



ÚŘAD PRO VYNÁLEZY
A OBJEVY

POPIS VYNÁLEZU K AUTORSKÉMU OSVĚDČENÍ

200 821

(11) (B1)

(61)

(23) Výstavní priorita
(22) Přihlášeno 11 08 78
(21) PV 5259-78

(51) Int. Cl.³ G 01 N 27/78 ✓

24/00

(40) Zveřejněno 31 01 80
(45) Vydáno 01 02 83

(75)

Autor vynálezu ŠVÉDA KAREL ing. CSc.,
KALIŠ MIROSLAV dipl. tech., a
ŠVEC VLADIMÍR ing., BRNO

(54) KOREKČNÍ VINUTÍ

1

Vynález se týká korekčního vinutí, které kompenzuje některé ze složek, porušujících homogenitu stejnosměrného polarizačního magnetického pole generovaného magnetem spektrometru nukleární magnetické rezonance.

Spektrometry nukleární magnetické rezonance, zejména spektrometry s velkým rozlišením, vyžadují velmi homogenní stejnosměrné magnetické polarizační pole. Tak zvaná efektivní homogenita dosahuje u dobrých spektrometrů hodnoty 10^{-9} až 10^{-10} při polích řádu 1 až 10 T. Těchto hodnot se dosahuje jednak velmi pečlivou konstrukcí s výrobou magnetu, jednak použitím speciálních korekčních obvodů a konečně rotací vzorku. Návrhy korekčních obvodů vycházejí z rozkladu nehomogenního základního pole magnetu v soustavu ortogonálních složek, například pomocí sférických harmonických, Taylorova rozvoje a podobně. Jsou-li poruchy homogenity základního pole malé - řádově 10^{-5} - lze ukázat, že pro účely spektrometrie nukleární magnetické rezonance dostačuje kompenzovat pouze poruchové složky nejnižších řádů ve směru základního pole. Obvykle se kompenzují všechny složky prvního a druhého řádu a ze složek třetího a čtvrtého řádu potom zejména ty, které nejsou zprůměrovány rotací měřeného vzorku. Při realizaci korekčního obvodu se proto hledá takové prostorové uspořádání vodičů - korekční vinutí, které v ideálním případě vytváří magnetické pole tvarem přesně odpovídající vybrané ortogonální složce; velikost a polarita tohoto pole se nastaví velikostí a směrem

proudu v korekčním vinutí tak, aby se zrušila zvolená poruchová složka. Korekčních vinutí je tolik, kolik poruchových složek má být kompenzováno, obvykle 8 až 12. Všechna použitá korekční vinutí vytvářejí dohromady korekční systém, který musí být realizován tak, aby nepřekážel hlavici spektrometru. Bývá proto u magnetů s feromagnetickým obvodem rozdělen do dvou zrcadlově identických sekcí, které mají tvar plochých desek, umístěných v mezeře magnetu symetricky vzhledem k hlavici spektrometru nebo jsou obě sekce zabudovány přímo do plochých víček hlavy.

Realizované korekční systémy, zejména však korekční vinutí pro složky třetího a čtvrtého řádu mají i určité nedostatky. Přísně vzato není možné vyrobit ideální korekční vinutí, které by kompenzovalo pouze jednu jedinou zvolenou složku a současně nevytvářelo i jiné nežádoucí složky. Vzhledem k určitému typu symetrie sekcí, vytváří korekční vinutí složky buď sudých nebo lichých řádů; obvykle dvě až tři ze zbývajících nežádoucích složek lze vykompenzovat volbou geometrických rozměrů korekčního vinutí, počtem a polohou jeho závitů a eventuelně i rozdílnými proudy z nich. Praktickým výsledkem je například korekční vinutí, které vlivem symetrického uspořádání nevytváří žádné složky sudých řádů, u něhož jsou dále velmi dobře potlačeny složky třetího a pátého řádu, které však produkuje i nepotlačené složky sedmého a vyšších řádů, čímž může být porušena homogenita pole v místech vzdálených od středu pracovní mezery magnetu; to omezuje velikost měřených vzorků a tím v některých případech snižuje citlivost měření. Korekční systém se obvykle navrhuje pro magneticky zcela homogenní prostředí. V praxi však není tento předpoklad splněn. Vliv konstrukce měřicí hlavy spektrometru a různých, při její realizaci použitých dia- a paramagnetických materiálů, na pole korekčních vinutí lze zanedbat. To však neplatí pro vliv feromagnetických pólových nástavců, v jejichž blízkosti jsou sekce korekčního systému umístěny. Exaktní výpočet pole korekčních vinutí není v tomto případě dosti dobře možný, protože na sycení závislá permeabilita feromagnetika je v různých částech magnetického obvodu různá. Z teoretických prací provedených za zjednodušených předpokladů však vyplývá, že složky vyšších řádů nemají podstatný vliv na pole korekčních vinutí pro složky prvního a druhého řádu. Naopak to však neplatí; každé z dosud používaných korekčních vinutí pro složku třetího řádu obsahuje i složku prvního řádu a obdobně korekční vinutí pro složku čtvrtého řádu vytváří i složku základní a složku druhého řádu. Tyto nežádoucí složky se snažíme vyloučit dalšími přidavnými vodiči v příslušném korekčním vinutí, eventuelně experimentálně nastavenými proudy v jednotlivých jeho částech a podobně. Uvedená kompenzace však nebývá zejména pro parazitní složky prvního a druhého řádu dokonalá, je závislá i na tvaru a sycení pólových nástavců, korekční systém jako celek není ortogonální a to stěžuje obsluhu při ladění spektrometru a je překážkou pro eventuální automatizaci uvedené operace.

