

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 246814 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **443015**

(22) Data zgłoszenia: **2022.12.01**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2024.06.03 BUP 23/2024**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.03.10 WUP 10/2025**

(51) MKP:

A61N 2/02 (2006.01)

- | |
|--|
| <p>(73) Uprawniony z patentu:
UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU, Poznań, PL</p> <p>(72) Twórca(-y) wynalazku:
ANDRZEJ SKUMIEL, Poznań, PL</p> <p>(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Joanna Matkowska-Peszko,
Poznań, PL</p> |
|--|

(54) Tytuł:

**Urządzenie generujące rotujące pole magnetyczne w układzie 3-fazowym z cewkami
Gramme na torusie ferrytowym**

PL 246814 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie do generacji rotującego pola magnetycznego w układzie 3-fazowym z cewkami Gramme na torusie ferrytowym przeciwnie nawiniętymi na rdzeniu ferrytowym w kształcie torusa, mające zastosowanie w onkologii jako wspomagająca terapia przy radio- lub chemioterapii.

Sposób niezgodnego nawinięcia cewek na rdzeniu podał Gramme, Thompson, Sylvanus P. *Dynamo-electric machinery: a manual for students of electrotechnics*. London: E. & F.N. Spon. p. 140, (1888) już w drugiej połowie XIX wieku przy konstrukcji maszyn elektrycznych.

Ze względu na opracowanie sprawniejszych wkrótce rozwiązań cewki Gramme nie znalazły jednak szerszych zastosowań przy budowie prądnic i silników. Obecnie mogą jednak zostać wykorzystane do konstrukcji generatorów rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości.

Jak wynika z prac teoretycznych Yu. L. Raikher, V. I. Stepanov, *Power losses in a suspension of magnetic dipoles under a rotating field*, PHYSICAL REVIEW E83, 021401 (2011), a także z kilku ostatnio opublikowanych prac doświadczalnych M. Beković, M. Trlep, J. Mesenik, A. Hamler, *A comparison of the heating effect of magnetic fluid between the alternating and rotating magnetic field*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2014), 355, 7–12, A. Skumiel, *A new way to generate a rotating magnetic field in the high frequency range*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 541 (2022) 168529. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168529>, R. Wojciechowski, A. Skumiel, M. Kurzawa, A. Demenko, *Design, application and investigation of the system for generation of fast changing, rotating magnetic field causing hyperthermic effect in magnetic liquids*, Measurement 194 (2022), 111020, DOI:10.1016/j.measurement.2022.111029 oraz A. Skumiel, *Generation of a rotating high frequency magnetic field designed for use in magnetic hyperthermia*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 553, 2022, efekt kalorymetryczny z udziałem nanocząstek magnetycznych umieszczonych w rotującym polu magnetycznym wykazuje znacznie silniejsze działanie cieplne niż w 1-osiowym oscylującym polu. Zaletą ta może zostać wykorzystana w zabiegach magnetycznej hipertermii przy zwalczaniu komórek nowotworowych. Okazuje się bowiem, że komórki onkologiczne mają mniejszą odporność na przegrzanie niż zdrowe, co jest wykorzystywane do ich niszczenia przez podgrzanie polem magnetycznym wysokiej częstotliwości. W praktyce w zabiegach leczniczych stosuje się najczęściej częstotliwość w zakresie od 100 kHz do 1 MHz i o amplitudzie natężenia pola magnetycznego kilku kA/m zgodnie z kryterium Brezovicha Brezovich, I.A. *Low Frequency Hyperthermia: Capacitive and Ferromagnetic Thermoseed Methods*. Med. Phys. Monogr. 1988, 16, 82–110.

Pole magnetyczne wysokiej częstotliwości działając na nanocząstki umieszczone w okolicy guza uwalnia ciepło powodując wzrost temperatury do około 42–44°C.

