

## 4 Vinutí elektrických strojů

Vinutí elektrických strojů patří, spolu s permanentními magnety, mezi jediné aktivní části elektrických strojů, neboť jde o jediné části, které se aktivně podílejí na tvorbě magnetického pole a/ nebo indukovaného napětí. Jako vinutí lze označit jakýkoliv uspořádaný systém vodičů, sloužící k vybuzení magnetického pole a/nebo tvorbě indukovaného napětí. Na základě této definice pak lze vinutím nazvat kromě vinutí elektrických strojů i vinutí cívek (tlumivek), reproduktorů či různých aktuátorů.

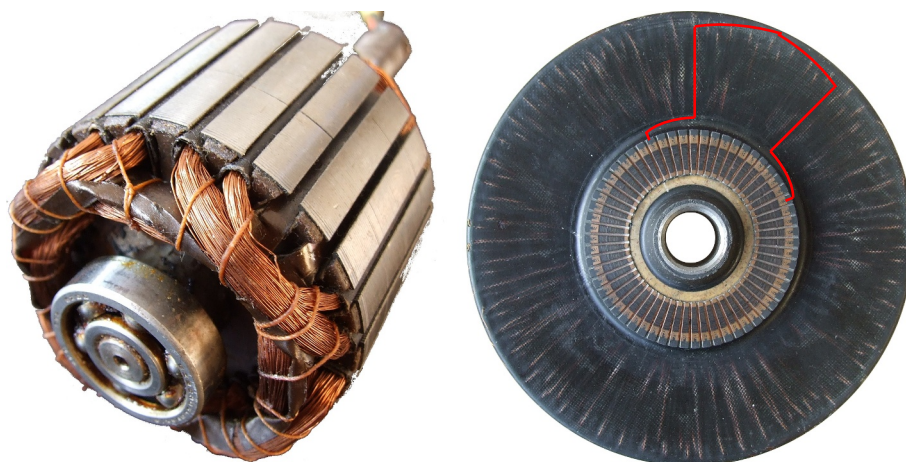
Z hlediska základního dělení lze vinutí rozdělit na koncentrované a distribuované. Koncentrované vinutí se vyznačuje přítomností všech závitů vinutí v objemu jediné cívky. Takováto vinutí se vyznačují činitelem vinutí velmi blízkému jedné a navrhují se čistě na základě požadovaného počtu závitů a průřezu vodičů. Typickými zástupci koncentrovaných vinutí jsou vinutí transformátorů či budící vinutí stejnosměrných a synchronních strojů.



Obr. 4.1: Budící vinutí stejnosměrného stroje

Pro správnou funkci točivých elektrických strojů jsou však nejvýznamnější vinutí rozložená – distribuovaná. Tato vinutí jsou umístěna na kotvě točivého stroje a zajišťují jejich hladký chod, ať již jako motorů, či jako generátorů. Podle směru magnetického toku přes vzduchovou mezeru stroje se pro tradiční stroje s radiálním tokem označují postupná vinutí jako distribuovaná bubnová, zatímco v případě strojů s axiálním tokem tato vinutí vedou na distribuovaná disková. Z hlediska návrhu lze oba typy vinutí navrhovat shodnými metodami za pomoci shodných nebo velmi podobných vztahů, zásadním rozdílem je tedy až konečná konstrukce vinutí.

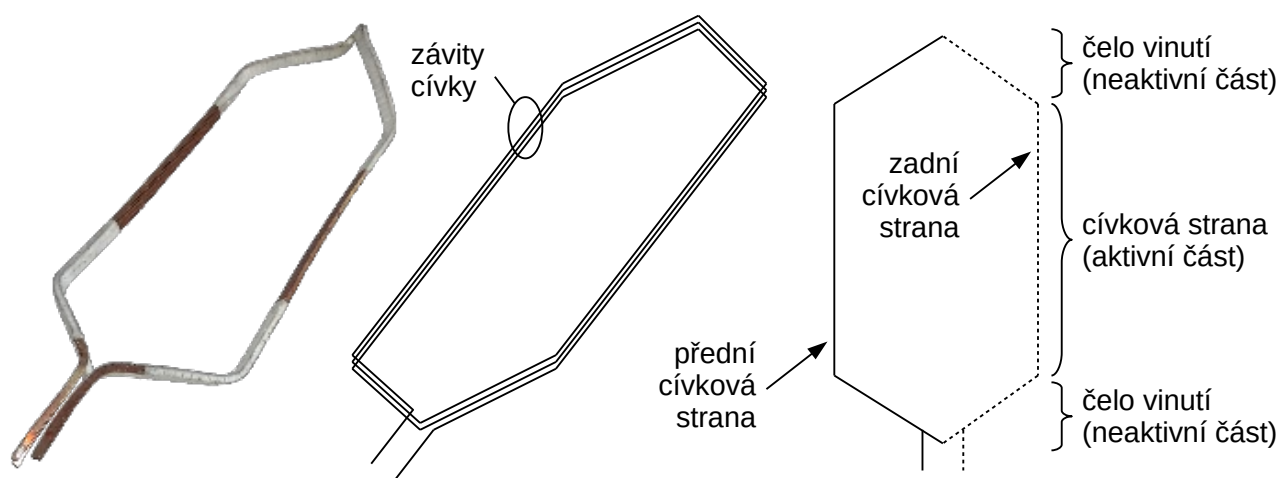
Obecně však lze prohlásit, že distribuovaná vinutí mají i v závislosti na účelu velmi variabilní topologii, která se může promítnout až do fáze jejich návrhu. Na rozdíl od koncentrovaných tak svými vlastnostmi mohou značně ovlivnit výsledné chování stroje – průběh momentu, hlučnost, tvar indukovaného napětí atp.



Obr. 4.2: Postupné bubnové (vlevo) a diskové (vpravo) vinutí.  
Červenou čarou je naznačen tvar cívky diskového vinutí.

## 4.1 Distribuovaná vinutí

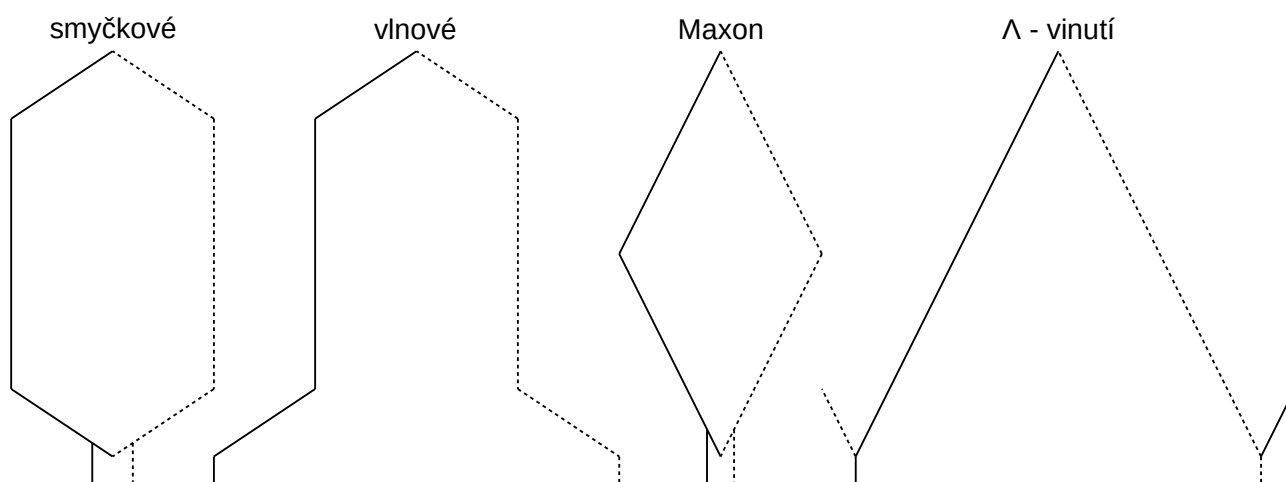
Základním elementem distribuovaných vinutí je cívka. Nezávisle na jejím konkrétním provedení lze u každé cívky vysledovat její základní topologické části – aktivní části, spočívající v cívkových stranách a neaktivní části, spočívající v čelech vinutí, která spojují jednotlivé cívkové strany. Cívky mezi sebou pak mohou být spojeny přímo vodičem cívky, či přes spojovací kruhy, které jsou součástí čel vinutí. Z hlediska elektromagnetického návrhu stroje jsou pak významnými parametry cívky počet jejích závitů (určuje se z proudového obsahu drážky) a krok cívky. Ačkoliv se oba parametry promítají do elektromagnetického návrhu stroje, krok cívky jako takový je součástí návrhu vinutí, který může být od daného konkrétního stroje zcela oddělen (různé stroje mohou mít stejnou topologii vinutí), zatímco počet závitů cívky je specificky spjat s daným elektromagnetickým návrhem stroje.



