

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10)

PL 246946 B1

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **441873**

(22) Data zgłoszenia: **2022.07.29**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2024.02.05 BUP 06/2024**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2025.04.07 WUP 14/2025**

(51) MKP:

A61N 2/02 (2006.01)

A61N 2/04 (2006.01)

H01F 27/24 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:
**UNIWERSYTET IM. ADAMA MICKIEWICZA
W POZNANIU, Poznań, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:
ANDRZEJ SKUMIEL, Poznań, PL

(74) Pełnomocnik:
**rzecz. pat. Joanna Matkowska-Peszko,
Kłodawa, PL**

(54) Tytuł:

Urządzenie do generacji rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości z dwiema parami cewek przeciwsobnie nawiniętych na zamkniętym rdzeniu ferrytowym

PL 246946 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie do generacji rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości z dwiema parami cewek przeciwsośnie nawiniętych na zamkniętym rdzeniu ferrytowym, mające zastosowanie w onkologii jako wspomagająca terapia przy radio- lub chemioterapii.

Znane są rozwiązania wykorzystujące pola magnetyczne w radio- lub chemioterapii [1] Q A Panthurst, Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine, JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, 36 (2003) R167-R181, [2] A. Halbreich, et al, Biomedical applications of maghemite ferrofluid, Biochimie, (1998) 80, 579–390, [3] I.A. Brezovich, Med. Phys. Monogr. 16 (1988), 82, [4] C.C. Berry et al., Functionalisation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine, JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, 36 (2003) R198–R206, [5] S. Dutz, Magnetic particle hyperthermia – a promising tumor therapy? Nanotechnology 25, (2014) 452001 (28pp).

Działanie szybkozmiennego pola magnetycznego na nanocząstki magnetyczne prowadzi do wydzielania energii cieplnej w rejonie guza nowotworowego, w którym te nanocząstki zostały uprzednio wprowadzone – jest to tzw. magnetyczna hipertermia. W tym przypadku wzrost temperatury do $(42 \div 44)^{\circ}\text{C}$ skutkuje zniszczeniem komórek nowotworowych, które są mniej odporne na przegrzanie, niż zdrowe komórki. Dodatkowo w oparciu o ten wynalazek można zbudować aparaturę naukową do badań efektu kolorymetrycznego w materiałach z nanocząstkami magnetycznymi, jak również w procesach technologicznych przy nagrzewaniu indukcyjnym metali.

Teoretyczne podstawy opisujące wpływ pulsującego i rotującego pola magnetycznego na magnetyczne nanocząstki zawarte są w literaturze: [6] R.E. Rosensweig, Heating magnetic fluid with alternating magnetic field, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 252, (2002) 370–374, [7] YU. L. RAIKHER, V. I. STEPANOV, Power losses in a suspension of magnetic dipoles under a rotating field, PHYSICAL REVIEW E 83, 021401 (2011).

Pierwsze dokładne opisy budowy urządzeń do generacji rotującego pola magnetycznego podano w pracach: [8] M. Beković, M. Trbusic, M. Trlep, M. Jesenik, A. Hamler, Magnetic fluids' heating power exposed to a high-frequency rotating magnetic field, Adv. Mater. Sci. Eng. (2018) 1–7. [9] 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, 355 (2014) 7–12, gdzie użyto dwie pary cewek powietrznych. Uzyskano tutaj amplitudę natężenia pola magnetycznego do 4,1 kA/m przy częstotliwości 130 kHz i 1 kA/m przy częstotliwości 779 kHz.

W ostatnim czasie pojawiły się kolejne rozwiązania: [10] 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, [11] 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, [12] A. Skumiel, Generation of a rotating high frequency magnetic field designed for use in magnetic hyperthermia, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 553, 1 July 2022, 169294, [13] A. Skumiel, P. Kopcansky, M. Timko, M. Molcan, K. Paulovicova, R. Wojciechowski, The influence of a rotating magnetic field on the thermal effect in magnetic fluid, International Journal of Thermal Sciences, 171 (2022) 107258, [14] A. Skumiel, Influence of high frequency rotating magnetic field on the effect of heating magnetic fluid, International Journal of Physics Research and Applications, (2021) DOI:10.29328/journal.ijpra.1001035, gdzie zastosowano dodatkowo ferrytowe rdzenie, dzięki którym udało się osiągnąć znacznie większe wartości amplitud do 20 kA/m. Obecne opracowanie pozwoli uzyskać również bardzo duże wartości natężenia rotującego pola magnetycznego.

