

doi:10.15199/48.2020.04.30

## Magnes Bittera wykonany z wolframu i chłodzony ciekłym helem

**Streszczenie.** Opisano projekt magnesu Bittera wykonanego z płyt wolframowych i chłodzonego ciekłym helem o temperaturze 4,2 K. Obliczono indukcję pola magnetycznego wytwarzanego przez ten magnes, jego moc zasilania i parametry układu chłodzenia. Moc ta jest ok.  $10^4$  razy mniejsza, niż moc zasilania powszechnie używanych magnesów Bittera wykonanych z miedzi i chłodzone wodą. Wykazano wykonalność tego magnesu przy użyciu dostępnych obecnie możliwości technicznych.

**Abstract.** The project of the Bitter magnet made of tungsten plates and coiled by liquid helium in temperature of 4 K is described. The magnetic flux density produced by this magnet, power supply and coiling system parameters are calculated. This power is about  $10^4$  times smaller than power of commonly used Bitter's magnets made of cooper and coiled by water. Feasibility of this magnet by using of the present accessible technical aids is demonstrated. (**Bitter magnets made of tungsten and coiled by liquid helium**).

**Słowa kluczowe:** pole magnetyczne, wytwarzanie, wolfram, ciekły hel, magnes Bittera, chłodzenie.

**Keywords:** magnetic field, production, tungsten, liquid helium, Bitter magnet, cooling.

### Wstęp

Silne pola magnetyczne mają wiele zastosowań zarówno w badaniach naukowych jak też w nowoczesnych technologiach. Jednym ze spektakularnych wyników zastosowanie tych pól w badaniach naukowych jest odkrycie całkowitego i ułamkowego kwantowego efektu Halla, które zachodzą tylko w niskich temperaturach i polach o indukcji kilkunastu tesli [1]. Silne pola magnetyczne stosowane są też w fizyce jądrowej do kierowania i ogniskowania wiązki cząstek oraz kompresji plazmy w badaniach kontrolowanej syntezy termojądrowej [2-5]. Silne pola magnetyczne są również niezbędne do generowania promieniowania synchrotronowego [6, 7]. W procesach technologicznych pola te są wykorzystywane do produkcji magnesów trwałych, badania właściwości nowych materiałów w tym nadprzewodników do modyfikacji struktury materiałów i rozdzielania mieszanin. Silne pola magnetyczne mają też szerokie zastosowanie w badaniach struktury różnych obiektów metodą NMR, zwłaszcza w obrazowej diagnostyce medycznej, a także do badania zjawisk transportu w ciałach stałych [8].

Silne pola magnetyczne można podzielić na stałe i impulsowe [9, 10]. W obu przypadkach wytwarzanie tych pól wymaga pokonania dużych trudności technicznych [11, 12]. Wytwarzanie stałych pól magnetycznych przy użyciu cewek pracujących w temperaturze pokojowej wymaga ich intensywnego chłodzenia. Zastosowanie cewek wykonanych z nadprzewodników jest ograniczone do indukcji wyznaczonej przez pole krytyczne i również wymaga chłodzenia ciekłym helem, albo azotem [13]. Czas trwania i indukcja pól impulsowych są ograniczone przez szybkość dostarczania energii do cewki, jej wytrzymałość mechaniczną, cieplną i impedancję [14, 15]. Wytwarzanie najsilniejszych pól magnetycznych o indukcji powyżej  $10^3$  T przy użyciu wybuchowej kompresji strumienia magnetycznego powoduje zniszczenie cewki i części układu eksperymentalnego [16, 17].

Z tego powodu poszukuje się nowych metod wytwarzania silnych pól magnetycznych. W tym celu stosuje się, np. mikrocewki, paczki cząstek przyspieszonych w akceleratorach, układy magnesów i cewek o zoptymalizowanym kształcie oraz stopy o większej wytrzymałości mechanicznej i przewodności elektrycznej [18-23]. W artykule został przedstawiony projekt zastosowania do wytwarzania silnych pól magnetycznych cewki typu Bittera wykonanej z wolframu chłodzonego ciekłym helem. Wolfram wykazuje bardzo interesujące właściwości, które polegają na tym, że przechodzi w stan nadprzewodnictwa dopiero na temperaturze 0,0015 K i