Tyto nedostatky, spojené s výskytem složek nižších řádů, než je řád kompenzované složky, odstraňuje korekční vinutí pro vybranou složku nehomogenity základního polarizačního stejnosměrného magnetického pole magnetu spektrometru nukleární magnetické rezonance sestávající ze dvou sekcí, vytvořených funkčními vodiči, jehož podstatou je, že obě sekce jsou zrcadlově identické a každá z nich je dělitelná na 2n totožných skupin vodičů, přičemž sou-

seční skupiny jsou propojeny vůči sobě v opačném smyslu a jsou vůči sobě pootočený o úhel $180^\circ/n$, kde n je řád vybrané složky.

Základní výhodou předloženého uspořádání je to, že principiálně nevytváří složky nižších řádů než je řád požadované složky, tedy například korekční vinutí pro třetí složku třetího řádu nevytváří složku prvního řádu, u korekčního vinutí pro složku čtvrtého řádu neexistují složky základní a druhého řádu. Při použití korekčních vinutí podle předkládané přihlášky nedojde k posunu spektrálních čar a ke vzájemnému ovlivňování jednotlivých korekčních vinutí systému, což usnadňuje ladění magnetu spektrometru a je nutným předpokladem pro automatizaci této operace. Nepřítomnost uvedených nižších složek usnadňuje rovněž návrh příslušných korekčních vinutí, respektive umožňuje kompenzovat známým způsobem více složek vyšších řádů a tím rozšiřuje oblast, ve které korekční vinutí funguje požadovaným způsobem, a tudíž dovoluje použít větších rozměrů vzorku.

Vynález blíže objasní přiložené výkresy, kde na obr. 1 je uvedeno jedno z mnoha prostorových uspořádání vodičů - korekční vinutí pro složku magnetické indukce ve směru základního polarizačního pole třetího řádu, pro tak zvanou sektorovou harmonickou třetího řádu a průběh této složky v závislosti na souřadnicích. Na obr. 2 je pomocí obrazce, vytvořeného vodiči s vyznačenými směry proudů v jedné sekci, znázorněno praktické provedení korekčního vinutí z obr. 1. Obr. 3, 4, 5, 6 a 7 naznačují některé z dalších možností realizace korekčního vinutí pro uvedenou složku. Na obr. 8 je příklad obrazce korekčního vinutí pro sektorovou harmonickou čtvrtého řádu a jeden příklad obrazce korekčního vinutí pro složku pátého řádu je na obr. 9. Na obr. 10 a 11 jsou ukázány příklady některých složitějších mnohazávitových skupin vodičů, které lze použít při realizaci sekcí korekčního vinutí. Na všech obrázcích jsou jednotně vyznačeny: proud $\underline{I}$, tekoucí v jednotlivých vodičích a jeho směr šipkou, respektive proudy $\underline{I}_1, \underline{I}_2$, pokud tečou v některých částech skupiny vodičů různé proudy; střed obrazce $\underline{S}$, odpovídající průsečíku roviny obrazce s osou $\underline{z}$ souřadného systému z obr. 1; osy $\underline{x}$ a $\underline{y}$ rovnoběžné s osami $\underline{x}, \underline{y}$ zmíněného souřadného systému z obr. 1; osy symetrie $\underline{s}_1, \underline{s}_2, \underline{s}_3, \dots$. Na některých obrázcích zakreslené nefunkční přívodní vodiče $\underline{P}, \underline{Q}, \underline{P}_1, \underline{Q}_1, \dots$ a spojky mezi jednotlivými skupinami vodičů $\underline{r}_1, \underline{r}_2, \underline{r}_3, \dots$ jsou naznačeny čárkovaně.

