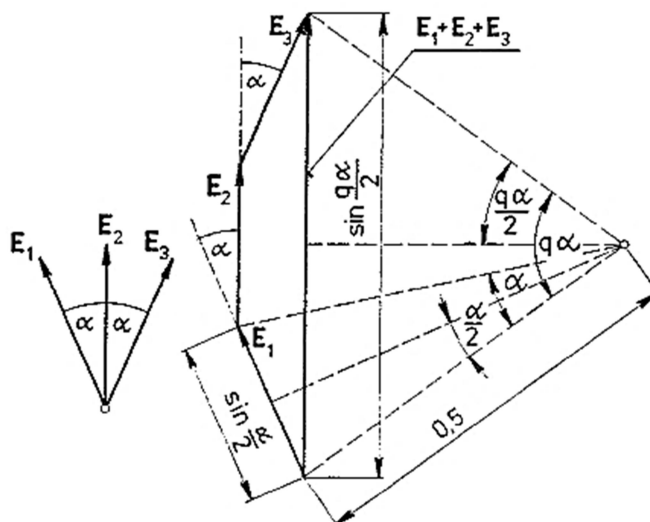
Obr. 2.4 Indukovaná elektromotorická síla v závitě při pohybu vodiče v magnetickém poli [4]

Z toho vyplývá, že činitel zkrácení kroku bude:

$$k_y = \sin \frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2} \quad (2.13)$$

2.4.2 Činitel rozlohy

Činitel rozlohy v podstatě uvažuje zmenšení indukovaného napětí vlivem rozložení vinutí do více drážek. „Jedná se o poměr geometrického součtu elektromotorických sil závitů k jejich aritmetickému součtu“ [4]. Vinutí se většinou navrhuje tak, aby fázory elektromotorických sil závitů tvořili vějíř, viz Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Diagram pro určení činitele rozlohy, $q=3$, $\alpha=20$ [4]

Z diagramu vyplývá, že činitel rozlohy bude:

$$k_r = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (2.14)$$

2.5 Vícefázová vinutí

Jak již bylo řečeno, tak ve střídavých strojích musí být vinutí vzhledem k počtu fází symetrické. Z této symetrie vyplývá, že v každé fázi musí být stejný a celistvý počet drážek. Z tohoto důvodu, se u střídavých vinutí zavádí veličina, která určuje počet drážek na pól a fázi, platí tedy:

$$q = \frac{Q}{2pm} \quad (2.15)$$

Střídavá vinutí jsou nejčastěji provedena jako třífázová, s možností rozstříhání na matematický počet fází, případně i s možností provedení se zlomkovým číslem na pól a fázi.

2.5.1 Zlomková vinutí

„ Činitel polohy pro vyšší harmonické ukazuje, že amplituda vyšších harmonických v průběhu elektromotorického napětí vinutí závisí na úhlu mezi fázory tohoto napětí jednotlivých cívek“ [2].

Pokud je počet drážek na pól a fázi celé číslo, tak je tento úhel roven vždy úhlu drážkovému. Při snaze snížit činitel polohy pro vyšší harmonické, se zvýší q , tím však roste celkový počet drážek a zmenšuje se drážková rozteč, což je značně neefektivní[2].

Proto je v některých případech výhodné použít tzv. zlomková vinutí, kdy není počet drážek na pól a fázi q číslo celé, ale je definováno zlomkem. Musí být však splněna podmínka dvouvrstvých vinutí, kdy počet drážek na fázi $2pq$ bude číslo celé. Potom můžeme psát:

$$q = \frac{q_0}{c} \quad (2.16)$$

Čísla q_0, c jsou nesoudělná. Zlomková vinutí se řeší nejčastěji pomocí Tingleyho schématu, které bylo probráno v kapitole 2.2

2.5.2 Rozstříhaná vinutí

Rozstříhaná vinutí již byla probrána v kapitole 1.3.2. Nyní si ukážeme jak vinutí prakticky rozstříhat. Dvouvrstvá střídavá vinutí mohou být tedy provedena buďto se šířkou fázového svazku 120° , tedy $m=3$, nebo se šířkou fázového svazku 60° , $m'=6$. Z důvodů, které již byly zmíněny, je výhodnější používat vinutí rozstříhaná na šest matematických fází.

Pro všechny fáze vinutí platí, že pokud při rozstřihání budou náležet při plném kroku vinutí přední aktivní strany cívek téhož fázového svazku fázi L , potom zadní aktivní strany cívek téhož fázového svazku budou náležet fázi L' , nebo naopak [2]. Potom pro všechny fáze, tedy U, V, W platí, že při plném kroku vinutí budou oproti fázím U', V', W' , pootočený o 180° . Při zkráceném, nebo prodlouženém kroku vinutí, pak bude odchylka od 180° dána úhlem o který je vinutí zkráceno nebo prodlouženo.

Celkový počet fázových svazků je ještě ovlivněn počtem párů paralelních větví vinutí, pokud nebude $a=1$, tak celkový počet fázových svazků nebude $S_c=m'$, ale bude platit:

$$S_c = m' \cdot a \quad (2.17)$$

Z tohoto vztahu již jednoduše dopočítáme počet fázových svazků na jednu fázi:

$$S_f = \frac{m' \cdot a}{m} \quad (2.18)$$

V jednom svazku pak bude K_1 cívek a bude platit:

$$K_1 = \frac{K}{m' \cdot a} \quad (2.19)$$

Pokud není počet cívek ve svazku dělitelný 6, tak se vinutí rozstřihá na nestejně dílce, tato situace nastává nejčastěji u zlomkového vinutí. Rozložení fází po obvodu stroje je zobrazeno na *Obr. 1.4*, v kapitole 1.3.2.