Istotą wynalazku jest urządzenie do generacji rotującego pola magnetycznego, które składa się z kondensatorów równolegle dołączonych do trzech par cewek nawiniętych na pierścieniowym rdzeniu ferrytowym przy czym linie sił pola magnetycznego generowane przez cewki każdej pary są wzajemnie przeciwnie skierowane, w wyniku czego ich strumienie sumują się i płyną przez środkową, powietrzną część torusa, a dodatkowo do tych obwodów równoległych dołączone są szeregowo połączone cewki z kondensatorami, które zasilane są z zespołów przełączników wytwarzających przebiegi prostokątne, sterowane sygnałami z bloku sterowania i zasilane ze źródła napięcia stałego.

Korzystnym jest, gdy cewki z dołączonymi do nich równolegle kondensatorami oraz cewki połączone szeregowo z kondensatorami różnią się do 1%.

Korzystnym jest również, gdy prostokątne sygnały sterujące A, B i C wychodzące z bloku sterowania posiadają przesunięte wzajemnie fazy o 120°.

Dzięki zastosowaniu rozwiązania według wynalazku uzyskano następujące efekty techniczno-użytkowe:

- możliwość zastosowania urządzenia w zabiegach magnetycznej hipertermii,
- uproszczona konfiguracja obwodu magnetycznego zbudowanego na zamkniętym pierścieniu ferrytowym,
- niższe koszty i niezawodność działania urządzenia,
- dobre parametry rotującego pola magnetycznego,
- większe o 50% natężenie pola magnetycznego, niż w układzie 1-fazowym.

Wynalazek w przykładowym ale nie ograniczającym wykonaniu został zilustrowany na rysunkach, gdzie fig. 1 przedstawia schemat blokowy działania urządzenia do generacji rotującego pola magnetycznego z trzema parami cewek (2, 2', 2'') nawiniętych na rdzeniu pierścieniowym (1) w kierunkach

przeciwnych, połączonych równolegle z kondensatorami (3, 3', 3'') wraz z obwodami dostarczającymi do nich trzech sinusoidalnych przebiegów napięciowych o wzajemnie przesuniętych fazach o 120° . W proponowanym rozwiązaniu przebiegi sinusoidalne uzyskano z układu elektronicznego zasilanego ze źródła napięciowego (9) prądu stałego (DC) skąd poprzez przełączniki (6, 6', 6'') sygnały prostokątne są filtrowane przez szeregowe połączenie cewek (4, 4', 4'') i kondensatorów (5, 5', 5''). Kondensatory (3, 3', 3'') połączone równolegle do układu magnetycznego poprawiają selektywność i zmniejszają pobór prądu przez układ równoległy.

Fig. 2 przedstawia poglądowe usytuowanie jednej z par cewek oraz strumienie magnetyczne wytworzone przez cewki tej pary płynące w rdzeniu, które dodają się i dalej płyną przez obszar środkowy rdzenia ferrytowego (w powietrzu).

Fig. 3a ilustruje czasowo-fazowe sygnały chwilowe prądów magnesujących, które zasilają poszczególne pary cewek.

Fig. 3b przedstawia położenie w przestrzeni strumienia ϕ_A wraz z pozostałymi strumieniami ϕ_B i ϕ_C oraz z ich składowymi rzutowanymi na kierunek strumienia ϕ_A .

Strumień ϕ_A dla kąta fazowego równego 90° jest 2-krotnie większy, niż każdy z pozostałych strumieni ϕ_B i ϕ_C . Oznacza to, że strumień magnetyczny ϕ_A wytworzony przez cewki obwodu A i składowe ϕ_B i ϕ_C strumieni obwodów B i C tworzą wypadkową wartość strumienia rotującego pola, która jest 1,5-krotnie większa niż sam strumień ϕ_A .

W tym przypadku wszystkie wektory należy sumować geometrycznie.

Zachodzi tutaj dość dobra zgodność zarówno przewidywań teoretycznych, jak i z wynikami eksperymentalnymi, gdy porównamy działanie RMF z AMF.

Fig. 4 przedstawia prostokątne przebiegi uzyskane na wejściu szeregowej gałęzi złożonej z cewek (4, 4', 4'') i kondensatorów (5, 5', 5'').