Obr. 4.3: Části cívky vinutí

V již zhotoveném stroji jsou pak cívkové strany zpravidla uloženy v drážkách (výjimkou jsou bezdrážkové stroje), zatímco čela vinutí se nacházejí mimo magnetický obvod a zabírají pouze se svým vlastním rozptylovým magnetickým polem. Díky tomuto faktu čela téměř neovlivňují magnetické pole stroje a indukuje se do nich pouze minimální část napětí. Protéká jimi však plný proud stroje a proto v nich vznikají ztráty srovnatelné s drážkovou částí vinutí. Z tohoto důvodu je snaha délku čel minimalizovat, a to jak volbou vhodného typu vinutí a jeho kroku, či za pomoci vhodné technologie výroby vinutí.

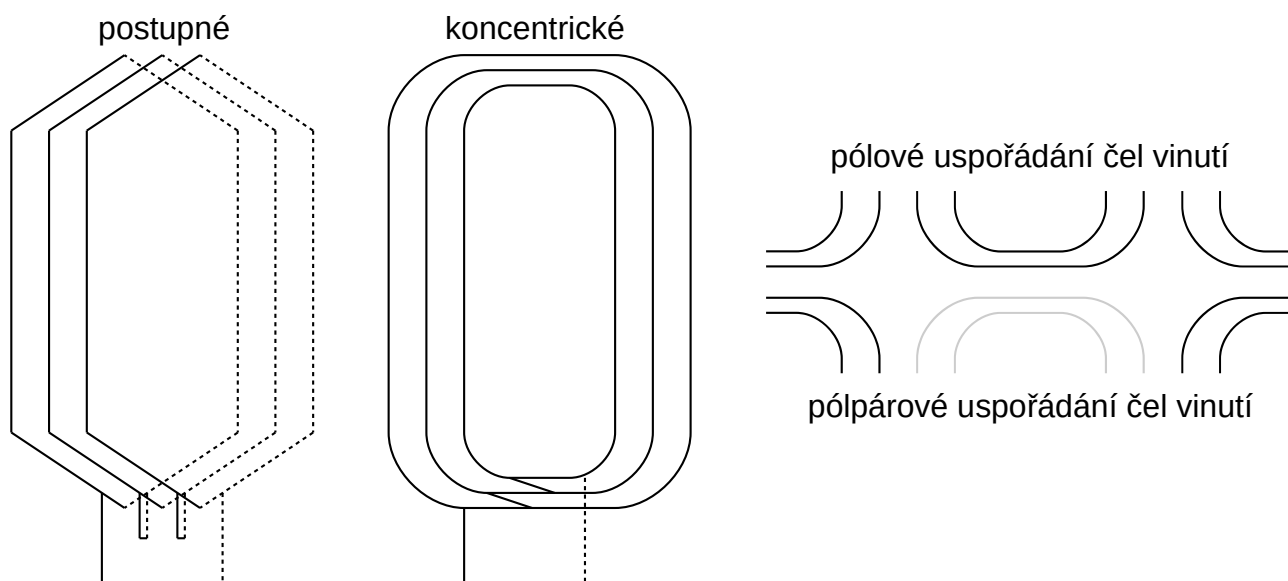
Vinutí jako taková lze dělit na základě řady různých parametrů. Na základě tvaru cívek je lze rozdělit na smyčková, vlnová a různé deriváty těchto základních typů. Příklady těchto derivátů mohou být vinutí pro bezdrážkové stroje, jako například  $\Lambda$ -vinutí a vinutí, která používá pro své stroje firma Maxon. Oba tyto typy vinutí jsou orientovány na maximální zkrácení čel, která jsou v tomto případě redukována pouze do podoby ohybu vodiče cívky na koncích statorového paketu. Jako samostatný typ vinutí lze označit u zubové vinutí, které je tvořeno cívkou navinutou pouze kolem jediného zubu kotvy a jeho krok je tak vždy roven jedné drážkové rozteči. Porovnání těchto typů je uveden v Obr. 4.4, přičemž uvedené typy cívek lze provést i jako asymetrické, či je lze kombinovat (například smyčkové s vlnovým vinutím jako Latourovo vinutí pro stejnosměrné stroje).



Obr. 4.4: Typy vinutí dle tvaru cívek

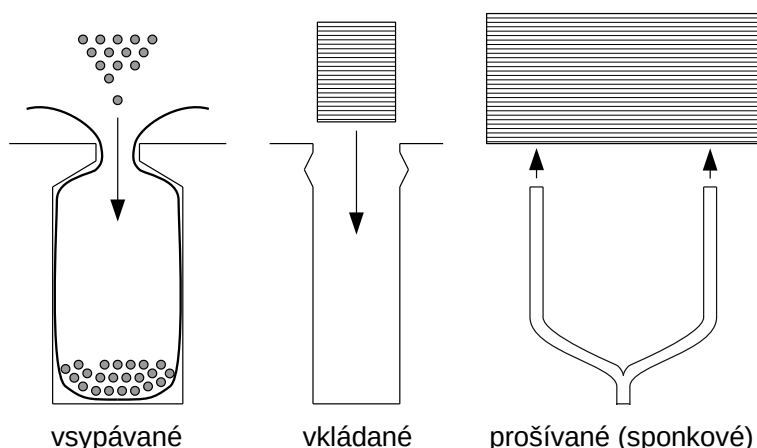
Cívky jako takové jsou následně spojovány v případě střídavých strojů do skupin cívek. Podle použité technologie navíjení lze tyto skupiny vyrábět v koncentrickém uspořádání, nebo jako postupné zapojení jednotlivých cívek za sebou. V závislosti na tom, zda je v koncentrickém uspořádání navinut každý pól, či pouze jediný pól z pólpáru pak lze klasifikovat samostatně pólové, respektive pólpárové uspořádání čel vinutí. Koncentrického uspořádání cívek se pak využívá i pro kompenzační vinutí stejnosměrných strojů, ačkoliv v tomto případě se používá téměř výhradně z důvodů ochrany před ložiskovými proudy pólové uspořádání.

Z hlediska konstrukce stroje je pak významný fakt, že v rámci návrhu střídavých vinutí se počítají pouze polohy jednotlivých cívkových stran a neuvažuje se způsob jejich propojení. V případě střídavého vinutí tak lze cívky dané skupiny pospojovat jak postupně, tak i koncentricky bez významného zásahu do funkčnosti stroje. Opět tak lze shodný návrh vinutí aplikovat jak pro malý stroj s koncentrickým vinutím, tak i pro stroj vyššího výkonu s postupným vinutím.



Obr. 4.5: Uspořádání cívek a čel vinutí

Podle způsobu výroby lze pak dále cívky, respektive vinutí, rozdělit na vsypávaná, vkládaná a prošívaná, přičemž specifickým případem prošívaných vinutí jsou současná sponková vinutí (hairpin winding). Vsypávaná vinutí jsou tvořena v nejčastěji vodiči kruhového průřezu, které se postupně vsypávají, či vsouvají do drážky. Tato drážka již musí být vybavena vyložení a ve většině případů je polouzavřená. Vkládaná vinutí se na-