2.6 Görgesův diagram

Protéká-li střídavým vinutím proud, tak vzniká magnetické napětí závislé na velikosti proudu a počtu závitů. Průběh magnetického napětí ve vzduchové mezeře v určitém časovém okamžiku lze vyčíst z tzv. Görgesova diagramu[3]. Kde ideálním průběhem tohoto napětí je kružnice o poloměru R_{1h} , pro kterou platí:

$$R_{1h} = \frac{m}{\pi p} \cdot N_s I \sqrt{2} k_{v1} = F_{m1} \quad (2.20)$$

Působením vyšších harmonických se však Görgesův diagram od kružnice odchyluje. Čím je odchylka od kružnice větší, tím více jsou vyšší harmonické v magnetickém napětí zastoupeny. Vliv vyšších harmonických se vyšetřuje z tzv. diferenčního rozptylu, pro jehož určení se používá právě Görgesova diagramu. Diferenční rozptyl se definuje podle vztahu:

$$\tau_{dif} = \frac{L_{1c} - L_{1h}}{L_{1c}} \quad (2.21)$$

Kde L_{1h} je magnetizační indukčnost a L_{1c} celková indukčnost včetně vyšších harmonických.

Pokud je veškerá energie odpovídajících magnetických polí soustředěna ve vzduchové mezeře, tak je možné tyto energie definovat jako: $W_{mh} = \frac{1}{2}L_{1h} \cdot I^2$, $W_{mc} = \frac{1}{2}L_{1c} \cdot I^2$ [1]. Pak je pro diferenční rozptyl možno psát:

$$\tau_{dif} = \frac{W_{mc} - W_{mh}}{W_{mc}} \quad (2.22)$$

Pro určení těchto energií se používá právě Görgesův diagram.

„Protože pro celkovou energii platí, že $W_{mc} \sim F^2 \sim R^2$, kde R je vzdálenost mezidrážkových bodů od středu obrazce a F je magnetické napětí, tak je magnetická energie potom formálně shodná s výrazem pro moment setrvačnosti J “ [1].

Energie pole základní harmonické potom bude řádově stejná s průměrem R_{1h}^2 , kdy poloměr R_{1h} již byl definován. Výsledný vztah pro diferenční rozptyl tedy bude:

$$\tau_{dif} = \frac{R_{1g}^2 - R_{1h}^2}{R_{1g}^2} \quad (2.23)$$

Praktická ukázka Görgesova diagramu několika konkrétních vinutí, včetně porovnání jejich diferenčních rozptylů, bude provedeno v poslední kapitole této práce.

2.7 Příklad dvouvrstvého vinutí

- **Zadání:**

Trojfázové dvouvrstvé rozstříhané zlomkové vinutí má: počet fází $m=3$, matematický počet svazků $m'=6$, počet pólů $p = 2$, počet dvojic paralelních větví $a=1$, počet drážek na pól a fázi $q=1,25$, počet cívek v drážce $u=1$.

- **Určení kroku vinutí:**

Jako první určíme celkový počet drážek střídavého vinutí, tedy:

$$Q = 2pmq = 12 \cdot 1,25 = 15$$

Pólovou rozteč v počtu drážek, dle vztahu:

$$t_{pd} = \frac{Q}{2p} = \frac{15}{4} = 3,75$$

Cívkový krok nelze volit celý, takže zvolíme zkrácený $y_{d1} = 3$, z kterého vypočítáme cívkový krok v počtu cívkových stran:

$$y_1 = 2uy_{d1} + 1 = 2 \cdot 3 + 1 = 7$$

Dále určíme fiktivní krok na komutátoru, platí $a < p$, fiktivní krok na komutátoru je tedy:

$$y_k = \frac{K - a}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7$$

Z toho již můžeme spočítat celkový krok v počtu cívkových stran:

$$y = 2y_k = 2 \cdot 7 = 14$$

A krok spojkový:

$$y_2 = y - y_1 = 14 - 7 = 7$$

• Rozstříhání vinutí na matematický počet fází

První vypočítáme celkový počet fázových svazků:

$$S_c = m' \cdot a = 6 \cdot 1 = 6$$

Z tohoto vztahu nyní můžeme vypočítat počet fázových svazků na jednu fázi:

$$S_f = \frac{m' \cdot a}{m} = \frac{6}{3} = 2$$

A počet cívek ve svazku:

$$K_1 = \frac{K}{m' \cdot a} = \frac{15}{6} = 2,5$$

Počet cívek ve svazku není celé číslo, vinutí tedy rozstříháme na nestejně dílce, svazky volíme střídavě 2,3.

• Sestrojení fázorové hvězdice a napět'ového polygonu:

Nejprve určíme elektrický úhel dvou sousedních drážek:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Q} \cdot p = \frac{360^\circ}{15} \cdot 2 = 48^\circ$$

Nejvyšší společný dělitel $\kappa_1(Q, p) = 1$, takže počet paprsků fázorové hvězdice bude:

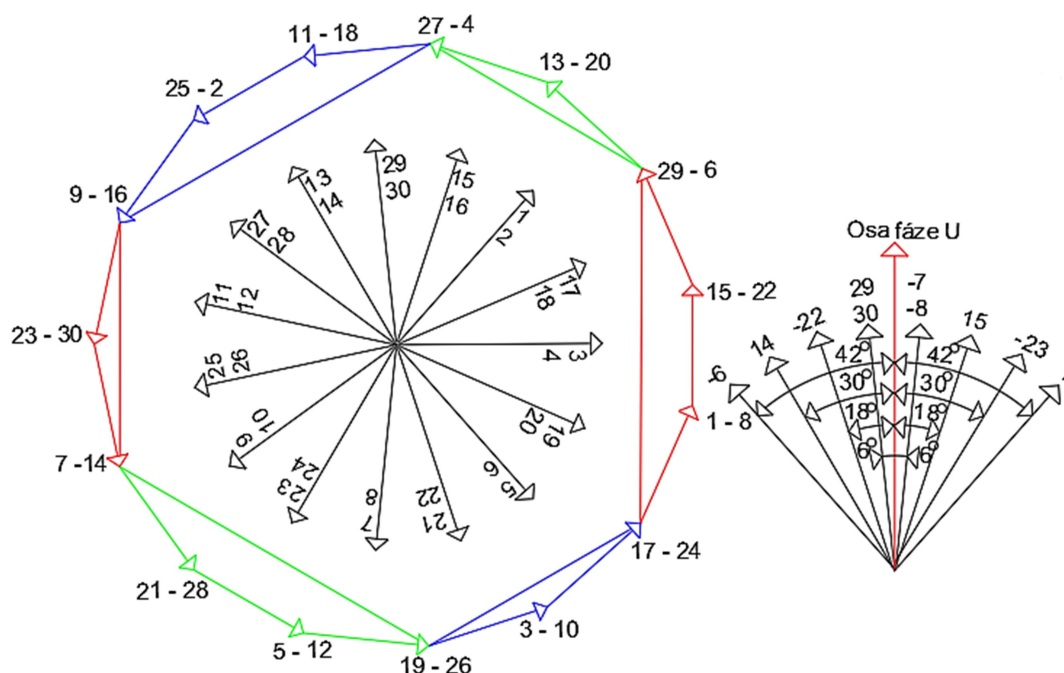
$$P = \frac{Q}{\kappa_1} = \frac{15}{1} = 15$$

A nakonec určíme úhel dvou sousedních fázorů, dle vztahu:

$$\alpha' = \frac{360^\circ}{Q} \cdot \kappa_1 = \frac{360^\circ}{15} \cdot 1 = 24^\circ$$

Nejvyšší společný dělitel $\kappa_2(K, a) = 1$, takže se napět'ový polygon uzavře po jednom oběhu.

Nyní již můžeme sestavit fázorovou hvězdici, viz *Obr. 2.7*.



Obr. 2.7 Fázorová hvězdička a napěťový polygon s naznačeným výpočtem činitele vinutí

Na obrázku výše, je vpravo zobrazena osa fáze U . Ze vzdálenosti fázorů cívkových stran dané fáze potom získáme činitel vinutí, dostaneme tedy:

$$K_v = \frac{4 \cdot \cos 6^\circ + 2 \cdot \cos 18^\circ + 2 \cdot \cos 30^\circ + 2 \cdot \cos 42^\circ}{10} = 0,909$$

- **Sestrojení Tingleyho schématu:**

Nyní si ukážeme jak určit rozdělení fází a činitel vinutí z Tingleyho schématu. Určíme potřebný počet obdélníků v jedné řádce, tedy:

$$P' = \frac{Q}{2p} \cdot x = \frac{15}{4} \cdot x = 3,75 \cdot 4 = 15$$

Tedy již víme že Tingleyho schéma bude mít 15 sloupců, 4 řádky a budeme vyplňovat každý 4. obdélník, protože $x=4$. Úhel dvou sousedních polí již známe z fázorové hvězdičky, tedy:

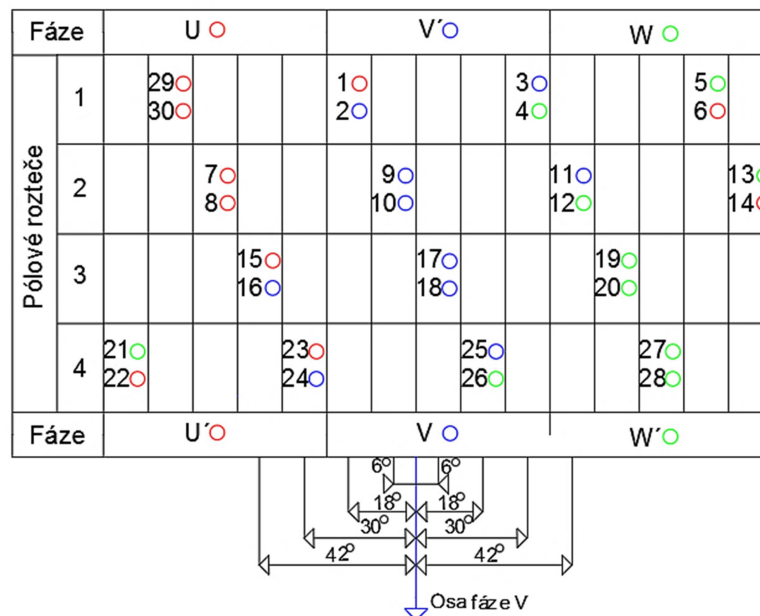
$$\alpha = \frac{360^\circ}{Q} \cdot p = \frac{360^\circ}{15} \cdot 2 = 48^\circ$$

Úhel dvou sousedních obdélníků, pak určíme dle vztahu:

$$\alpha'' = \frac{360^\circ}{P'} = \frac{360^\circ}{15} = 24^\circ$$

Šířka Tingleyho schématu však není 360° , ale 180° , takže úhly budou $\alpha = 24^\circ$, $\alpha'' = 12^\circ$.

Nyní již můžeme sestavit Tingleyho schéma, viz Obr. 2.8.