Urządzenie do generacji rotującego pola magnetycznego, składa się z trzech par cewek 2, 2', 2'' nawiniętych na pierścieniowym rdzeniu ferrytowym 1, przy czym linie sił pola magnetycznego generowane przez cewki każdej pary są wzajemnie przeciwnie skierowane, w wyniku czego ich strumienie sumują się i przebiegają również przez środkową, powietrzną część torusa 7. Cewki 2, 2', 2'' wraz z dołączonymi do nich kondensatorami 3, 3', 3'' tworzą równoległe obwody rezonansowe, które poprzez szeregowo połączone cewki 4, 4', 4'' i kondensatorów 5, 5', 5'' są zasilane poprzez zespoły przełączników 6, 6', 6'' wytwarzających przebiegi prostokątne, sterowane z bloku sterowania 8 i zasilane ze źródła napięcia stałego 9. Indukcyjności cewek 2, 2', 2'' oraz połączone z nimi równoległe pojemności kondensatorów 3, 3', 3'' różnią się do 1%, podobnie jak indukcyjności cewek 4, 4', 4'' oraz połączone z nimi szeregowo pojemności kondensatorów (5, 5', 5'') różnią się do 1%. Indukcyjności cewek 4, 4', 4'' obwodów szeregowych nie są ze sobą sprzężone magnetycznie. Sygnały sterujące A, B i C wychodzące z bloku sterowania 8 posiadają przesunięte wzajemnie fazy o 120° .

Działanie urządzenia do generacji rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości jest przedstawione na Fig. 1. W urządzeniu tym zastosowano trzy pary cewek magnetycznych obwodów A, B i C nawiniętych w naprzeciwległych częściach łuku pierścienia ferrytowego 1. Każda z par cewek 2, 2' i 2'' posiada identyczną liczbę zwojów n , a strumienie magnetyczne każdej pary płynące przez rdzeń są skierowane w przeciwnych kierunkach. Wszystkie cewki wykazują taką samą indukcyjność własną L .

Dzięki przeciwsobnemu nawinięciu cewek na rdzeniu ferrytowym wypadkowa indukcyjność każdej pary wynosi

$$L_{ef} = 2(L - M),$$

gdzie $M = k \cdot L$, jest indukcyjnością wzajemną między dwiema cewkami każdej pary, a parametr k jest współczynnikiem sprzężenia magnetycznego przeciwnych cewek.

Rotujące pole magnetyczne jest wytwarzane w środkowym obszarze 7 torusa ferromagnetycznego.

Na Fig. 2 przedstawiono poglądowo usytuowanie jednej z par cewek, które połączono szeregowo, a ich wypadkowy strumień płynie przez część środkową rdzenia (7).

Jeśli wyobrazimy sobie, że na tym samym rdzeniu nawinięte są dwie pozostałe pary cewek odpowiednio przesunięte w przestrzeni oraz, że przepływają przez nie prądy sinusoidalne z wzajemnie przesuniętymi fazami, to w efekcie w tym obszarze powstanie rotujące pole magnetyczne będące superpozycją trzech składowych strumieni.

W przypadku zastosowania trzech par cewek należy wymusić w nich przepływy prądów, których czasowo-fazowe przebiegi są zobrazowane na Fig. 3a.

Oznacza to, że przesunięcie fazy między sygnałami wynosi 120 stopni kątowych. Chwilowe wartości prądów magnesujących w poszczególnych parach cewek opisane są wzorem:

$$i_A(t) = I_0 \sin(\omega t), \quad i_B(t) = I_0 \sin(\omega t \pm 120^\circ) \quad \text{ i } \quad i_C(t) = I_0 \sin(\omega t \pm 240^\circ)$$

W proponowanym rozwiązaniu zastosowano dodatkowo trzy kondensatory 3, 3' i 3'' połączone równolegle z cewkami 2, 2' i 2'' nawiniętymi na rdzeniu. Wówczas obwody złożone z równolegle połączonych cewek i kondensatorów wykazują bardzo dużą impedancję przy częstotliwości rezonansowej, co jest korzystne z punktu widzenia wzmacniaczy obciążonych takimi obwodami.