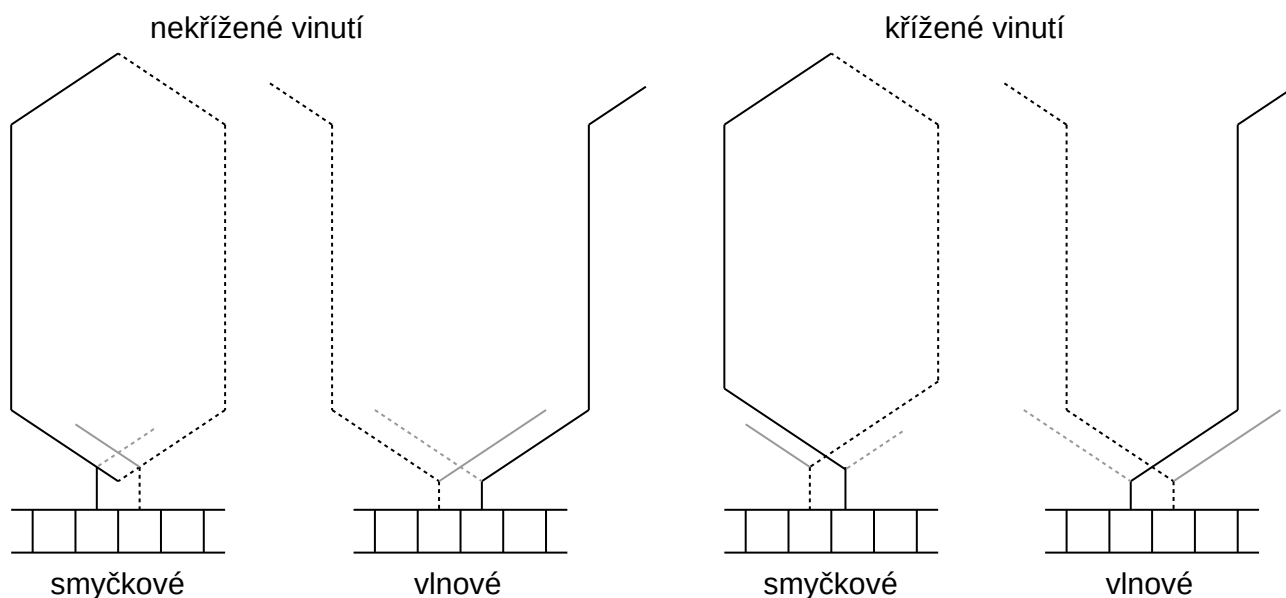


Obr. 4.6: Klasifikace vinutí dle technologie výroby

proti tomu navíjejí z již připravených cívek, které se celé, či po částech (tyčová vinutí) vkládají do drážek. Tyto drážky proto musí být otevřené. V případě prošívaných vinutí je vodič, či předtvarovaná část cívky zasouvána do čela paketu a protahuje se drážkou po celé délce stroje. Drážky prošívaného vinutí tak mohou být polouzavřené, či zcela uzavřené.

Cívky vinutí pak lze do drážky ukládat v různém počtu cívkových stran. Pro střídavá vinutí se používají prakticky výhradně jedna a dvě cívkové strany v drážce. V případě stejnosměrných vinutí byly historicky používány i tři a více cívkových stran, a to zejména z důvodů snížení mezilamelového napětí při komutaci stroje.

Z hlediska připojení na komutátor ve vztahu ke tvaru cívky lze dále dělit stejnosměrná vinutí na vinutí křížená a nekřížená. V případě smyčkového vinutí je křížené vinutí lehce rozeznatelné díky překřížení přírodních vodičů cívky v porovnání s běžným tvarem smyčkového vinutí. U vlnového vinutí k tomuto křížení dochází až po dokončení jednoho oběhu vlnového vinutí kolem kotvy stroje a lze je tak velmi složitě na zhotoveném stroji rozeznat.



Obr. 4.7: Porovnání připojení cívek na komutátor pro nekřížené a křížené vinutí

Podle způsobu zapojení cívek či skupin cívek pak lze vinutí rozdělit na vinutí sériová, sérioparalelní a vícenásobně paralelní, přičemž matematicky lze tuto vlastnost vyjádřit vztahem mezi počtem paralelních větví a počtem pólů stroje. Má-li stroj počet paralelních větví rovný jedné, pak jde o sériové vinutí, je-li vyšší než jedna, ale nižší, nežli počet pólů stroje, pak jde o sérioparalelní vinutí. V případě, že je počet paralelních větví roven počtu pólů stroje, jde o paralelní vinutí a v případě většího počtu paralelních větví jde o vícenásobně paralelní vinutí.

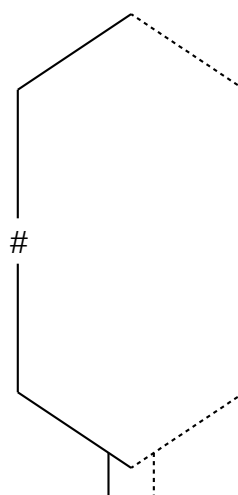
Na základě kroku vinutí pak lze rozlišit vinutí na zubová vinutí (krok vinutí je roven jedné drážkové rozteči), vinutí se zkráceným krokem (krok vinutí je menší, nežli pólová rozteč stroje), vinutí s plným krokem (krok vinutí je roven pólové rozteči stroje) a vinutí s prodlouženým krokem (vinutí má krok větší, nežli je pólová rozteč). Z vyjmenovaných typů se u stejnosměrných strojů nepoužívají zubová vinutí (ostatní typy ano), zatímco u střídavých strojů se prakticky nepoužívají vinutí s plným krokem a ostatní typy ano.

## 4.2 Systematika a nomenklatura vinutí obecně

V úvodu do systematiky a nomenklatury vinutí je třeba upozornit, že tato je obecně značně nejednotná a i v závislosti na geografickém původu různých publikací se liší. Kromě odlišností ve značení různých parametrů vinutí (např. pólová rozteč  $t_p$  bývá běžně značena též jako  $\tau_p$  [5]) se odlišnosti promítají i do značení cívkových stran vinutí (v některých publikacích jsou počítány cívkové strany, někde pouze drážky) či metod používaných pro analýzu vinutí (například v Česku běžně používané Tingleyho schéma je v německých publikacích nahrazeno plánem skupin (Zonenplan), který je vlastně rozvinutou podobou Tingleyho schématu). Významným faktem ale je, že výsledné navržené vinutí musí mít podle libovolného postupu shodné parametry. V dalších kapitolách tak bude používáno značení běžně zažité na ZČU, které využívá samostatné číslování cívkových stran. Pro porovnání užití tohoto systému značení s jinými pak lze doporučit jednotlivé publikace zabývající se alespoň okrajově vinutím a návrhem elektrických strojů.

Jak bylo výše řečeno, základním elementem vinutí je cívka. Ta je schematicky zakreslována dle Obr. 4.8, přičemž ve schématech je přední cívková strana vždy opatřena číslem a pokud možno se zakresluje plnou čarou. Zadní cívkové strany zůstávají nečíslovány a zakreslují se pokud možno přerušovanou čarou. Uvedený způsob zakreslování cívkových stran je dodržován vždy v případě stejnosměrných vinutí, v případě střídavých vinutí pouze v případě, že lze jednotlivé fáze vinutí zřetelně odlišit barvou.

Pro čísla cívkových stran pak platí taková konvence, že přední cívkové strany jsou vždy číslovány lichým číslem, zadní cívkové strany jsou číslovány sudým číslem (např. v pilovém schématu). V případě jedné cívky pak rozdíl pořadového čísla zadní a přední cívkové strany odpovídá kroku vinutí v počtu cívkových stran. Takto počítané kroky nejsou dodatečně indexovány. Pokud je některý z kroků počítán v počtu drážek stroje, je tento dodatečně indexován pro zřetelné odlišení písmenem „d“. Přehled veličin nezávislých na typu vinutí je pak uveden v Tab. 4.1.

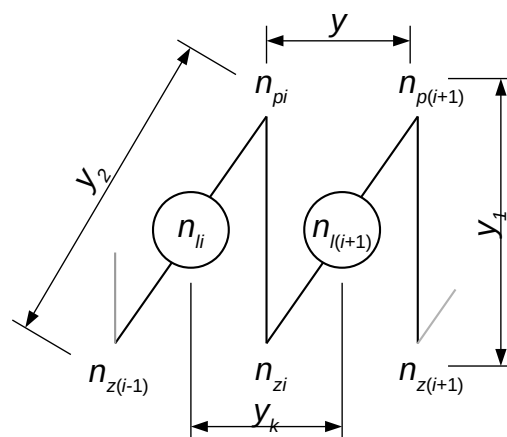


Obr. 4.8: Cívka

| veličina                        | označení | jednotky       | výpočetní vztah                                                               |
|---------------------------------|----------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| počet drážek stroje             | $Q$      | drážky         | volené                                                                        |
| počet pólů stroje               | $2p$     | póly           | volené                                                                        |
| počet pól párů                  | $p$      | pól páry       | volené                                                                        |
| počet cívkových stran v drážce  | $2u$     | cívkové strany |                                                                               |
| počet cívek vinutí <sup>3</sup> | $K$      | cívky          | $K = Qu$                                                                      |
| pólová rozteč                   | $t_{pd}$ | drážky         | $t_{pd} = \frac{Q}{2p}$                                                       |
| činitel zkrácení kroku          | $\beta$  | -              | volené                                                                        |
| cívkový krok                    | $y_{1d}$ | drážky         | $y_{1d} = \beta t_{pd}$                                                       |
| cívkový krok                    | $y_1$    | cívkové strany | $2u = 1 \Rightarrow y_1 = y_{1d}$<br>$2u > 1 \Rightarrow y_1 = 2u y_{1d} + 1$ |
| cívková rozteč                  | $y$      | cívkové strany | $y = 2y_k$ <sup>4</sup>                                                       |
| zadní cívkový krok              | $y_2$    | cívkové strany | $y_2 = y - y_1$                                                               |