Znane jest rozwiązanie z 2-fazowym układem opisane w D1 PL435411 A1, w którym użyto dwa obwody magnetyczne i dwa filtry pasmowo-przepustowe, a układ może być zasilany zarówno sygnałami sinusoidalnymi, jak i symetrycznym przebiegiem prostokątnym. W każdym obwodzie tego urządzenia dwie cewki magnesujące każdej fazy (połączone równolegle z kondensatorem) były nawinięte zgodnie, gdzie ich wypadkowy strumień zwiększał się.

W urządzeniu wg wynalazku zastosowano dwie pary cewek przeciwsośnie nawiniętych na zamkniętym rdzeniu ferrytowym. Oznacza to, że wypadkowa indukcyjność pary A (L_{A1} i L_{A2}) i pary B (L_{B1} i L_{B2}) jest znacznie mniejsza niż przy zgodnym nawinięciu. Dodatkową zaletą takiego sposobu połączenia cewek jest łatwość uzyskania wyższych częstotliwości pracy, która zależy również od pojemności elektrycznej dołączonego równolegle kondensatora.

Istotą wynalazku jest urządzenie do generowania rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości zawierające cewki, kondensatory, rdzenie ferrytowe zamkniętego obwodu magnetycznego, charakteryzujące się tym, że zawiera dwie pary cewek nawinięte przeciwsobnie na rdzeniach ferrytowych 3 tworzących zamknięty obwód magnetyczny tak, by linie sił pola magnetycznego przenikały przez środkową, powietrzną część układu, przy czym cewki uzwojeń połączone z kondensatorami tworzą równoległe obwody drgające o zbliżonych częstotliwościach z dokładnością do 1%, które zasilane są z szerokopasmowych wzmacniaczy mocy, sterowanych przez 2-kanalowy generator dostarczający dwa sinusoidalne przebiegi o wzajemnie przesuniętych fazach o $\pi/2$ radiana.

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

- uproszczona konfiguracja obwodu magnetycznego zbudowanego na zamkniętym rdzeniu ferrytowym, mająca wpływ na niższy koszt urządzenia,
- niezawodność działania urządzenia,
- dobre parametry rotującego pola magnetycznego (wysoka częstotliwość i duża amplituda natężenia pola magnetycznego, dobra jednorodność pola),
- zastosowanie równoległych obwodów LC (w przypadku wystąpienia rezonansu prądów) pozwala zastosować wzmacniacze mocy o znacznie mniejszej wydajności prądowej, co również obniża koszt całego urządzenia,
- możliwość zastosowania np. magnetycznej hipertermii,
- uzyskanie rezonansu w zakresie wyższych częstotliwości poprzez zastosowanie przeciwsobnie nawiniętych cewek magnesujących gdzie mniejsza jest ich wypadkowa indukcyjność.

Wynalazek w przykładowym ale w nieograniczającym wykonaniu został uwidoczniiony na rysunkach, gdzie fig. 1 przedstawia zasadę generacji rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości z zamkniętym obwodem magnetycznym i z dwiema parami cewek połączonych przeciwsobnie, w momentach:

- (a) – gdy chwilowa wartość prądu magnesującego osiąga maksimum w obwodzie A oraz
- (b) – gdy chwilowa wartość prądu magnesującego osiąga maksimum w obwodzie B.

Fig. 2 przedstawia układ generatora rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości wraz z systemem zasilania przez dwa wzmacniacze mocy sterowane sygnałami sinusoidalnymi przesuniętymi w fazie o 90° .

Urządzenie do generowania rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości zawiera dwie pary cewek 1 oraz 2 nawiniętych na rdzeniach ferrytowych 3 tworzących zamknięty obwód magnetyczny w taki sposób, aby linie sił pola magnetycznego przenikały przez środkową, powietrzną część układu 4.

Cewki uzwojeń 1 i 2 wraz z dołączonymi do nich kondensatorami 5 tworzą równoległe obwody drgające o zbliżonych częstotliwościach z dokładnością nie przekraczającą 1%, przy czym ich zasilanie odbywa się z szerokopasmowych wzmacniaczy mocy 6, sterowanych przez 2-kanalowy generator 7 dostarczający dwa sinusoidalne przebiegi o wzajemnie przesuniętych fazach o $(\pi/2)$ radiana.