Na obr. 1 znázorněné prostorové uspořádání vodičů - korekční vinutí pro složku třetího řádu se skládá ze dvou identických sekcí $\underline{A}, \underline{B}$, umístěných mezi pólovými nástavci 101, 102 magnetu, symetricky v rovinách $z = \pm z_0$, kde z_0 je vzdálenost sekce od počátku $\underline{O}$ pravouhlé soustavy souřadné $\underline{x}, \underline{y}, \underline{z}$. Obě sekce $\underline{A}, \underline{B}$ jsou vytvořeny identickými proudovodiči $\underline{1}, \underline{2}, \underline{3}, \underline{4}, \underline{5}, \underline{6}$, ve tvaru orientované přímky, které jsou vůči sobě pootočený o úhel $180^\circ/3 = 60^\circ$, to jest vodič $\underline{2}$ je pootočen oproti vodiči $\underline{1}$ o 60° , vodič $\underline{3}$ opět o 60° vzhledem k vodiči $\underline{2}$ atd. Vodič $\underline{1}$ je rovnoběžný s osou $\underline{x}$. Všemi vodiči protéká stejný proud $\underline{I}$, jehož směr v jednotlivých vodičích vyznačují šipky. Vodiče každé z obou sekcí $\underline{A}, \underline{B}$ jsou uspořádány ve tvaru obrazce, jehož základním prvkem - motivem je orientovaná přímka ve vzdálenosti $\underline{y}_0$ od průsečíku $\underline{S}$ osy $\underline{z}$ s rovinou obrazce. Celý obrazec vzniká opakováním motivu - jeho pateronásobným pootočením kolem osy o úhel 60° , přičemž se při každém pootočení mění směr proudu. Sekce je

tedy dělitelná na $2 \times 3 = 6$ totožných skupin vodičů, sousední skupiny jsou propojeny vůči sobě v opačném smyslu a jsou vůči sobě pootočený o úhel $180^\circ/3 = 60^\circ$. Obrazec má tři osy symetrie $\underline{1}_s, \underline{2}_s, \underline{3}_s$; osou symetrie však není například osa $\underline{1}_y$, protože při překlopení podél ní se mění orientace přímek a jí odpovídající směry proudů.

Závislost složky B_z magnetického pole ve směru osy z na souřadnicích x, y, z u ideálního korekčního vinutí pro sektorovou harmonickou třetího řádu znázorňuje prostorová plocha 999; závislost je přímo úměrná proudu I ve vodičích a je funkcí pouze souřadnic x a y a proto lze ve směru osy z vynášet její velikost B_z .

Znázorněné prostorové uspořádání vodičů pro vytvoření magnetického pole, jehož složka ve směru osy z odpovídá sektorové složce třetího řádu sférických harmonických, není jediné možné. Takové pole lze vytvořit i nesčetným počtem dalších korekčních vinutí. Na obr. 2 až 7 je jako příklad uvedeno několik jiných obrazců.

Délka vodičů pro korekční vinutí z obr. 1 je v praxi omezená, jak je ukázáno na obrazci 20 jedné sekce na obr. 2, kde orientované úsečky nahrazují stejně označené přímký z obr. 1. Úsečkami znázorněné jednotlivé vodiče $\underline{1}, \underline{2}, \underline{3}, \underline{4}, \underline{5}, \underline{6}$, které jsou funkčními částmi vinutí, je nutno propojit nefunkčními spojkami $\underline{r}_1, \underline{r}_2, \underline{r}_3, \underline{r}_4, \underline{r}_5, \underline{r}_6$ a přívody $\underline{p}, \underline{q}, \underline{p}_1, \underline{q}_1$. Všemi vodiči teče stejný proud I , jehož směr označují šipky. Za charakteristický motiv obrazce lze pokládat vodič $\underline{1}$, obdobně jako na obr. 1. Zkrácením vodičů z obr. 2 lze dospět k obrazci 30 na obr. 3, u něhož není nutno použít spojek a lze jej velmi dobře realizovat technikou tláčených spojů na oboustranně mědi plátovaných deskách, jsou-li na jedné straně propojeny vodiče $\underline{1}, \underline{2}, \underline{5}$ a na druhé $\underline{2}, \underline{4}, \underline{6}$. Rozšířením počtu vodičů ve tvaru orientované úsečky na dva vodiče $\underline{1}, \underline{11}$ spojené spojkami $\underline{r}_1, \underline{r}_{11}$, v obr. 4 vzniká charakteristický motiv - jednozávitový obdélník, jehož pětinašobným pootočením o úhel 60° s změnou směru proudu po každém jednotlivém pootočení se vytváří obrazce 40. Motívem obrazce sekce korekčního vinutí nemusí být pouze orientované úsečky; mohou to být různé křivky, oblouky a jejich kombinace s úsečkami jako např. kružnice $\underline{51}$ u obrazce 50 na obr. 5, části kruhových oblouků $\underline{61}, \underline{62}$ se spojkami $\underline{r}_{61}, \underline{r}_{62}$ v obrazci 60 na obr. 6 nebo kombinace hyperbolického $\underline{71}$ a kruhového $\underline{72}$ oblouku, jak je naznačeno na obrazci 70 na obr. 7, atd.