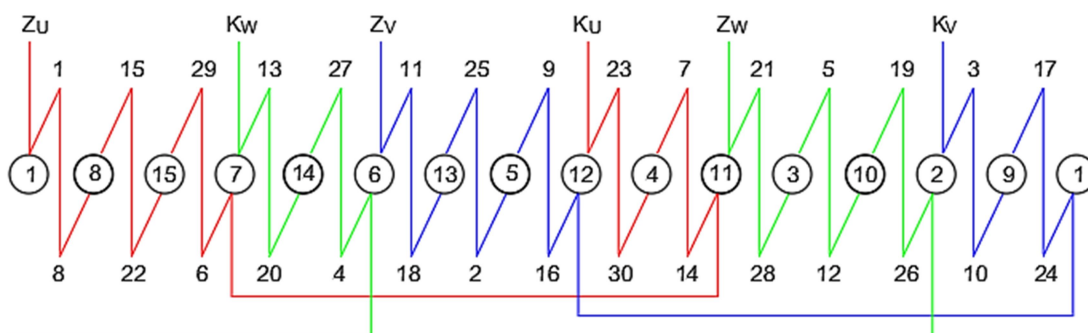
Obr. 2.8 Tingleyho schéma s naznačeným výpočtem činitele vinutí

Z Tingleyho schématu výše je patrné, že činitel vinutí získáme stejným způsobem jak z fázorové hvězdičky, pokud sečteme vzdálenosti úhlů cívkových stran příslušící fázi V, dostaneme:

$$K_v = \frac{4 \cdot \cos 6^\circ + 2 \cdot \cos 18^\circ + 2 \cdot \cos 30^\circ + 2 \cdot \cos 42^\circ}{10} = 0,909$$

• **Sestrojení pilovitého schématu vinutí:**

Nyní se znalostí všech dílčích kroků vinutí a rozložení jednotlivých fází můžeme sestavit pilovité schéma vinutí, viz Obr. 2.9. Kde v horní části schématu jsou značené přední cívkové strany, v dolní části schématu naopak strany zadní.

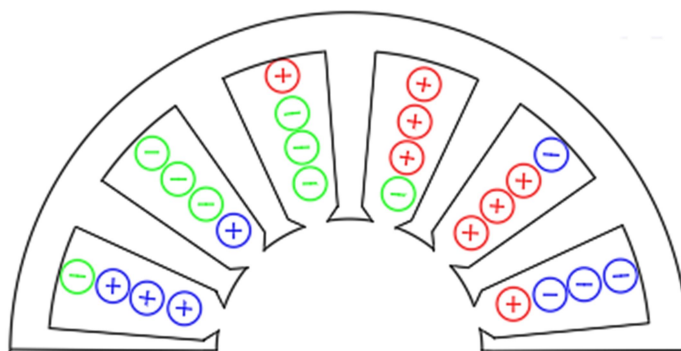


Obr. 2.9 Pilovité schéma dvouvrstvého vinutí

3. Definování čtyřvrstvých vinutí

3.1 Čtyřvrstvé vinutí v asynchronních strojích

Čtyřvrstvé vinutí v asynchronních strojích je provedeno jako dvě dvouvrstvá vinutí umístěna nad sebou, vzájemně posunuta o jednu, nebo i více drážek. Čtyřvrstvé vinutí zobrazené na *Obr. 3.1* je provedeno ze dvou dvouvrstvých vinutí se zkráceným krokem o jednu drážku, kdy celé druhé vinutí je posunuto o drážku vůči vinutí prvnímu.



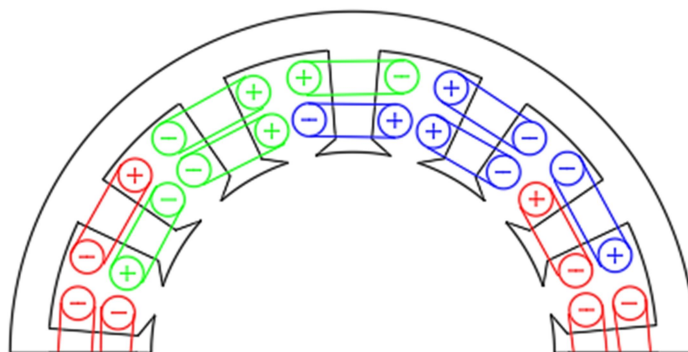
Obr. 3.2 Čtyřvrstvé vinutí v asynchronních strojích

3.2 Čtyřvrstvé vinutí ve strojích s permanentními magnety

U strojů s permanentními magnety se používá speciální provedení vinutí, tzv. zubové, kde jsou obě aktivní strany téže cívky uloženy v sousedních drážkách. Jinak řečeno, drážkový krok tohoto vinutí je roven jedné. U dvouvrstvého vinutí potom nejsou cívkové strany uloženy v jedné drážce nad sebou, ale vedle sebe.

Největším problémem při konstrukci zubového vinutí je, že aktivní strany cívek různé polarity téže fáze nemohou být umístěny v jedné drážce, jinak se vyruší. Tomuto se dá předejít zvolením správné velikosti úhlu sousedních fázorů α' vůči velikosti úhlu sousedních drážek α .

Čtyřvrstvé vinutí, které je zobrazené na *Obr. 3.2* má druhou vrstvu vinutí posunutou o jednu drážku. Z umístění cívkových stran v drážkách je patrné, že pokud by nebyla druhá vrstva vinutí posunuta, tak je provedena přesně s opačnou polaritou než vrstva první.



Obr. 3.2 Čtyřvrstvé vinutí ve strojích s permanentními magnety

Výhodou zubového vinutí jsou krátké délky cívek, díky kterým vykazuje stroj nízké Jouleovy ztráty, vysokou účinnost a také nižší výrobní náklady a úsporu materiálu[6].