Zastosowanie dwóch par cewek 1 i 2 połączonych w taki sposób, że wytworzone przezeń strumienie magnetyczne mają przeciwne kierunki (przeciwsobne) powoduje, że wypadkowa indukcyjność każdej z par jest znacznie mniejsza, niż gdyby te strumienie dodawały się wzdłuż długości rdzenia ferrytowego (zamkniętej drogi magnetycznej). Dzięki temu w połączeniu z dodatkowymi kondensatorami elektrycznymi 5 jest możliwość stosunkowo łatwego uzyskania wysokiej częstotliwości drgań rezonansowych takiego obwodu.

Zastosowanie dwóch par cewek 1 i 2 nawiniętych przeciwsobnie na zamkniętym rdzeniu ferrytowym 3 i wymuszeniu przepływu w tych cewkach prądów, przesuniętych wzajemnie o kąt fazowy $\phi = 90^\circ$ powoduje, że wytworzone strumienie magnetyczne przez te cewki również są przesunięte o kąt fazowy 90° . Superpozycja obu składowych daje wypadkowy, rotujący w przestrzeni strumień magnetyczny o stałej amplitudzie.

W urządzeniu na fig. 1 zastosowano dwie pary cewek 1 i 2 nawiniętych na przeciwległych ferrytowych sztabkach obwodu magnetycznego. Zarówno jedna para cewek (L_{A1} i L_{A2}) oraz druga para (L_{B1} i L_{B2}) są nawinięte w taki sposób, że ich indukcyjności wypadkowe wynoszą:

$$L_A = L_{A1} + L_{A2} - 2M_A \quad \text{oraz} \quad L_B = L_{B1} + L_{B2} - 2M_B . \quad (1)$$

Jeśli np. cewka L_{A1} wytwarza w rdzeniu strumień płynący w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, to strumień wytworzony przez cewkę L_{A2} płynie w kierunku przeciwnym. Cewki 1 i 2 są

zatem nawinięte przeciwsobnie, czyli strumienie magnetyczne wywołane przepływem prądu płynącego przez L_{A1} i przez L_{A2} dopływają do węzłów znajdujących się w środkach sztabek ferrytu, na których nawinięto uzwojenia L_{B1} i L_{B2} . Ponieważ linie pola magnetycznego tworzą obwód zamknięty, przeto fragment tych linii przechodzi przez wewnętrzną, powietrzną część obwodu magnetycznego. Do zacisków A i B doprowadzone są dwa sygnały prądowe o tej samej amplitudzie i częstotliwości, których różnica faz $\Delta\phi = \pm 90^\circ$:

$$i_A(t) = I_0 \sin(\omega t) \quad \text{ i } \quad i_B(t) = I_0 \sin(\omega t \pm 90^\circ). \quad (2)$$

Oznacza to, że w momencie czasowym $t = 0$, prąd i_B w obwodzie B osiąga maksimum, a prąd $i_A = 0$. Z kolei dla fazy $\phi = 90^\circ$ (czyli po czasie $t = T/4$) prąd $i_B = 0$ natomiast prąd i_A osiąga maksimum. Znak $\pm$ występujący w równaniu (2) oznacza, że pole magnetyczne może wirować w prawo, lub w lewo.

Z prawa Biota i Savarta zapisanego dla tych linii wynika, że:

$$2n \cdot I = H_{air} \cdot l_{air} + H_f \cdot l_f. \quad (3)$$

Ponieważ współczynnik względnej przenikalności magnetycznej $\mu_{r,f}$ dla elementów ferrytowych jest w przybliżeniu trzy rzędy większy niż dla powietrza $\mu_{r,air}$ nierówność: $H_{air} \cdot l_{air} \gg H_f \cdot l_f$ prowadzi do równania: $2n \cdot I \cong H_{air} \cdot l_{air}$ a stąd uzyskuje się wzór na wartość amplitudy natężenia pola magnetycznego we wnętrzu zamkniętego układu magnetycznego:

$$H_{air} \cong \frac{2nI}{l_{air}}, \quad (4)$$

gdzie n to liczba uzwojeń na każdej ze sztabek ferrytowych, I to amplituda prądu płynącego przez uzwojenia, l_{air} to długość linii pola magnetycznego w powietrzu.

Przyjmując dla przykładu wartości liczbowe parametrów: $n = 7$, $I = 50A$, $l_{air} = 0,035$ m otrzymujemy oszacowaną wartość amplitudy natężenia pola magnetycznego $H = 2 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$.

W praktyce korzystna jest sytuacja, aby obie pary cewek tworzyły z dołączonymi doń kondensatorami elektrycznymi 5 równoległe obwody rezonansu prądowego o takiej samej częstotliwości ($f_A = f_B$). W takim razie prądy zasilające oba te obwody A i B są równe i z uwagi na symetrię obwodów ich strumienie magnetyczne również są równe $\phi_A = \phi_B$.