Ponadto zastosowano trzy gałęzie złożone z szeregowo połączonych cewek 4, 4' i 4'' oraz kondensatorów 5, 5' i 5'', które stanowią filtr pasmowo-przepustowy. Dzięki temu układ ten można zasilac sygnałami prostokątnymi o przebiegach pokazanych na Fig. 4, a mimo to na cewkach torusa uzyskamy sygnały sinusoidalne. Układ przedstawiony na fig. 1 jest zasilany z źródła 9 dostarczającego napięcie stałe DC, którym może być akumulator lub prądnica stałoprądowa.

Pomiędzy gałęziami szeregowymi zawierającymi cewki 4, 4' i 4'' i kondensatory 5, 5' i 5'' oraz między źródłem zasilania 9 znajdują się przełączniki 6, 6' i 6'' sterowane układem sterującym 8.

Z prawa Biota i Savarta wynika, siła magnetomotoryczna $2nI_A$ pochodząca tylko od prądu w cewce obwodu A wynosi:

$$2n \cdot I_A = H_{air} \cdot l_{air} + H_f \cdot l_f.$$

gdzie H_{air} i H_f to amplitudy natężenia pola magnetycznego w części powietrznej i w ferrytowym torusie, a l_{air} i l_f to długości linii strumienia w części powietrznej i w torusie.

Ze względu na fakt, że współczynnik względnej przenikalności magnetycznej $\mu_{r,f}$ dla elementów ferrytowych jest w przybliżeniu trzy rzędy większy, niż dla powietrza $\mu_{r,air}$ dostajemy

$$2n \cdot I_A \cong H_{air} \cdot l_{air},$$

więc wartość amplitudy natężenia pola magnetycznego w części powietrznej torusa magnetycznego pochodząca tylko od prądu w cewce obwodu A wynosi:

$$H_A \cong \frac{2nI_A}{l_{air}},$$

gdzie I_A to amplituda prądu uzwojenia w obwodzie A.

W momencie, gdy prąd w obwodzie A osiąga maksymalną wartość, to w tym czasie chwilowe wartości prądów I_B i I_C są o połowę mniejsze i skierowane w przeciwnym kierunku niż wektor A. Sytuacja taka pokazana jest na fig. 3a i 3b.

W efekcie wypadkowa amplituda natężenia rotującego pola magnetycznego pochodząca od wszystkich strumieni magnetycznych jest o 50% większa, niż wartość w poprzednim wzorze (przy włączonej tylko jednej fazie) i wynosi:

$$H = \frac{3nI}{l_{air}},$$

gdzie I jest amplitudą natężenia prądu płynącego w każdej z faz.

Przyjmując przykładowo wartości liczbowe: $n = 10$, $I = 50$ A, $l_{air} = 0,05$ m otrzymujemy oszacowaną wartość amplitudy natężenia pola magnetycznego wytworzoną przez wszystkie obwody A, B i C w części środkowej obszaru 7 torusa ferromagnetycznego jako $H = 30$ kA \cdot m⁻¹.

Ponieważ efekt kalorymetryczny w zjawisku magnetycznej hipertermii jest proporcjonalny do kwadratu amplitudy natężenia pola magnetycznego (Rosensweig, R.E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252, 370–374) to uzyskana moc cieplna w 3-fazowym urządzeniu jest około 2-krotnie większa niż w 1-fazowym układzie.