Tab. 4.1: Nomenklatura veličin nezávislých na typu vinutí

Předstupněm pro zakreslení schématu vinutí je takzvané pilové schéma. Toto schéma je zjednodušenou formou schématu vinutí, která ale žádným způsobem nevystihuje tvar cívek vinutí, pouze určuje, které cívkové strany náleží dané cívce a ke kterým lamelám komutátoru, potažmo cívkám, je daná cívka připojena. Cívka v pilovém schématu je nahrazena pouze jedním „zubem pily“ (viz Obr. 4.9), přičemž na jeho horním okraji se nachází přední cívková strana cívky a na dolním okraji zadní cívková strana cívky. V souladu s předchozím jsou opět přední cívkové strany číslovány lichými čísly, zadní cívkové strany sudými čísly a jejich vzdálenost odpovídá kroku vinutí  $y_1$ . Vzdálenost předních (i zadních) cívkových stran následujících cívek pak odpovídá cívkové rozteči  $y$  a vzdálenost zadní cívkové strany cívky k následující přední cívkové straně odpovídá zadnímu cívkovému kroku  $y_2$ . Má-li stroj komutátor (stejnoseměrné stroje), pak jsou vyznačeny i lamely komutátoru, přičemž jejich číslování roste o krok na komutátoru, tj. o  $y_k$ . Na počátku tvorby pilového schématu je pak konvencí první lamelu komutátoru označit číslem 1 a na ni navazuje cívková strana číslo 1. Toto pravidlo se porušuje pouze v případě vinutí tvořených více samostatnými galvanickými celky.



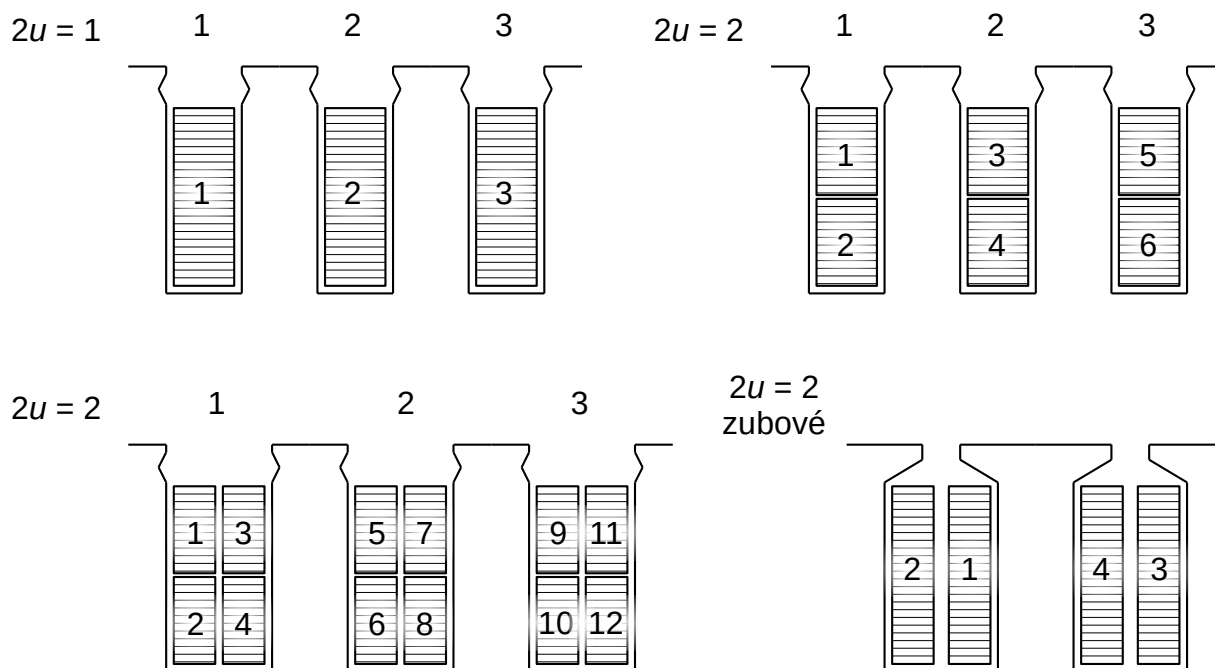
Obr. 4.9: Číslování elementů v pilovém schématu

Samotné umístění cívkových stran do drážek, respektive jejich číslování, je pak závislé na provedení vinutí, neodlišuje se však pro stejnosměrná a střídavá vinutí. Příklady číslování drážek a cívkových stran pro jedno, dvou a čtyřvrstvá vinutí doplněné o systematicku číslování zubových dvouvrstevých vinutí jsou uvedeny v Obr. 4.10.

Samotné umístění cívkových stran do drážek, respektive jejich číslování, je pak závislé na provedení vinutí, neodlišuje se však pro stejnosměrná a střídavá vinutí. Příklady číslování drážek a cívkových stran pro jedno, dvou a čtyřvrstvá vinutí doplněné o systematicku číslování zubových dvouvrstevých vinutí jsou uvedeny v Obr. 4.10.

<sup>3</sup> V případě stejnosměrných vinutí splývá počet cívek vinutí s počtem lamel komutátoru. Značení zůstává.

<sup>4</sup> Krok na komutátoru  $y_k$  je sice veličina vztažená k návrhu stejnosměrného vinutí, nicméně i v případě střídavých vinutí jej lze použít jako pomocnou veličinu, ať již pro návrh smyčkového či vlnového vinutí.



Obr. 4.10: Uspořádání cívkových stran v drážkách

V případě jednovrstvého vinutí je zřejmé, že čísla cívkových stran korespondují s čísly drážek. Měli být současně dodržena konvence o číslování cívkových stran, je nutné využít pro přední cívkové strany všechny liché drážky, sudé drážky pak budou rezervovány pro zadní cívkové strany. Důsledkem tohoto provedení pak je, že počet cívkových stran vinutí je roven počtu drážek a celkový počet cívek odpovídá polovině počtu drážek stroje.

U dvouvrstvého vinutí jsou pak přední cívkové strany uloženy v horní pozici v drážce, dolní pozice zůstává rezervována zadním cívkovým stranám. Je zřejmé, že krok vinutí v počtu cívkových stran bude roven počtu drážek znásobenému počtem cívkových stran v drážce zvětšenému o jedna, abychom přešli z horní polohy do polohy dolní, tedy

$$y_1 = 2u y_{1d} + 1 \quad (4.1)$$

Vzhledem k tomu, že počet cívkových stran je roven dvojnásobku počtu drážek, je počet cívek vinutí roven počtu drážek stroje.

Čtyřvrstvé vinutí pak dále zobecňuje předchozí závěry. Stejně jako v předchozím případě je nutné pro přepočet cívkového kroku z počtu drážek  $y_{1d}$  na cívkových krok v počtu cívkových stran  $y_1$  použít vztah (4.1). Počet cívek stroje roste na dvojnásobek a vztah mezi počtem cívek a počtem drážek stroje tak lze obecně zapsat jako

$$K = Qu \quad (4.2)$$

Výjimkou z uvedené systematiky jsou zubová vinutí. V jejich případě jsou cívkové strany orientovány v drážce ve většině případů vertikálně, což otáčí topologii drážky o  $90^\circ$  ve směru hodinových ručiček. Odvozené vztahy však zůstávají platné i pro toto vinutí.

Praktické provedení vinutí však může být i značně komplikovanější nežli naznačené příklady. Lze například tvořit i fyzicky vícevrstvá galvanicky oddělená vinutí. V tomto případě je třeba výpočet

jednotlivých vinutí jako samostatné úlohy, které se setkají až ve vyrobeném stroji. Zároveň lze například i navrhnout vinutí s více paralelními větvemi, které jsou ale nakonec provozovány samostatně jako dvě galvanicky oddělená vinutí.

### 4.3 Systematika a nomenklatura stejnosměrných vinutí

Základním rysem stejnosměrných vinutí je fakt, že tato vinutí tvoří jediný galvanický celek a všechny cívky vinutí jsou připojeny ke komutátoru. Zde se na každé lamelě scházejí dvě cívky jednoho galvanického celku vinutí, a počet lamel komutátoru je tedy rovný počtu cívek daného galvanického celku  $K$ . Na komutátor jako kluzný kontakt dosedají kartáče, přičemž vzdálenost dvou kartáčů se shodným potenciálem je rovna potenciálovému kroku

$$y_p = \frac{K}{p} \quad , \quad (4.3)$$

kartáče o opačném potenciálu jsou pak mezi sebou vzdáleny o polovinu této vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že komutátor je kluzný kontakt, nemusí potenciálový krok  $y_p$  být celé číslo.