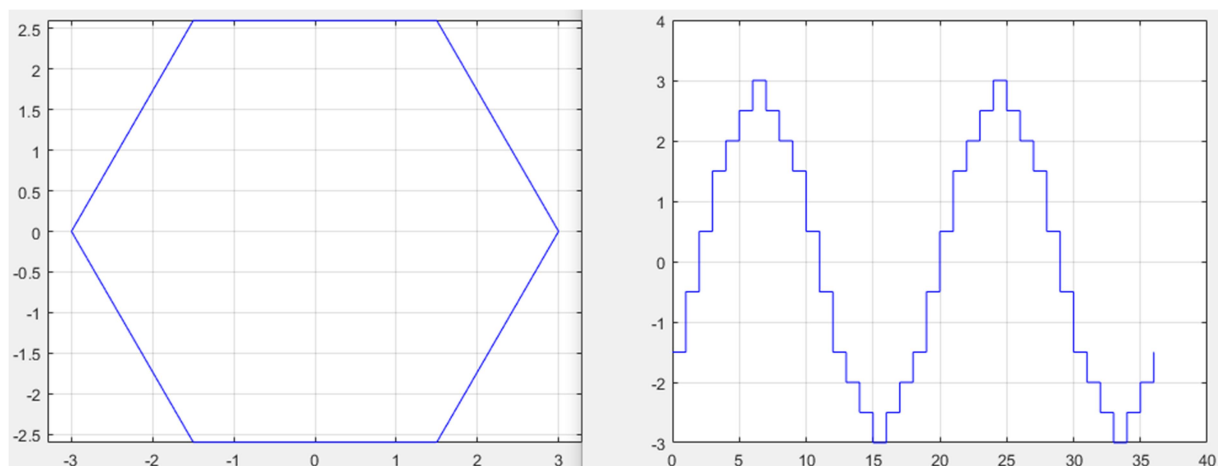
Tyto stroje mají ale také pár nevýhod, jako je silně nelineární chování a relativně složitá konstrukce. Největší nevýhodou je ale vysoký obsah harmonických v magnetomotorické síle vinutí, které způsobují parazitní efekty, jako jsou ztráty v rotoru nebo vysoké zvlnění točivého momentu[6].

Ke snížení obsahu těchto harmonických je právě výhodné použití čtyřvrstvého provedení vinutí, které díky silné závislosti výkonu na magnetomotorické síle, také zvýší výkon stroje a sníží rotorové ztráty. [5].

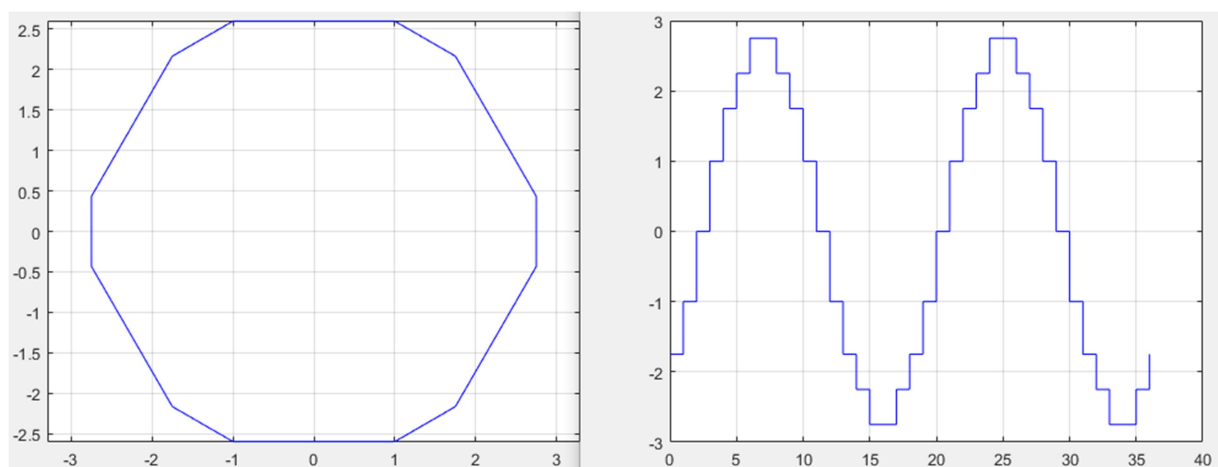
4. Porovnání dvouvrstvých a čtyřvrstvých vinutí

4.1 Vinutí s plným krokem

Počet drážek na pól a fázi $q=3$, počet pólů $p=2$, krok vinutí v počtu drážek $y_{dl} = 9$



Obr. 4.1 Görgesův diagram dvouvrstvého vinutí s plným krokem, činitel vinutí $k_v = 0.9598$, diferenční rozptyl $\tau_{dif} = 1.4062$