przejście zachodzi jedynie w cienkich warstwach tego metalu. Co najważniejsze, w temperaturze kilku Kelvinów wolfram charakteryzuje się szczególnie niską rezystywnością, znacznie mniejszą niż inne metale w tej temperaturze. Rezystywność wolframu w temperaturze 4,2 K  $\rho_0 = 2,67 \cdot 10^{-13}$   $\Omega$ m [24]. Dla porównania rezystywność miedzi w tej temperaturze  $\rho_m = 2,21 \cdot 10^{-11}$   $\Omega$ m [25]. Ponieważ wolfram zachowuje stan rezystywny, to indukcja pola magnetycznego wytwarzanego przez uzwojenie wykonane z tego metalu nie jest ograniczona przez pole krytyczne, jak w przypadku magnesów nadprzewodzących. Oprócz tego wolfram wykazuje bardzo wysoką wytrzymałość mechaniczną, która zapewnia dużą odporność cewki na rozerwanie. Z tych powodów wolfram chłodzony ciekłym helem jest obiecującym materiałem do budowy cewek wytwarzających silne pola magnetyczne.

### Indukcja pola

Rozpatrzony zostanie magnes Bittera składający się z pakietu płyt w kształcie pierścieni, przeciętych wzdłuż promienia (rys. 1, 2). Każda z płyt obrócona jest względem sąsiedniej płyty o pewien kąt i oddzielona warstwą izolacyjną, która nie pokrywa wąskiego sektora w pobliżu krawędzi przecięcia. Sąsiednie płyty kontaktują się ze sobą tymi sektorami. Dzięki temu płyty tworzą spiralne uzwojenie. Ponadto w płytach wykonane są otwory, pokrywające się ze sobą i regularnie rozmieszczone. Otwory te tworzą osiowe kanały, przeznaczone do przepływu czynnika chłodzącego. Płyty zostały ściśnięte podłużnymi śrubami w celu zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej. Pakiet takich płyt umieszczony jest w naczyniu, przez które przepływa czynnik chłodzący. Dla uzwojenia o przekroju prostokątnym wprowadza się charakterystyczne parametry  $\alpha$ ,  $\beta$  zdefiniowane wzorami:

$$(1) \quad \alpha = \frac{r_2}{r_1}$$

$$(2) \quad \beta = \frac{l}{2r_1}$$

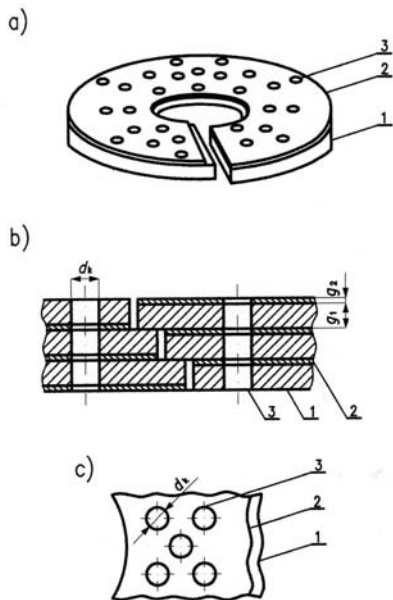
Te parametry pozwolą uprościć zapis wzorów otrzymanych w dalszej części artykułu.

Prąd o natężeniu  $dI$ , płynący w elementarnym pierścieniu wydzielonym z uzwojenia, wytwarza pole magnetyczne o indukcji, której wartość zostanie oznaczona symbolem  $dB$ . Zgodnie z oznaczeniami przyjętymi na rys. 3 dla pierścienia kołowego o promieniu  $r$  można zapisać

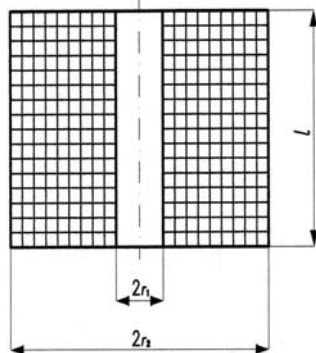
$$(3) \quad dB = \frac{\mu_0 r^2 dI}{2(r^2 + x^2)^{3/2}}$$

gdzie  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7}$  (Vs)/(Am) oznacza przenikalność magnetyczną próżni. W magnesach Bittera gęstość prądu  $j$  z płyty jest funkcją odległości  $r$  od środka płyty i wyraża się wzorem

$$(4) \quad j(r) = j_0 \left( \frac{r_1}{r} \right)$$



Rys.1. Szczegóły budowy uzwojenia magnesu Bittera: a) widok ogólny płyty, b) przekrój podłużny, c) widok z góry; 1 – płyta przewodząca, 3 – warstwa izolacyjna, 3 – kanał chłodzący,  $g_1, g_2$  – grubości odpowiednio: płyty przewodzącej i warstwy izolacyjnej,  $d_k$  – średnica kanału chodzącego