Vzdálenost kontaktů předních cívkových stran na komutátoru pak udává krok na komutátoru  $y_k$ . Velikost kroku na komutátoru by se měla blížit potenciálovému kroku, přitom ale musí být krok na komutátoru celé číslo a v případě, že vinutí má být rozděleno do  $a_{\pm}$  párů paralelních větví, musí se rozdíl obou těchto hodnot blížit počtu párů paralelních větví

$$|y_p - y_k| \rightarrow a_{\pm} \quad . \quad (4.4)$$

Vztah mezi oběma kroky pak lze zapsat jako

$$y_k = \frac{\varepsilon K \pm a_{\pm}}{p} \quad , \quad (4.5)$$

kde  $\varepsilon$  je operátor respektující typ navrhovaného vinutí, na základě kterého se pak přičítá/odečítá počet párů paralelních větví.

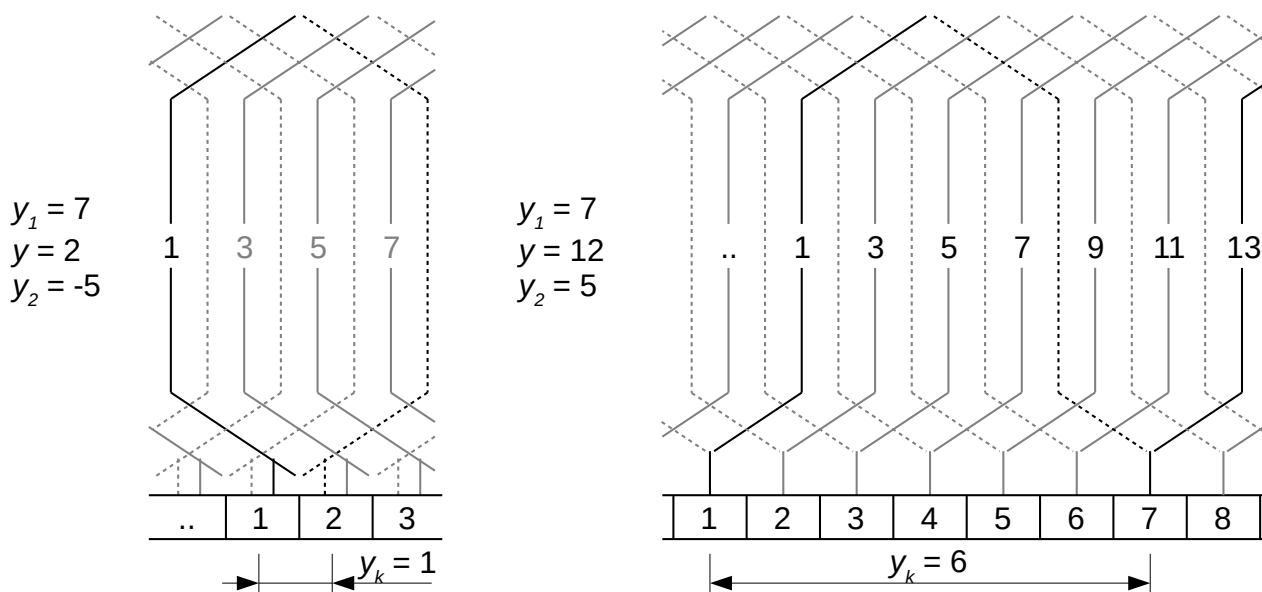
Pro smyčkové vinutí se tak používá hodnota  $\varepsilon = 0$ , což (4.5) zjednoduší do tvaru

$$y_k = \pm \frac{a_{\pm}}{p} \quad , \quad (4.6)$$

kde kladné znaménko odpovídá nekříženému vinutí a záporné kříženému. Pro vlnové vinutí se pak použije přímo vztah (4.5) s hodnotou  $\varepsilon = 1$  a kladným znaménkem pro křížené vinutí a záporným pro nekřížené vinutí.

Jak je zřejmé již j pilového schématu, na jedné lamelě komutátoru se scházejí zadní cívková strana jedné cívky spolu se zadní cívkovou stranou cívky následující. Vzdálenost předních cívkových stran je tedy rovná dvojnásobku kroku na komutátoru (neboť na jednu lamelu komutátoru připadají dvě cívkové strany) a platí

$$y = 2 y_k \quad . \quad (4.7)$$



Obr. 4.11: Části schémat vinutí pro smyčkové a pro vlnové vinutí

Počet párů paralelních větví stejnosměrného vinutí  $a_+$  je třeba provést na základě podmínky platnosti výsledného korku na komutátoru. Tj. výsledek výpočtu vztahu (4.5), potažmo (4.6) musí být celé číslo.

Pro smyčkové vinutí, které vychází ze vztahu (4.6), jsou tak v podstatě pouze dvě možnosti:  $a_+ = p$ , což vede na paralelní vinutí, kde počet párů paralelních větví odpovídá počtu polpárů, a nebo  $a_+ = kp$ , a výsledkem je tedy vícenásobně ( $k$ -násobně) paralelní vinutí.

V případě vlnového vinutí jsou již možnosti celkem čtyři:

- 1)  $a_+ = 1$ , a tedy vinutí má pouze jedinou paralelní větev a jde o sériové vinutí
- 2)  $a_+ \in (1; p)$  a jde o vinutí sérioparalelní
- 3)  $a_+ = p$  a výsledkem bude paralelní vinutí
- 4)  $a_+ > p$  a vinutí bude několikanásobně paralelní

V průběhu návrhu stejnosměrného vinutí však může dojít k situaci, kdy ačkoliv je  $y_k$  celé číslo, je jeho hodnota nevhodná a vinutí se rozpadá na více samostatných galvanických celků. Tato situace nastává v případě, kdy jsou počet lamel komutátoru a krok na komutátoru soudělná čísla. Na komutátoru se pak vytvoří skupiny nevyužitých lamel, ke kterým lze připojit již pouze galvanicky oddělený celek vinutí. Celkový počet samostatných galvanicky oddělených celků vinutí lze určit na základě soudělnosti počtu lamel komutátoru a kroku na komutátoru, tj. jako

$$\kappa_1 = D(K; y_k) \quad (4.8)$$

Rozpad vinutí na samostatné galvanické celky však nemusí znamenat, že vinutí bude neproveditelné. Po provedení analýzy za pomoci napětového polygonu lze na základě ztotožnění potenciálů lamel komutátoru s jinými lamelami a nebo čely vinutí zavést tzv. ekvipotenciální spojky, jimiž lze propojit galvanicky oddělené skupiny. Vinutí je pak neproveditelné až v případě, že ekvipotenciální spojky nelze zavést a nebo se galvanické celky redukují na shodný potenciál. V tomto případě vinutí degeneruje – klesá jeho skutečný počet párů paralelních větví a výsledek neodpovídá zadání.

## 4.4 Systematika a nomenklatura střídavých vinutí

Střídavá vinutí lze odvodit od stejnosměrných tzv. rozstříháním<sup>5</sup>. Pro střídavá vinutí jsou charakteristickými veličinami počet fází výsledného střídavého vinutí  $m$ , matematický počet fází střídavého vinutí  $m'$  a počet drážek na pól a fázi stroje  $q$ :

$$q = \frac{Q}{2pm} \quad (4.9)$$

Matematické fáze jsou přitom tvořeny fázovými svazky napájenými v obou polaritách – tj. svazky odpovídajícími fyzickým fázím a svazky odpovídajícími fyzickým fázím napájeným v opačné polaritě. Z toho vyplývá, že matematických fází  $m'$  je vždy dvojnásobné množství oproti fyzickým fázím stroje  $m$  (je-li využita možnost tvorby matematických fází).