Zastrzeżenia patentowe

1. Urządzenie do generacji rotującego pola magnetycznego, **znamiennie tym**, że składa się z kondensatorów (3, 3', 3'') równolegle dołączonych do trzech par cewek (2, 2', 2'') nawiniętych na pierścieniowym rdzeniu ferrytowym (1) przy czym linie sił pola magnetycznego generowane przez cewki każdej pary (2, 2', 2'') są wzajemnie przeciwnie skierowane, w wyniku czego ich strumienie sumują się i płyną przez środkową, powietrzną część torusa (7), a dodatkowo do tych obwodów równoległych dołączone są szeregowo połączone cewki (4, 4', 4'') z kondensatorami (5, 5', 5''), które zasilane są z zespołów przełączników (6, 6', 6'') wytwarzających przebiegi prostokątne, sterowane sygnałami z bloku sterowania (8) i zasilane ze źródła napięcia stałego (9).
2. Urządzenie według zastrz. 1 **znamiennie tym**, że: cewki (2, 2', 2'') z dołączonymi do nich równolegle kondensatorami (3, 3', 3'') oraz cewki (4, 4', 4'') połączone szeregowo z kondensatorami (5, 5', 5'') różnią się do 1%.
3. Urządzenie według zastrz. 1 **znamiennie tym**, że prostokątne sygnały sterujące A, B i C wychodzące z bloku sterowania (8) posiadają przesunięte wzajemnie fazy o 120° .

Rysunki

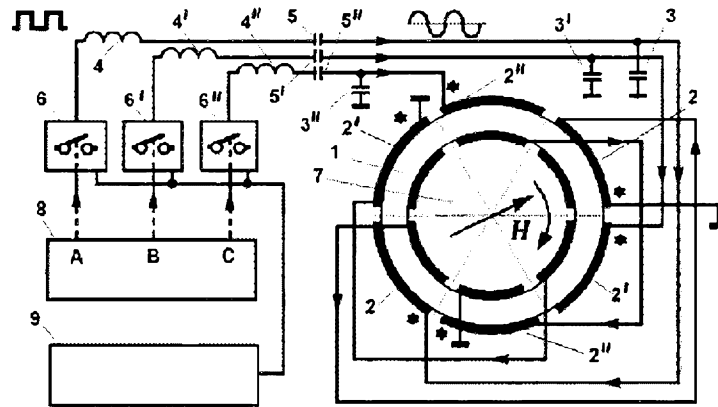


Fig. 1

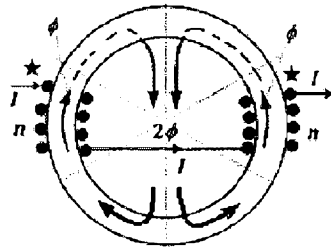


Fig. 2

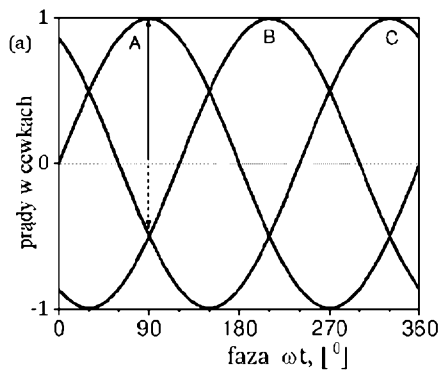


fig. 3a

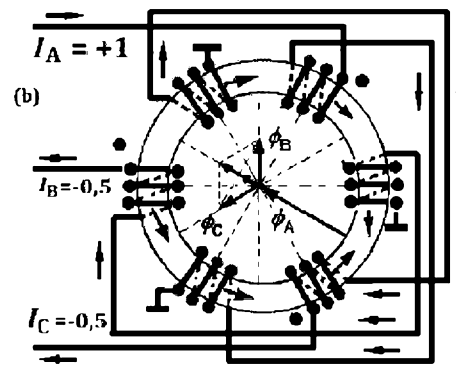


fig. 3 b

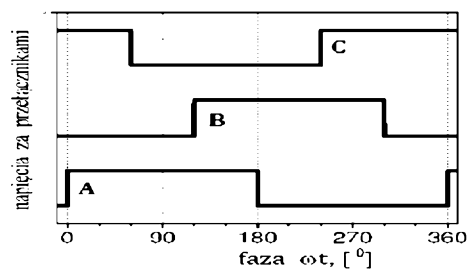


Fig. 4