Na obr. 8 zakreslený obrazec 80 představuje jednu z nesčetných možností pro realizaci korekčního vinutí, jímž vytvářená složka magnetické indukce ve směru osy z z obr. 1 obsahuje jako první člen sektorovou harmonickou čtvrtého řádu. Vinutí naznačené obrazcem 80 lze rozdělit v osm totožných skupin ve tvaru úsečky $\underline{81}$, které jsou sedmkrát pootočený o úhel 45° kolem středu S , přičemž proudy I v sousedních vodičích tečou v opačném smyslu. Obrazec 80 má čtyři osy symetrie $\underline{1}_s, \underline{2}_s, \underline{3}_s, \underline{4}_s$, osami symetrie však nejsou například osy $\underline{1}_x$ a $\underline{1}_y$, rovnoběžné s osami x, y z obr. 1. Obdobně vzniká i obrazec korekčního vinutí 90 na obr. 9, určeného pro korekci sektorové složky pátého řádu; motívem tohoto obrazce je opět úsečka $\underline{91}$, úhel jednotlivých pootočení je však 36° . Obrazec 90 má pět os symetrie $\underline{1}_s$ až $\underline{5}_s$.

U všech motivů lze obecně použít nejen jeden, ale celou skupinu vodičů respektive závitů různě uspořádaných a různě uložených. To ukazují například motivy na obr. 10 a 11, u nichž je jednozávitový obdélník použit celkem třikrát a to jednou samostatně $\underline{111}$ a podruhé ve sku-