Proces rozstříhání stejnosměrného vinutí na střídavé pak probíhá ve třech fázích. Na základě počtu párů paralelních větví stejnosměrného vinutí  $a_{\sim}$  se určí počet fázových svazků  $S_c$  jako

$$S_c = m' a_{\sim} \quad (4.10)$$

Tyto svazky je následně nutné rozdělit mezi jednotlivé fáze a určit počet svazků na fázi

$$S_f = \frac{S_c}{m} = \frac{m' a_{\sim}}{m} \quad (4.11)$$

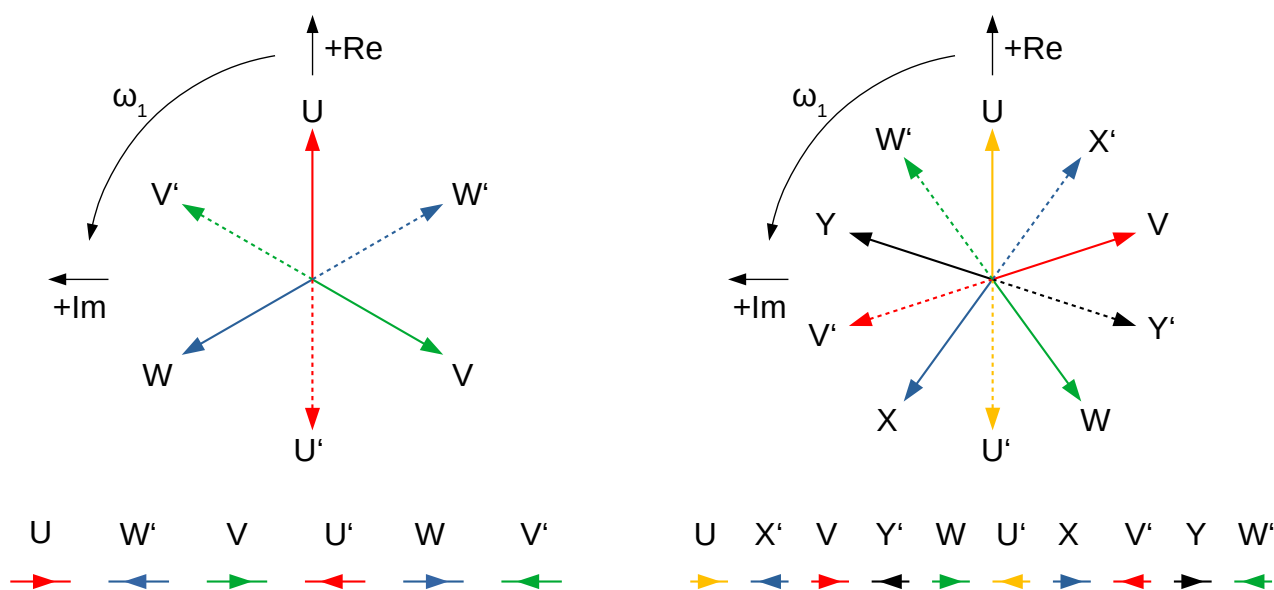
Z počtu cívek stroje pak lze určit počet cívek ve svazku

$$K_1 = \frac{K}{S_c} = \frac{K}{m' a_{\sim}} \quad (4.12)$$

přičemž v případě dvouvrstvých vinutí počet cívek ve svazku  $K_1$  splývá s počtem drážek na pól a fázi  $q$ , nicméně v případě jednovrstvých vinutí, jde o počet cívek stroje poloviční, klesá  $K_1$  na poloviční hodnotu oproti  $q$ . Vytvořené cívkové svazky pak lze na základě počtů cívek ve svazku spojovat do sériových, sérioparalelních či paralelních kombinací a tvořit tak paralelní větve střídavého vinutí  $a_{\sim}$ , což je hodnota, která obecně s počtem párů paralelních větví stejnosměrného vinutí  $a_{\sim}$  nemusí mít žádnou souvislost. Hodnoty  $a_{\sim}$  se mohou pohybovat od jedné do počtu pólů stroje. V případě, že  $a_{\sim} = 1$ , pak jde o ryze sériové vinutí. Pokud se  $a_{\sim}$  nachází v intervalu mezi 1 a  $2p$ , pak jde o sérioparalelní kombinaci vinutí, v případě, že  $a_{\sim} = 2p$ , jde o ryze paralelní vinutí. V souvislosti s nárůstem paralelních větví ovšem roste i riziko vyrovňovacích proudů.

Jako pomůcku pro návrh zapojení vinutí lze použít namísto pilového schématu tzv. úsečkové schéma, v němž lze vytvářet paralelní větve ze skupin cívek o shodné polaritě a počtu cívek. Úsečky v tomto schématu musí být orientovány a uspořádány podle směru točení a orientace fázorů jednotlivých matematických fází vinutí (viz Obr. 4.12). Pro trojfázové vinutí to znamená využití sekvence U-W'-V-U'-W-V', pro pětifázové vinutí vychází tato sekvence U-X'-V-Y'-W-U'-X-V'-Y-W'. Každá úsečka přitom odpovídá skupině cívek a je doplněna počtem cívek v dané skupině.

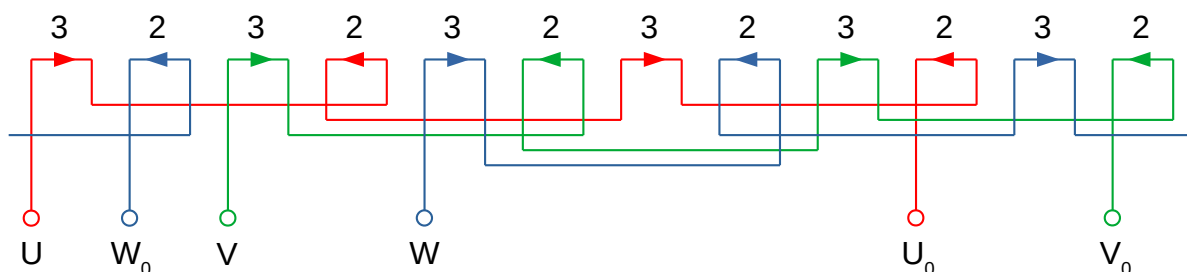
<sup>5</sup> Ale lze provést i nerozstříhaná vinutí, za předpokladu, že počet lamel komutátoru fiktivního stejnosměrného vinutí je násobkem počtu fází výsledného střídavého vinutí. Výsledné vinutí bude ale zapojeno do trojúhelníka a bude mít velmi nízký činitel vinutí.



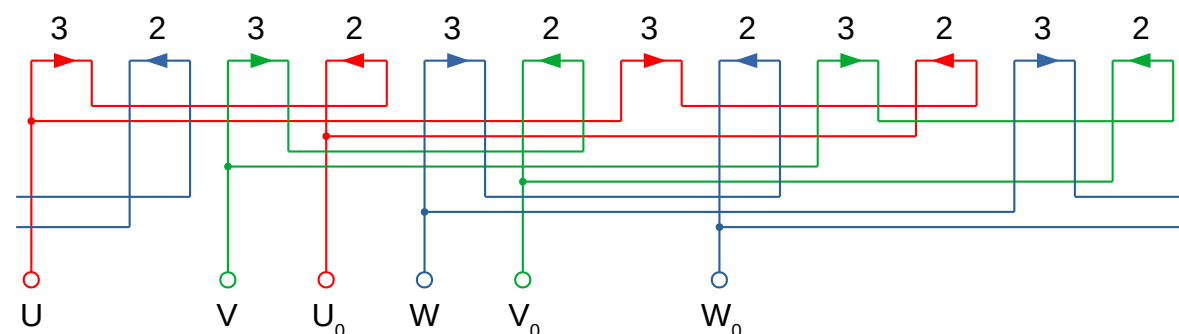
Obr. 4.12: Fázory matematických fází a jejich orientace v úsečkovém schématu

Na Obr. 4.13 jsou uvedeny příklady možných zapojení pro vinutí s  $K_1 = 2,5$  cívkami ve svazku a  $S_c = 12$  svazky cívek. V případě, že je  $K_1$  zlomkové, střídají se počty cívek tak, aby jejich průměrná hodnota dala hodnotu  $K_1$ . V tomto případě se tedy střídají svazky po třech a po dvou cívkách v sekvenci dle Obr. 4.12, která vychází ze sledu matematických fází a směru otáčení jejich fázorů v komplexní rovině. Svazky každé fáze jsou pak spojeny do elementárních skupin tak, aby počet cívek v každé skupině byl shodný. Tyto skupiny lze dále spojit buď sériově, nebo paralelně. Z úsečkového schématu pak již lze odvodit pilové schéma a finální schéma zapojení vinutí.

sériové zapojení:



paralelní zapojení:



Obr. 4.13: Možná zapojení pro vinutí s  $K_1 = 2,5$  a  $S_c = 12$

Alternativně lze střídavé vinutí navrhnout přímo z požadovaného počtu drážek na pól a fázi, počtu fází a počtu pólů stroje, ze kterých se určí počet drážek stroje

$$Q = 2 p m q \quad (4.13)$$

Odtud lze ekvivalentním postupem k návrhu stejnosměrného vinutí odvodit kroky cívek tp. Rozstříhání vinutí pak lze následně provést z tzv. Tingleyho schématu.

V případě tohoto postupu se volenou veličinou stává počet drážek na pól a fázi  $q$ . Ten lze obecně vyjádřit buď jako celé číslo (vhodné pro motory; jednodušší pro výrobu) nebo jako zlomek ve tvaru

$$q = \frac{q_0}{c} \quad (4.14)$$

kde, pokud má být navrženo symetrické vinutí, nesmí být jmenovatel násobkem počtu fází stroje  $m$ . Vinutí, u kterých lze počet drážek na pól a fázi  $q$  vyjádřit ve zlomkovém tvaru, se pak obecně nazývají zlomková vinutí. Tato vinutí se vykazují bohatší skladbou harmonických složek ve vzduchové mezeře a mají tedy vyšší diferenční rozptyl a tvoří více parazitních momentů. Na druhou stranu ale mají díky vyššímu čitateli  $q_0$  kvalitnější průběh indukovaného napětí, díky čemuž jsou tato vinutí historicky využívána u synchronních alternátorů. Za zmínku též stojí fakt, že jednovrstvá vinutí s lichým  $q$  se též chovají jako zlomková vinutí.