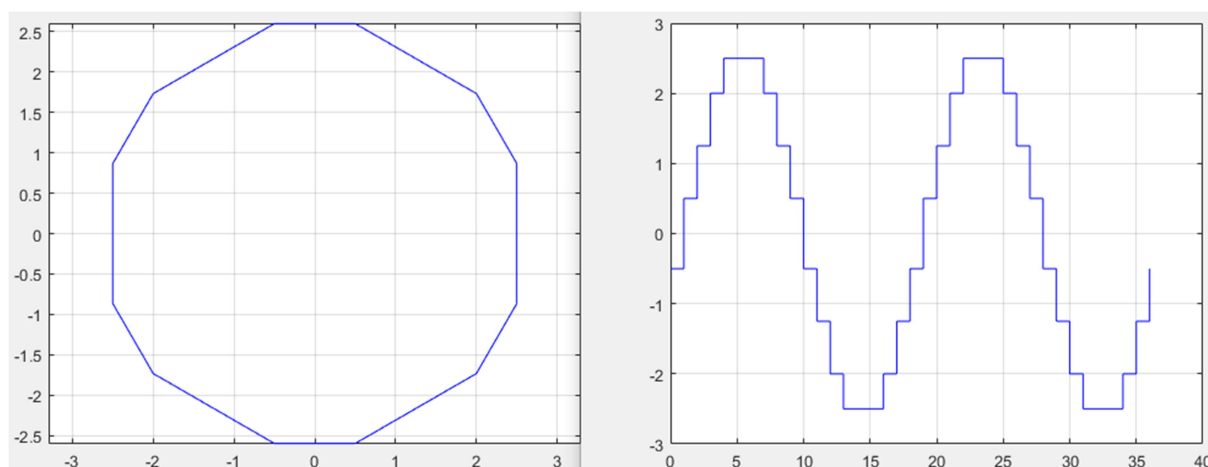


Obr. 4.2 Görgesův diagram čtyřvrstvého vinutí s plným krokem, druhé vinutí posunutě o drážku, činitel vinutí $k_v = 0.9452$ diferenční rozptyl $\tau_{dif} = 1.1495$

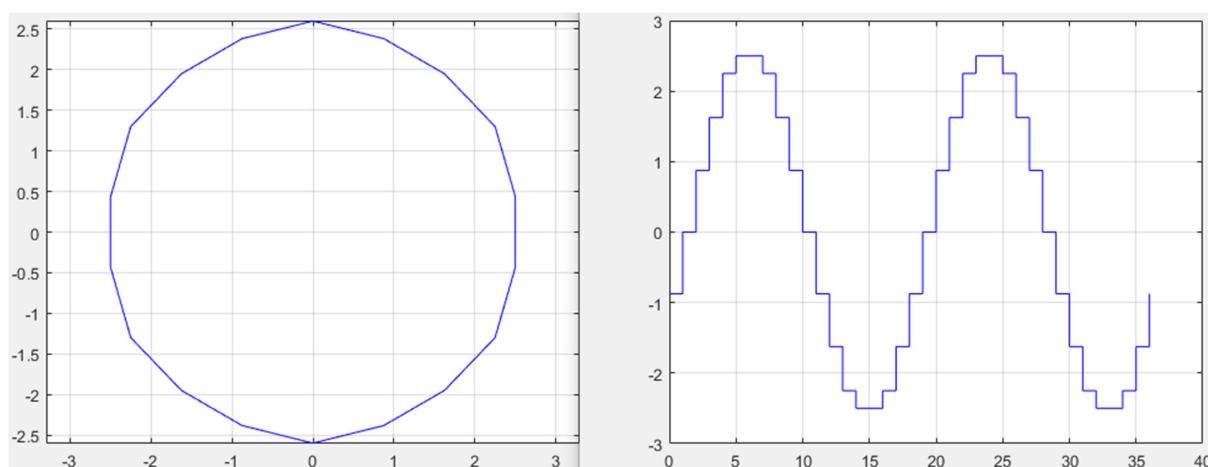
Na Obr. 4.1 je vidět, že Görgesův diagram dvouvrstvého vinutí s plným krokem má šestiúhelníkový tvar. Pokud přidáme další vinutí posunutě o drážku, tak diferenční rozptyl tohoto čtyřvrstvého vinutí klesne a Görgesův diagram se začne více blížit kružnici, jak je patrné z Obr. 4.2. Zároveň ale dojde k poklesu činitele vinutí a tím i k poklesu amplitudy magnetomotorické síly, což je patrné z diagramů křivek mms.

4.2 Vinutí se zkráceným krokem

Počet drážek na pól a fázi $q=3$, počet pólů $p=2$, krok vinutí v počtu drážek $y_{dl} = 7$



Obr. 4.3 Görgešův diagram dvouvrstvého vinutí se zkráceným krokem, činitel vinutí $k_v = 0.9019$, diferenční rozptyl $\tau_{dif} = 1.1091$

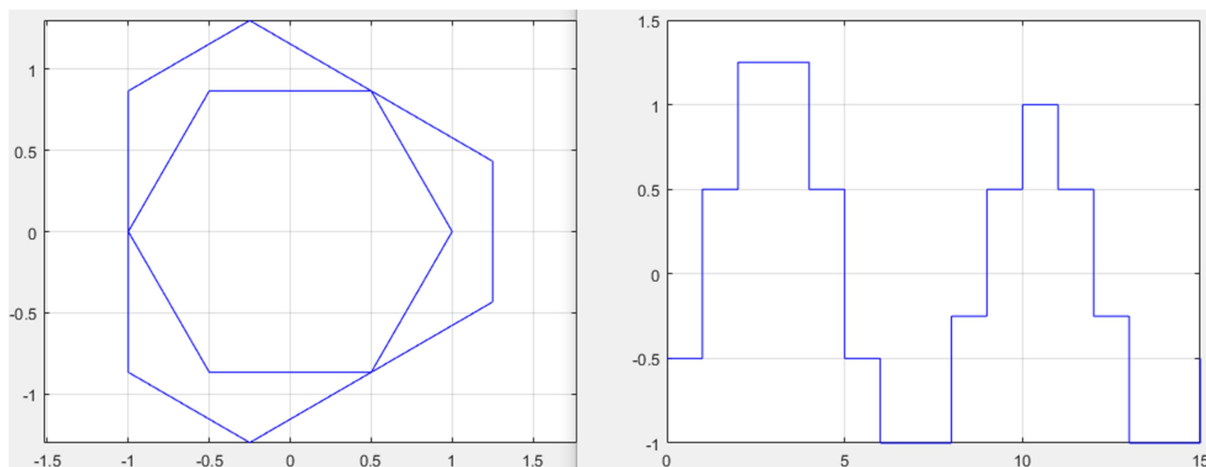


Obr. 4.4 Görgešův diagram čtyřvrstvého vinutí se zkráceným krokem, druhé vinutí posunutě o drážku, činitel vinutí $k_v = 0.8882$, diferenční rozptyl $\tau_{dif} = 1.0350$