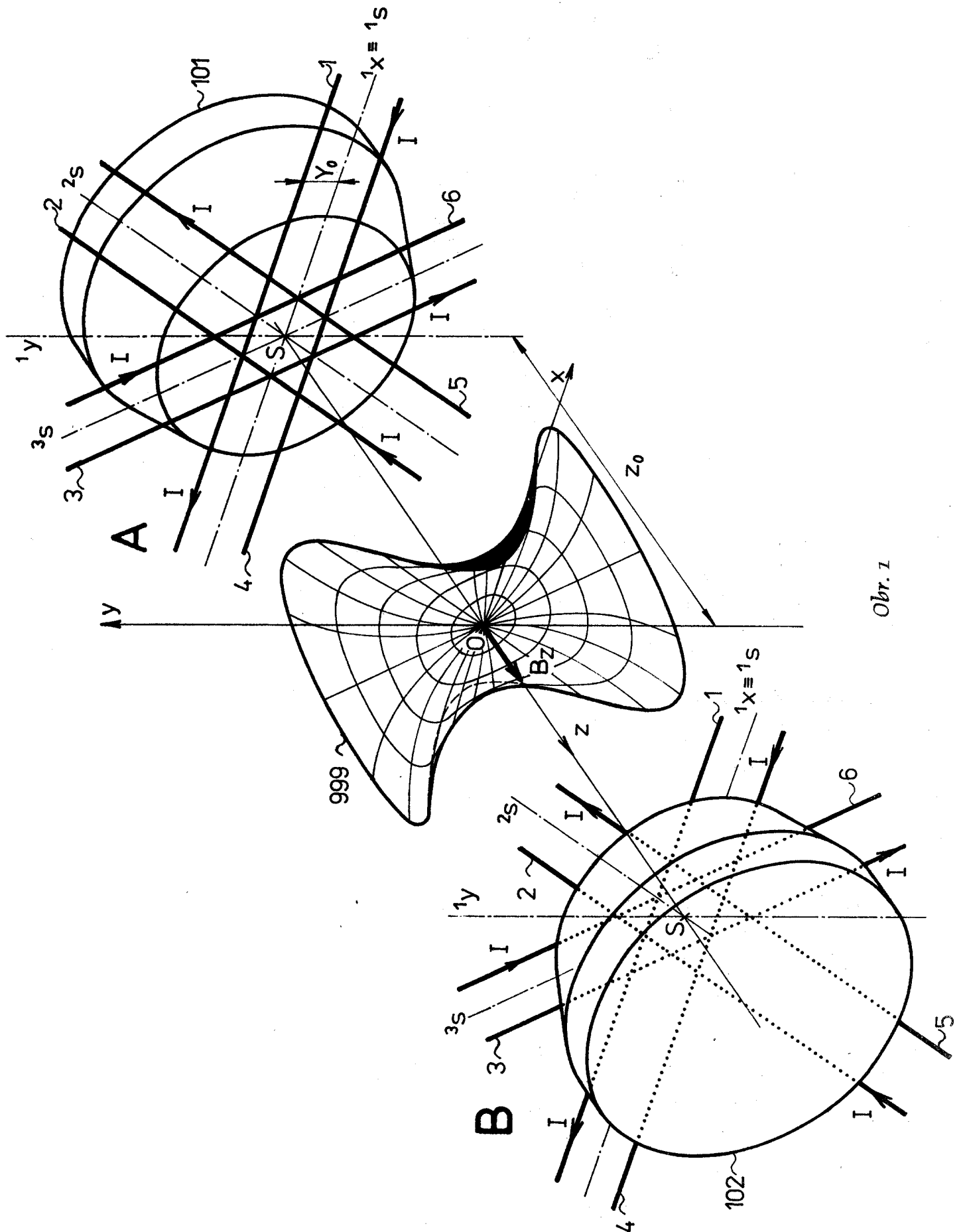
pině o dvou závitech 112, 113. Na obr. 10 protéká všemi závity týž proud I, na obr. 11 však teče samostatným závitem 111 proud I₁ a dvěma vnitřními závity 112, 113 proud I₂; v druhém případě má motiv samozřejmě dvě dvojice přívodů p₁, q₁ a p₂, q₂.

Funkce uspořádání vodičů vyplývá z Legendreova rozvoje obecného magnetického pole v prostoru, v němž je proudová hustota nulová. Tento rozvoj vede jak známo k ortogonálním složkám - tak zvaným sférickým harmonickým, které jsou trojího typu: zonální, tesserální a sektorové. Zonální složky jsou rotačně symetrické vzhledem k ose z souřadné soustavy z obr. 1 a lze je proto vytvořit rotačně symetrickým uspořádáním proudovodičů. Při omezení tvaru korekčních vinutí na dvě rovinné sekce je jedinou možností použití proudovodičů ve tvaru kružnice nebo soustavy koncentrických kružnic. Taková soustava však obecně vytváří zonální složky všech řádů včetně základního. Pro vytvoření složky určitého zvoleného řádu - například třetího je nutné volbou poloměru jednotlivých kružnicových proudovodičů a jimi protékajících proudů vykompenzovat všechny složky nižších řádů než třetího a pokud je to možné i některé nejbližší složky vyšších řádů. Tato kompenzace je u obvodů s feromagnetikem pracná a nepřesná zejména pro základní složku a složky nejnižších řádů. Sektorové složky naproti tomu nejsou rotačně symetrické, mají však počet os symetrie rovný řádu; například sektorová složka třetího řádu 999 na obr. 1 má tři osy symetrie. Realizovat uvedenou složku lze korekčním vinutím například podle obr. 1, jehož obrazec jedné sekce A nebo B má při uvážení směru proudu I stejný počet os symetrie - ve zvoleném příkladu jsou to tři osy 1_s, 2_s, 3_s. Korekční vinutí nevytváří principiálně složky nižší než vybraného řádu, vytvoří však mimo požadovanou sektorovou složku i tesserální složky vyšších řádů - v daném případě tedy neexistuje složka prvního řádu, vytváří se žádaná složka třetího řádu a parazitní složky pátého, sedmého a dalších lichých řádů, z nichž nejbližší lze relativně přesně kompenzovat, protože přítomnost feromagnetika na ně nemá podstatný vliv. Složitost návrhu korekčního systému roste s počtem kompenzovaných složek. Při kompenzaci například dvou složek u korekčního vinutí pro zonální složku třetího řádu je nutné kompenzovat složku prvního a pátého řádu, u vinutí podle předkládaného vynálezu však složky pátého a sedmého řádu. Je zřejmé, že v druhém z uvedených případů je rozsah působnosti korekčního vinutí větší nebo je návrh vinutí jednodušší, dostává-li kompenzace do pátého řádu včetně. Obrazců, které mají včetně směru proudu stanovený počet os symetrie, je nesčetné množství; pro tři osy jsou některé z nich uvedeny na obr. 2 až 7. Volba určitého obrazce a jeho motivu souvisí jednak s tvarem korigovaného pole, s velikostí nežádoucích tesserálních složek vlastního korekčního vinutí a konečně s jeho návrhem a možnostmi realizace. Přívod a spojky naznačené na některých obrazcích, jako například p, q a p₁, q₁ na obr. 2 mají být co nejbližší u sebe a mají jimi protékat proudy v opačných směrech, aby se vzájemně rušila jimi vytvářená magnetická pole. Pokud to nelze splnit, mají spojky mezi jednotlivými částmi sekce vytvářet rovněž symetrický obrazec, jako například r₁, r₂, r₃, r₄, r₅, r₆ na obr. 2, nebo být tak vzdálené od středu S, aby podstatně neovlivňovaly magnetické pole v počátku O souřadného systému z obr. 1 a v jeho blízkém okolí. Korekční vinutí lze vytvořit jednak drátem o vhodném průměru, zejména však aplikací techniky dvou- i vícevrstevných tištěných spojů; drátové a tištěné vinutí lze rovněž kombinovat.