Z hlediska velikosti počtu drážek na pól a fázi lze zlomková vinutí rozdělit na klasická postupná vinutí (počet drážek na pól a fázi je větší, nežli jedna) a zubová vinutí (počet drážek na pól a fázi je menší, nežli jedna). Zubová vinutí se vyznačují extrémními hodnoty činitele diferenčního rozptylu, díky čemuž jsou vhodná pouze pro stroje s velkou vzduchovou mezerou a nízkou indukčností, tj. stroje s permanentními magnety (PMSM, PMSG, BLDC atp.).

Právě u zubových vinutí lze s výhodou využít výše nastíněný postup rozstříhání vinutí. Jako příklad lze zvolit  $2u = 2$ -vrstvé vinutí o  $2p = 8$  pólech,  $m = 3$  fázích a  $q = 3/8$ . Pro toto vinutí vychází

$$Q = 2 p m q = 8 \cdot 3 \cdot \frac{3}{8} = 9 \quad (4.15)$$

drážek, přičemž pro zubová vinutí platí, že jejich cívkový krok v počtu drážek je  $y_{1d} = 1$ . Cívkový krok v počtu cívkových stran pak je

$$y_1 = 2 u y_{1d} + 1 = 2 \cdot 1 + 1 = 3 \quad (4.16)$$

cívkové strany. Tingleyho schéma tohoto vinutí pak bude mít

$$R = 2 p = 8 \quad (4.17)$$

řádků a

$$C = q_0 m = 3 \cdot 3 = 9 \quad (4.18)$$

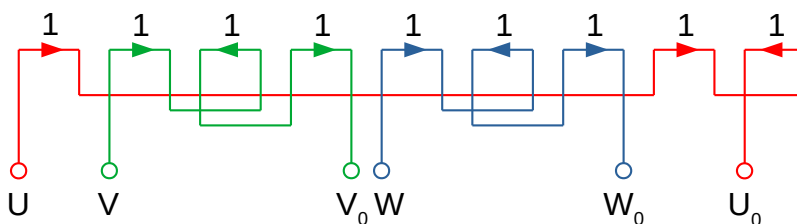
sloupců. Ve schématu přitom bude vyplněno každé  $c = 8$ . pole (viz rozklad  $q$  v (4.14)). Každé pole přitom odpovídá jedné drážce vinutí. Přední cívkové strany jsou vždy umístěny v oblasti dané fáze, která je vytyčena  $q_0$  sloupci, přičemž v případě  $m = 3$  fázového vinutí odpovídají přední cívkové strany v lichých pólech fázím U-W'-V a v sudých pólech U'-W-V' (dle sekvence na Obr. 4.12).

Na základě výše uvedeného postupu lze sestavit Tingleyho schéma v Tab. 4.2. Příslušnost jednotlivých cívkových stran k fázím zde vychází z polohy přední cívkové strany v pásu dané fáze, příslušnost zadní cívkové strany k určité fázi je pak dána krokem vinutí.

Z Tingleyho schématu tak lze odvodit, že cívka 1-4 bude náležet k fázi U, cívka 3-6 k fázi V, cívka 5-8 k fázi V' (neboť přední cívková strana této cívky (5. cívková strana) se nachází pod sudým pólem a zde se pole fáze V otáčí ve V') atd. Výsledné úsečkové schéma tohoto vinutí je uvedeno v Obr. 4.14.

|       | U<br>U'  |  | W'<br>W  |          | V<br>V' |        |        |
|-------|----------|--|----------|----------|---------|--------|--------|
| p = 1 | 1<br>2   |  |          |          |         |        | 3<br>4 |
| p = 2 |          |  |          |          |         | 5<br>6 |        |
| p = 3 |          |  |          |          | 7<br>8  |        |        |
| p = 4 |          |  |          |          | 9<br>10 |        |        |
| p = 5 |          |  |          | 11<br>12 |         |        |        |
| p = 6 |          |  | 13<br>14 |          |         |        |        |
| p = 7 |          |  | 15<br>16 |          |         |        |        |
| p = 8 | 17<br>18 |  |          |          |         |        |        |

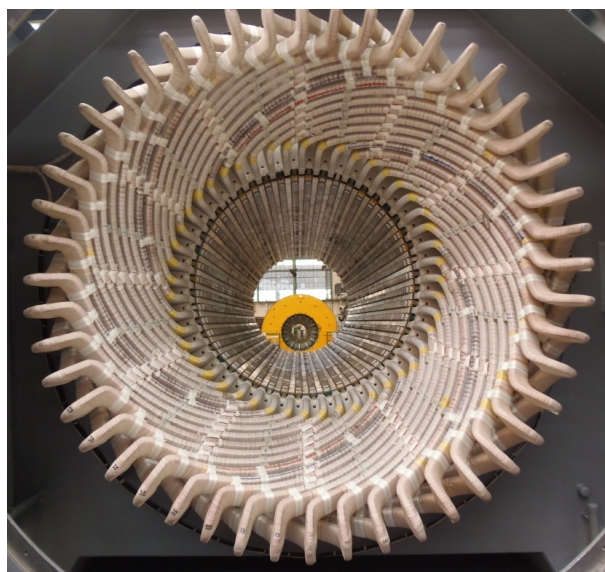
Tab. 4.2: Tingleyho schéma vinutí s  $q = 3/8$



Obr. 4.14: Úsečkové schéma vinutí s  $q = 3/8$

## 4.5 Čela vinutí

Z hlediska samotného vinutí čela vinutí plní pouze funkci elementů propojujících přední a zadní cívkové strany. S výjimkou zubových vinutí dochází v prostoru čel ke komplikovanému křížení vodičů, které znemožňuje uložit čela do feromagnetického materiálu a jsou tedy umístěna pouze ve vzduchu, případně na nemagnetických oporách. V důsledku tohoto faktu čela vinutí nepřispívají k tvorbě momentu stroje ani indukovaného napětí a jde tedy o ryze pasivní části vinutí. Přesto však přispívají ke vzniku ztrát ve stroji ať již svým vlastním odporem, nebo tvorbou rozptylového magnetického pole, které indukují vířivé proudy do konstrukčních částí stroje. Proto je žádoucí provedení pokud možno nejkratších čel vinutí.

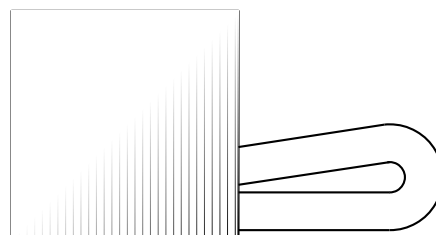


Obr. 4.15: Čela vinutí turboalternátoru

V případě nízkonapěťových strojů s cívkami tvořenými vodiči kruhového průřezu se jednotlivé vodiče cívek dotýkají a dle potřeby (provozního napětí) bývají doplněny buď izolační vložky mezi cívkami jednotlivých fází. U strojů, jejichž vinutí je vyrobeno z vodičů obdélníkového průřezu, se dodržuje jistá izolační vzdálenost  $c$ , která je u nízkonapěťových strojů zpravidla mírně větší než jeden či dva milimetry, což zajistí průchod chladicího vzduchu kolem čel. U vysokonapěťových strojů je pak tato vzdálenost odvozená od jmenovitého napětí stroje dle

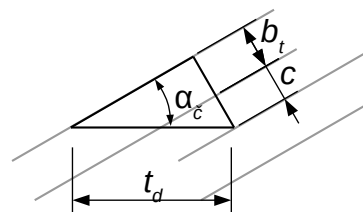
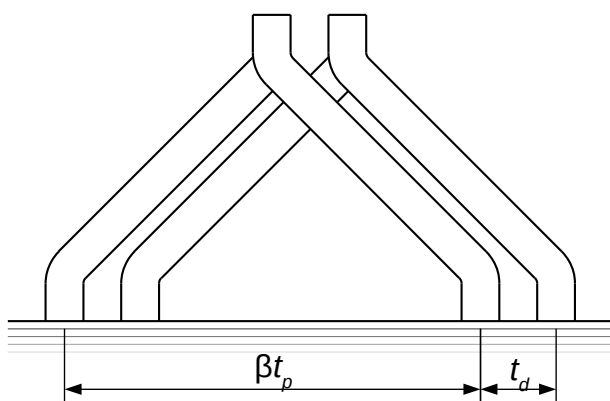
$$c = 4 + \frac{U_n [kV]}{2} \quad [mm]. \quad (4.19)$$