Dostrojenie obwodów drgających do jednakowej częstotliwości rezonansowej należy przeprowadzić z dokładnością lepszą niż 1%.

Jednocześnie w rezonansie prądowym układ taki charakteryzuje się znacznie mniejszymi prądami pobieranymi z wzmacniaczy mocy w porównaniu z prądami magnesującymi płynącymi przez pary cewek L_A i L_B . Jest to bardzo korzystna sytuacja, gdyż stosowane wzmacniacze mocy mogą mieć mniejsze wydajności prądowe, co wiąże się z niższymi kosztami.

W zależności od współczynnika dobroci elementów tworzących obwód rezonansowy prądy magnesujące – płynące przez cewki L_A i L_B – są (40 ÷ 80) razy większe, niż prądy pobierane z obu wzmacniaczy mocy.

Na fig. 2 przedstawiono układ generatora rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości zawierający obwód magnetyczny oraz system zasilania z dwoma wzmacniaczami mocy 6, które są sterowane sygnałami sinusoidalnymi przesuniętymi w fazie o 90° .

Zastrzeżenie patentowe

1. Urządzenie do generowania rotującego pola magnetycznego wysokiej częstotliwości zawierające cewki, kondensatory, rdzenie ferrytowe zamkniętego obwodu magnetycznego, **znamiennie tym**, że zawiera dwie pary cewek (1) i (2) nawinięte przeciwsobnie na rdzeniach ferrytowych (3) tworzących zamknięty obwód magnetyczny tak, by linie sił pola magnetycznego przenikały przez środkową, powietrzną część układu (4), przy czym cewki uzwojeń (1) i (2) połączone z kondensatorami (5) tworzą równoległe obwody drgające o zbliżonych częstotliwościach z dokładnością do 1%, które zasilane są z szerokopasmowych wzmacniaczy mocy (6), sterowanych przez 2-kanalowy generator (7) dostarczający dwa sinusoidalne przebiegi o wzajemnie przesuniętych fazach o $\pi/2$ radiana.

Rysunki

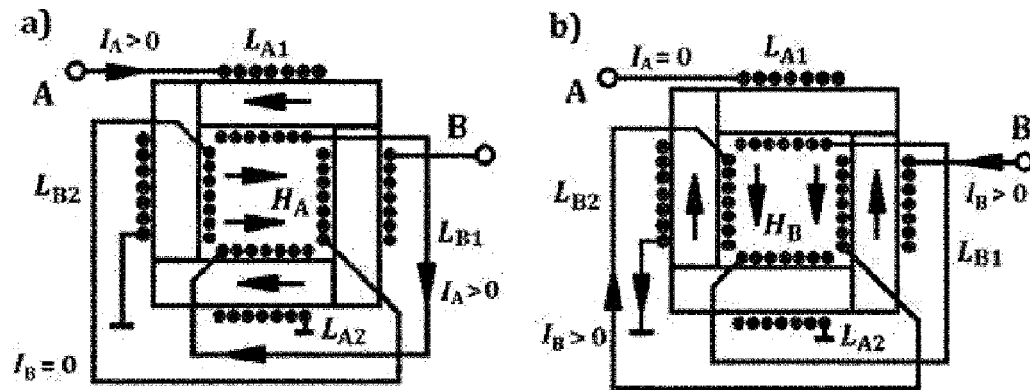


Fig. 1

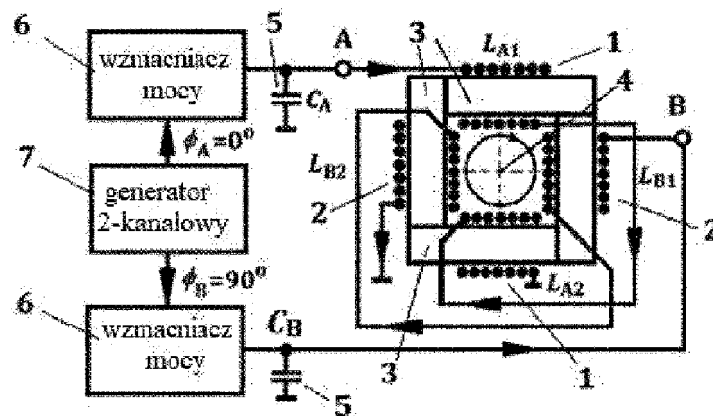


Fig. 2.