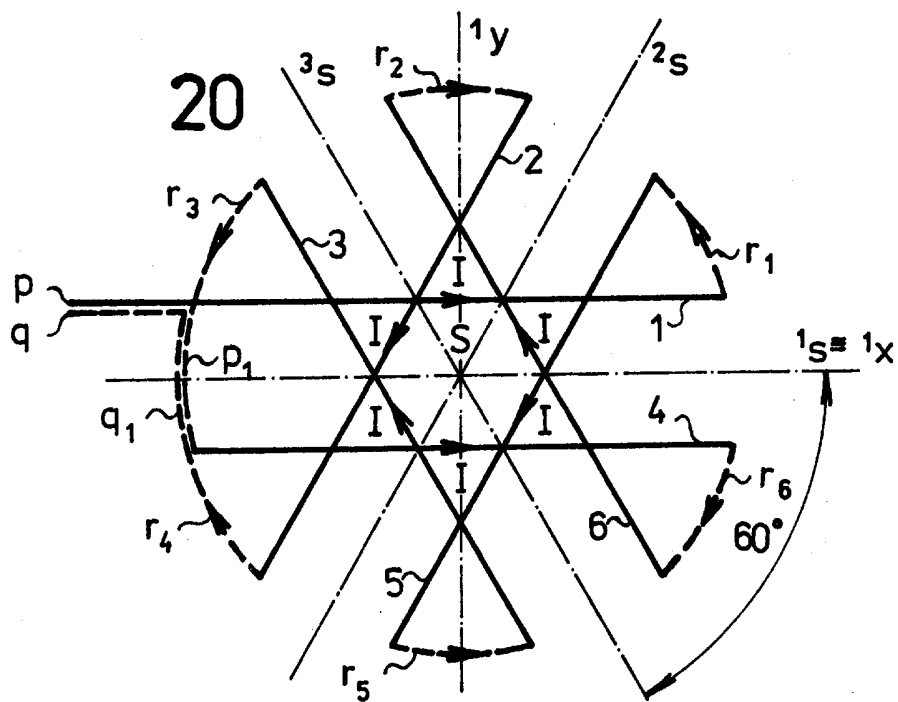
PŘEDMĚT VYNÁLEZU

Korekční vinutí pro vybranou složku nehomogenity základního polarizačního stejnosměrného magnetického pole magnetu spektrometru nukleární magnetické rezonance sestávající ze dvou sekcí, vytvořených funkčními vodiči, vyznačené tím, že obě sekce /A, B/ jsou zrcadlově identické a každá z nich je dělitelná na $2n$ totožných skupin vodičů /1. až 6/, přičemž sousední skupiny jsou propojeny vůči sobě v opačném smyslu a jsou vůči sobě pootočený o úhel $180^\circ/n$, kde n je řád vybrané složky.