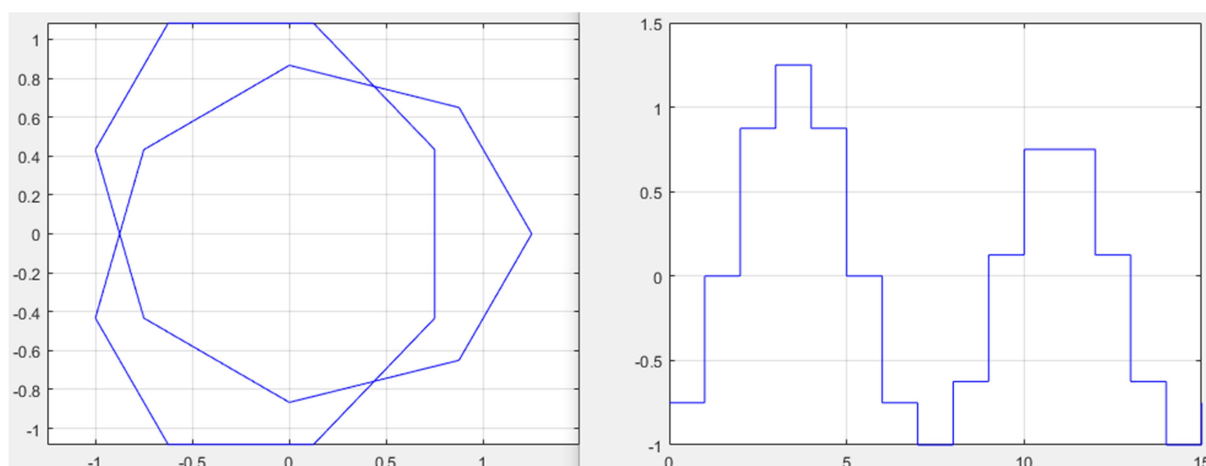
Při volbě stejného vinutí jak v předešlém případě, ale se zkráceným krokem, je Z Görgešova diagramu dvouvrstvého vinutí, viz Obr. 4.3, patrné, že při zkráceném kroku došlo k výraznému zlepšení diferenčního rozptylu, stejně tak k poklesu činitele vinutí a mms. U čtyřvrstvého vinutí, Obr. 4.4, je vidět zmenšení rozptylu oproti vinutí dvouvrstvému, stejně jak v případě vinutí s plným krokem. Görgešův diagram tohoto čtyřvrstvého vinutí již výrazně připomíná kružnici.

4.3 Zlomkové vinutí

Počet drážek na pól a fázi $q=1,25$, počet pólů $p=2$, krok vinutí v počtu drážek $y_{dl} = 3$



Obr. 4.5 Görgesův diagram dvouvrstvého vinutí se zlomkovým číslem na pól a fázi, činitel vinutí $k_v = 0.9099$, diferenční rozptyl $\tau_{dif} = 10.2159$

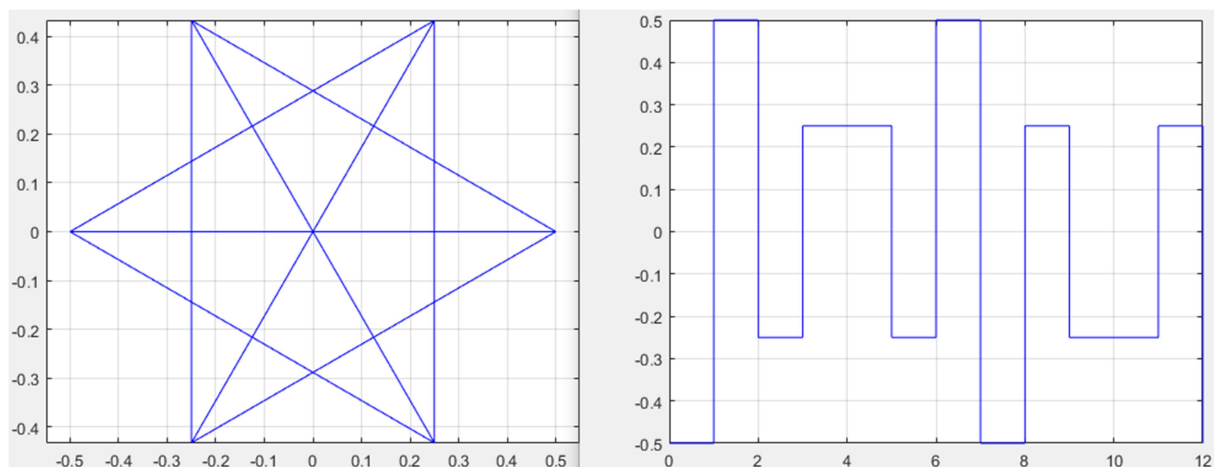


Obr. 4.6 Görgesův diagram čtyřvrstvého vinutí se zlomkovým číslem na pól a fázi, druhé vinutí posunutě o drážku, činitel vinutí $k_v = 0.9049$, diferenční rozptyl $\tau_{dif} = 10.4748$