Pro zachování konstantních rozestupů mezi čely a zároveň udržení jejich minimální délky je tak u postupných vinutí nutné, aby byla čela tvořena ekvidistančními křivkami. V případě čistě axiálních čel (viz Obr. 4.16) je touto tvořící křivkou šroubovice, která se při průmětu na válcovou plochu promítá jako přímka. Tato čela pak lze překreslit do podoby na . Úhel, který svírá tato šroubovice se základnou válce pak lze následně odvodit ze samotné šířky tyče vinutí  $b_t$ , nutné izolační vzdálenosti  $c$  a drážkové rozteče stroje  $t_d$  dle Obr. 4.17 jako:



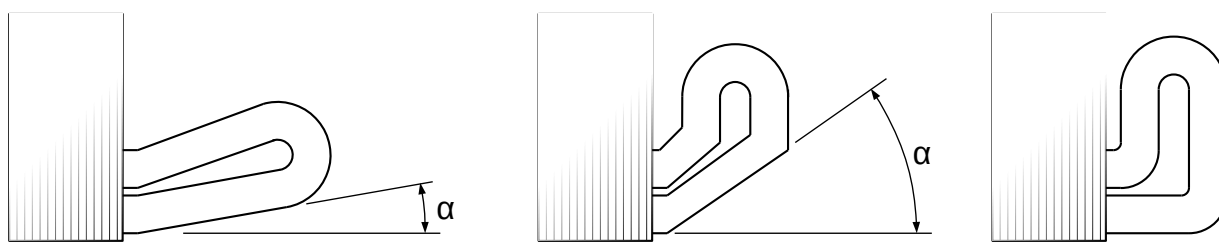
Obr. 4.16: Profil axiálního čela vinutí

$$\alpha_c = \arcsin \frac{b_t + c}{t_d} . \quad (4.20)$$



Obr. 4.17: Průmět axiálních čel vinutí  
a určení maximálního možného sklonu čel vinutí

U ostatních typů čel, kde dochází k odklonění tvaru čela od válcové plochy, se šroubovice deformuje a při čelním pohledu opisují tvar tzv. evolventy. Vzhledem k tomu, že čistě axiální čela se uplatňují téměř výhradně při konstrukci rotorů stejnosměrných strojů, lze téměř u všech ostatních typů strojů hovořit o evolventních čelech vinutí. Příklady evolventních čel jsou vyobrazeny na Obr. 4.18. Úhel odklonu čel od válcové plochy  $\alpha$  pak dosahuje jednotek stupňů až  $15^\circ$  v případě axiálních skloněných čel a cca  $25^\circ - 35^\circ$  v případě částečně radiálních čel.



Obr. 4.18: Evolventní čela vinutí: axiální skloněná (vlevo), částečně radiální (uprostřed) a radiální (vpravo)

Evolventa, kterou opisují čela vinutí, je pak křivka, která vzniká odvalováním tečny po kružnici. Původně tečný bod při sledování jeho pohybu pak opisuje evolventu. Jelikož je pevně daná vzdálenost tečných bodů na kružnici, je dána i vzdálenost jednotlivých vytvořených evolvent, které jsou tak ekvidistantními křivkami. Vzdálenost těchto křivek je pak dána šíří tyče vinutí  $b_t$  a velikostí izolační vůle mezi tyčemi  $c$ . Pro  $Q$  drážek vinutí (a čel vinutí) je tak obvod tvořící kružnice (základní kružnice evolventy):

$$o = Q(b_t + c) \quad (4.21)$$

a průměr tvořící kružnice pak bude

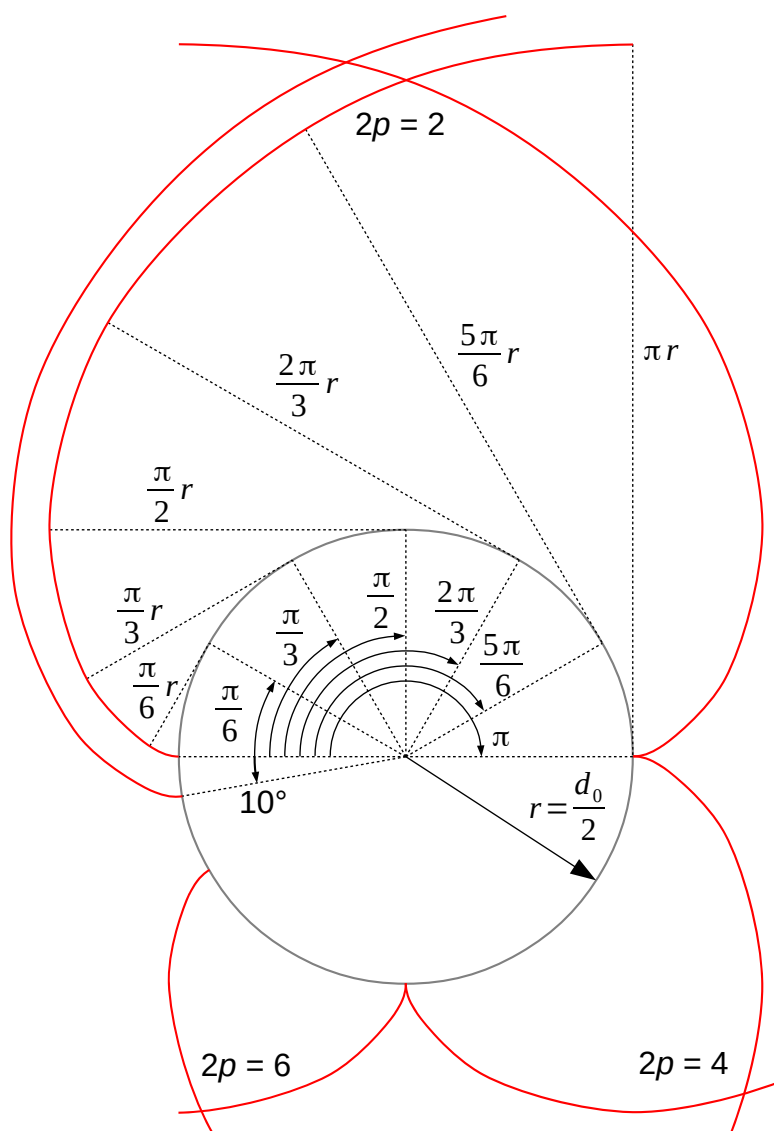
$$d_0 = \frac{Q(b_t + c)}{\pi} \quad (4.22)$$

Vzhledem k tomu, že izolační vzdálenost mezi čely je téměř vždy menší, nežli šířka zubu stroje, vychází průměr tvořící kružnice  $d_0$  menší nežli vnitřní průměr statoru stroje  $D_1$ . V opačném případě by pak řešení neexistovalo.

V případě skloněných čel se pak evolventa promítá na kuželovou plochu pod sklonem  $\alpha$  (viz obr. 4.20, praktické provedení je pak zřejmé z obr. 4.1). Evolventa se pak zde tvoří od fiktivního poloměru  $R$ , pro který platí

$$\sin \alpha = \frac{r}{R} \quad (4.23)$$

a tedy stejně jako v předchozím případě je poloměr tvořící kružnice



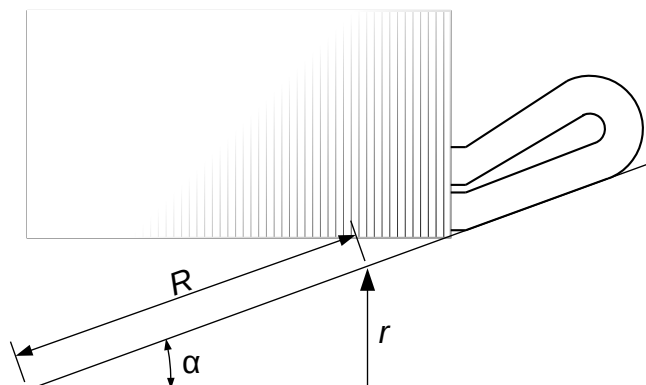
Obr. 4.19: Průběhy evolventních čel pro dvou, čtyř a šestipólový stroj

$$R = \frac{Q(b_t + c)}{2\pi \sin \alpha}, \quad (4.24)$$

respektive její průměr

$$D_0 = \frac{Q(b_t + c)}{\pi \sin \alpha}. \quad (4.25)$$

Jak již bylo uvedeno dříve – uvedené postupy mají (matematický) smysl pouze pro statory, na rotorech elektrických strojů se tedy vždy využívají šroubovicová čela vinutí.



Obr. 4.20: Průmět evolventy na kuželovou plochu