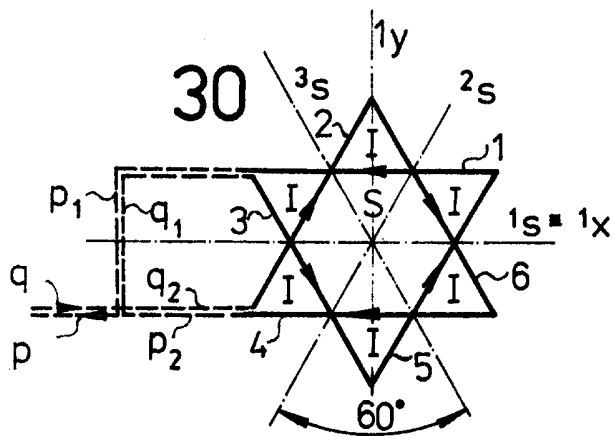
11 výkresů



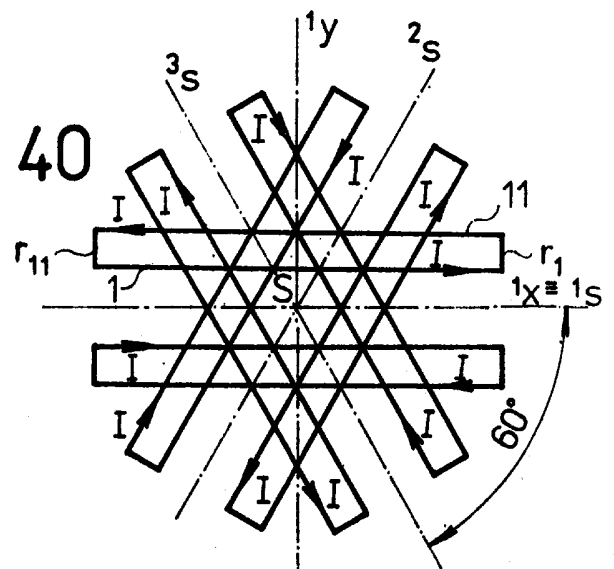
Obr. 1



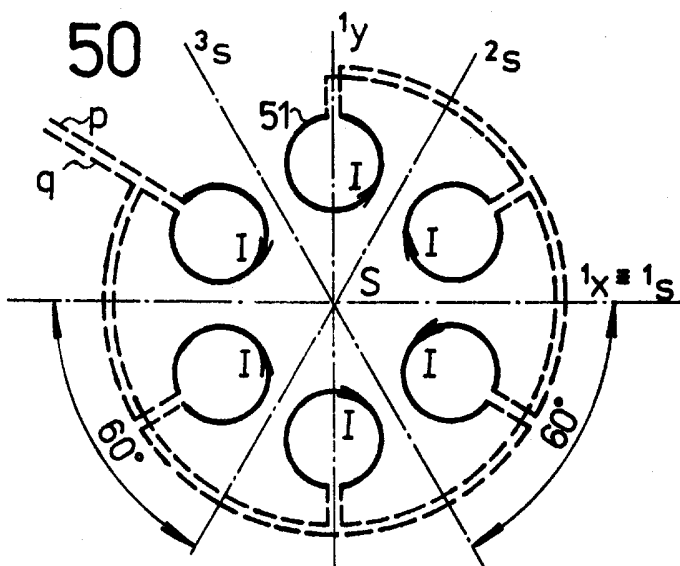
Obr. 2



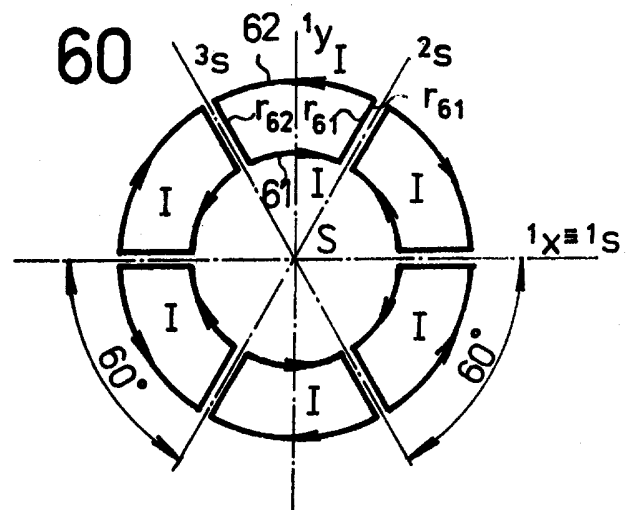
Obr. 3



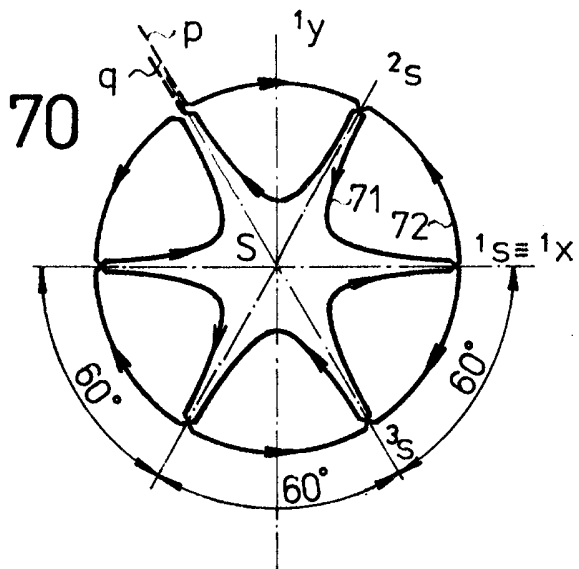