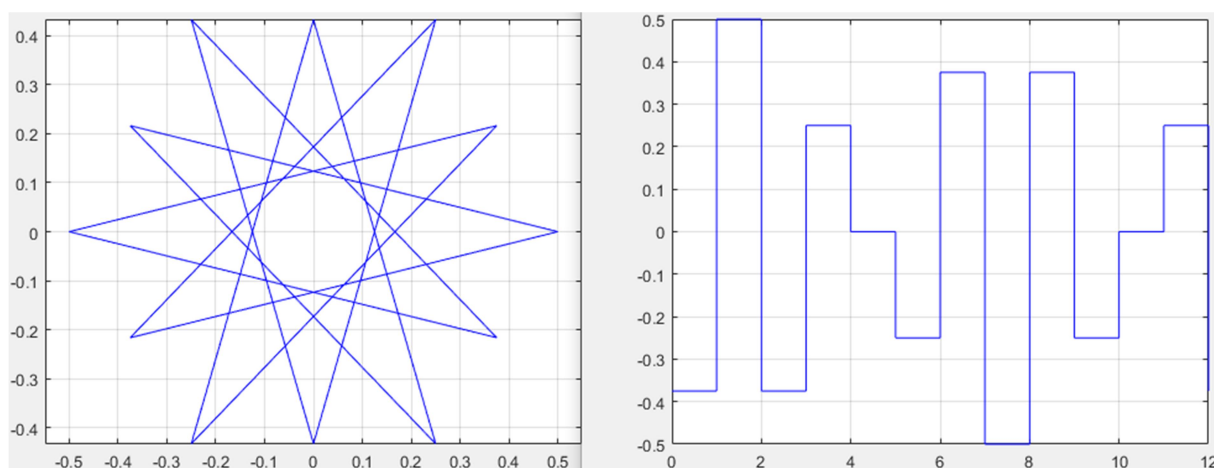
Při pohledu na Görgesův diagram vinutí, které bylo počítáno v kapitole 2.7, viz Obr. 4.4, je na první pohled patrné, že diagram obsahuje také ostatní harmonické. Na rozdíl od předchozích příkladů je zde křivka mms nepravidelná a diferenční rozptyl značně narostl. Čtyřvrstvé vinutí, viz Obr. 4.6, zde rozptyl nezmenší, ale naopak dojde ještě k jeho nárůstu, takže toto vinutí není pro asynchronní stroje vhodné.

4.4 Zubové vinutí

Počet drážek na pól a fázi $q=0,4$, počet pólů $p=5$, krok vinutí v počtu drážek $y_{dl} = 1$



Obr. 4.7 Görgesův diagram dvouvrstvého zubového vinutí, činitel vinutí $k_v = 0.9330$, diferenční rozptyl $\tau_{\text{dif}} = 96.7789$



Obr. 4.8 Görgesův diagram čtyřvrstvého zubového vinutí, druhé vinutí posunutě o drážku, činitel vinutí $k_v = 0.9012$, diferenční rozptyl $\tau_{\text{dif}} = 84.5607$

U dvouvrstvého zubového vinutí, viz Obr. 4.7, je vidět obrovský diferenční rozptyl, který je ještě několikrát větší než u zlomkového vinutí z předchozího příkladu. Použitím čtyřvrstvého vinutí, Obr. 4.8, se při zachování relativně dobrého činitele vinutí diferenční rozptyl výrazně snížil. Použití čtyřvrstvého vinutí ve strojích s permanentními magnety se jeví jako velice výhodné.

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo porovnat vlastnosti dvouvrstvých a čtyřvrstvých vinutí. Porovnával jsem čtyři typy vinutí, a to vinutí s plným krokem, zkráceným krokem, vinutí zlomkové a vinutí zubové.

Jako nejvhodnější se pro čtyřvrstvé provedení v asynchronních strojích jeví vinutí se zkráceným krokem, kde se díky zkrácení kroku sníží vliv některých vyšších harmonických a tím se sníží i diferenční rozptyl vinutí.

Nevhodné je naopak použití zlomkového vinutí, které má značný diferenční rozptyl již ve dvouvrstvěm provedení, a ve čtyřvrstvěm provedení ještě vzroste.

Poslední vinutí, které jsem porovnával, bylo vinutí zubové, které se používá ve strojích s permanentními magnety. Zubové vinutí má několikanásobně větší diferenční rozptyl než vinutí používaná v asynchronních strojích, na druhou stranu došlo ve čtyřvrstvěm provedení k jeho největšímu zlepšení.

Z porovnání těchto typů vinutí bych řekl, že praktické použití čtyřvrstvého vinutí se vyplatí pouze u strojů s permanentními magnety. U strojů asynchronních nepřevažují výhody čtyřvrstvého provedení nad náklady za práci a použitý materiál.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů*: Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] KUČERA, Jaroslav a Josef HAPL. *Vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982.
- [5] ALBERTI, Luigi, Nicola BIANCHI. *Theory and Design of Fractional-Slot Multilayer Windings*. Itálie: University of Padova, 2011.
- [6] ALBERTI, Luigi, Nicola BIANCHI. *Design and Tests of a Four-Layer Fractional-Slot Interior Permanent Magnet Motor* Itálie: University of Padova, 2015.
- [7] CAI, Wei, David FULTON, Christopher L. CONGDON. *Multi-set rectangular copper hairpin windings for electric machines*. USA: 2006.
- [8] WANG, Yawei, Ronghai QU, Jian LI. *Multi-layer Windings Effect on Interior PM Machines for EV Applications*. Čína: University of Science and Technology Wuhan, 2014.