Rys.2. Podstawowe wymiary uzwojenia magnesu Bittera;  $r_1, r_2$  – promienie odpowiednio: wewnętrzny i zewnętrzny,  $l$  – długość

Zgodnie ze wzorem (4) gęstość prądu osiąga maksymalną wartość  $j_0$  na brzegu otworu płyty (dla  $r = r_0$ ) i maleje odwrotnie proporcjonalnie do odległości od środka płyty. Jest to spowodowane wzrostem oporu elektrycznego zewnętrznych elementów płyty, który jest wprost proporcjonalny do ich obwodu. Natężenie prądu  $dI$  w pierścieniu wyraża się wzorem

$$(4) \quad dI = j(r) dx dr$$

Po podstawieniu wzorów (4) i (5) do wzoru (3) otrzymuje się

$$(6) \quad dB = \frac{\mu_0 j_0 r_1}{2} \left[ \frac{r dx dr}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \right]$$

Indukcję pola magnetycznego  $B_1$  w punkcie znajdującym się na osi magnesu w odległości  $x_1$  od jego końca oblicza się przez następujące całkowanie

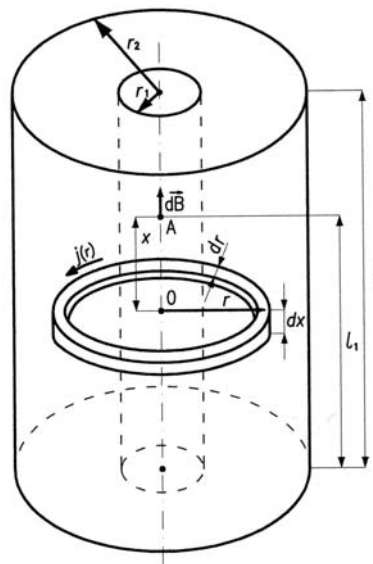
$$(7) \quad B_1 = \int_{x=0}^{l_1} \int_{r=r_1}^{r=r_2} dB + \int_{x=0}^{x=l-l_1} \int_{r=r_1}^{r=r_2} dB$$

Pierwsze całkowanie wzoru (6) po promieniu  $r$  daje użyteczny wzór na indukcję pola magnetycznego  $\Delta B$ , wytwarzanego przez pojedynczą płytę na jej osi w odległości  $x$  od środka płyty

$$(8) \quad \Delta B = \frac{\mu_0 j_0 r_1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} - \frac{1}{\sqrt{r_2^2 + x^2}} \right]$$

Po drugim całkowaniu otrzymuje się dla  $B_1$  następujący wzór

$$(9) \quad B_1 = \frac{\mu_0 j_0 \lambda r_1}{2} \ln \left[ \alpha^2 \left( \frac{l_1 + \sqrt{r_1^2 + l_1^2}}{l_1 + \sqrt{r_2^2 + l_1^2}} \right) \left( \frac{(l-l_1) + \sqrt{r_1^2 + (l-l_1)^2}}{(l-l_1) + \sqrt{r_2^2 + (l-l_1)^2}} \right) \right]$$



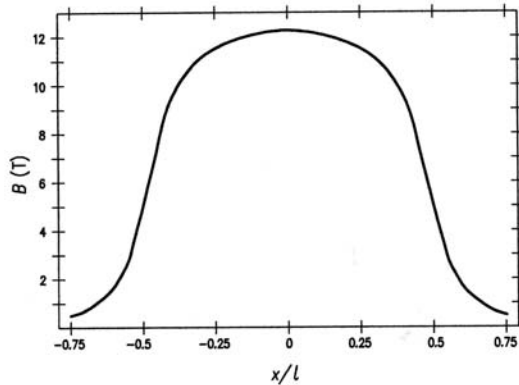
Rys.3. Schemat do obliczania indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes Bittera;  $dB$  – przyrządek do indukcji pola w punkcie A,  $r, dr, dx$  – odpowiednio: promień, szerokość i wysokość pierścienia,  $x, l_1$  – odległości pierścienia odpowiednio od punktu A i od końca uzwojenia,  $j(r)$  – gęstość prądu w pierścieniu, symbole:  $r_1, r_2, l$  mają takie samo znaczenie jak na rys.2