Obr. 4



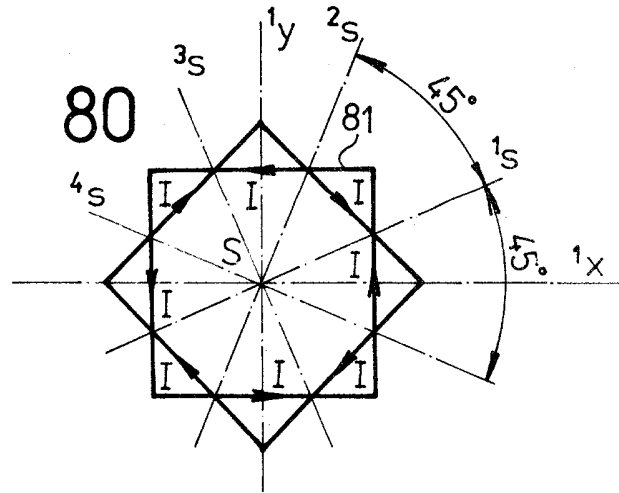
Obr. 5



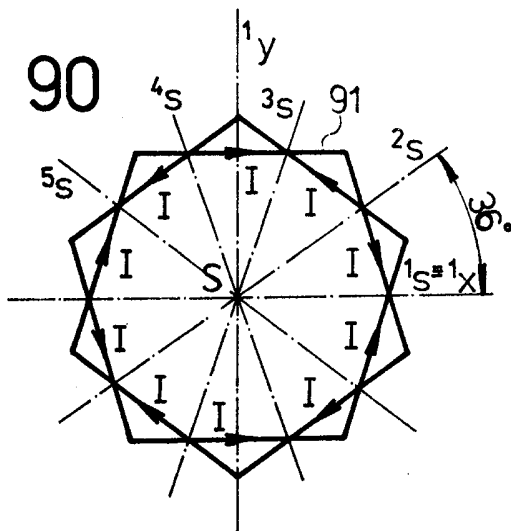
Obr. 6



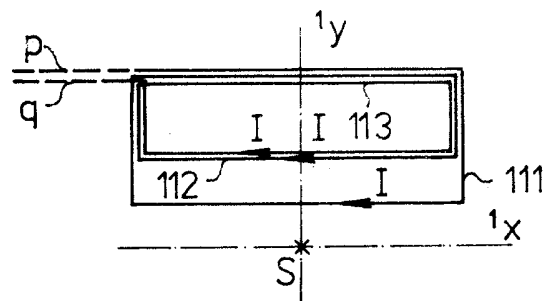
Obr. 7



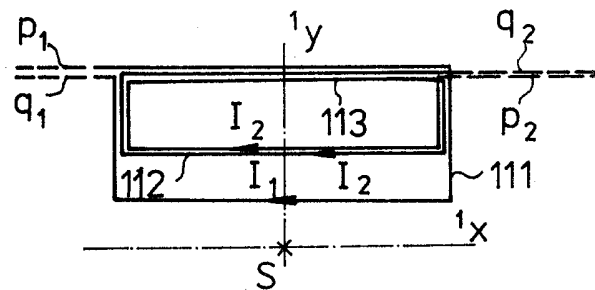
Obr. 8



Obr. 9



Obr. 10



Obr. 11