Ponieważ w uzwojeniu znajdują się kanały chodzące i warstwy izolacyjne, więc prąd nie płynie w jego całej objętości. Z tego powodu do wzoru (9) należało wprowadzić parametr  $\lambda$ , który uwzględni ten fakt. Jest to współczynnik wypełnienia, zdefiniowany jako stosunek objętości części uzwojenia wypełnionej przez materiał przewodzący prąd do całej objętości tego uzwojenia. W celu obliczenia indukcji pola magnetycznego  $B_0$  w środku uzwojenia należy podstawić  $l_1 = l/2$  do wzoru (9) oraz wykorzystać wzory (1) i (2). Wtedy otrzymuje się

$$(10) \quad B_0 = \mu_0 j_0 \lambda r_1 \ln \left[ \frac{\alpha(\beta + \sqrt{1 + \beta^2})}{\beta + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \right]$$

Założono, że uzwojenie będzie miało następujące wymiary: promień płyty: wewnętrzny  $r_1 = 20$  mm,

zewnątrzny  $r_2 = 300$  mm i długość  $l = 480$  mm. Dla tych wymiarów, ze wzorów (1) i (2), otrzymuje się wartości parametrów:  $\alpha = 15$  i  $\beta = 12$ . Ponadto przyjęto maksymalną gęstość prądu  $j_0 = 250$  A/mm<sup>2</sup> i współczynnik wypełnienia  $\lambda = 0,8$ . Po podstawieniu tych wartości do wzoru (10) otrzymano  $B_0 = 12,29$  T. Korzystając ze wzoru (9) i przyjętych wartości obliczono też indukcję pola magnetycznego  $B_1$  dla punktów leżących na osi uzwojenia. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Indukcja pola magnetycznego  $B_1$  jako funkcja względnej odległości od środka magnesu  $x/l$

### Moc zasilania

Ponieważ magnes znajduje w stanie rezystywnym, to energia płynącego w nim prądu jest rozpraszana w formie ciepła. Obliczona zostanie teraz moc strat ciepłych  $P$ . Strata mocy  $dP$  w elemencie objętości  $dV$  wynosi

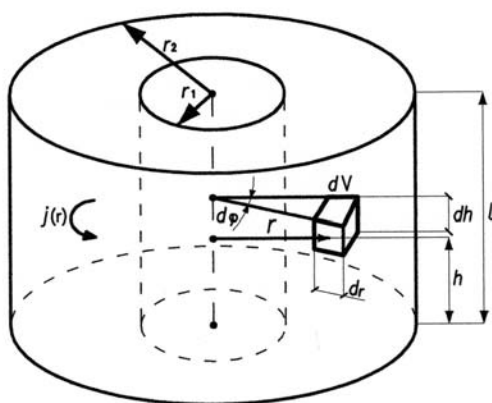
$$(11) \quad dP = \rho_0 \lambda j^2(r) dV$$

Zgodnie z rys. 5  $dV$  wyraża się wzorem

$$(12) \quad dV = r^2 d\varphi dr dh$$

Do wzoru (11) podstawia się wzór (4) i oblicza całkę

$$(13) \quad P = \rho_0 j_0^2 \lambda r_1^2 \int_{r=r_1}^{r=r_2} \int_{h=0}^{h=l} \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \frac{dr dh d\varphi}{r}$$



Rys.5. Schemat do obliczania mocy strat ciepłych i natężenia prądu w magnesie Bittera;  $j(r)$  – gęstość prądu,  $dV$  – element objętości,  $r$ ,  $h$  – odległości elementu objętości odpowiednio od: osi magnesu i jego końca,  $d\varphi$  – element kąta azymutalnego,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $l$  mają takie samo znaczenie jak na rys. 2

W wyniku tego mocy strat ciepłych  $P$  wyraża się wzorem

$$(14) \quad P = 2\pi r_1^2 j_0^2 \rho_0 \lambda \ln \alpha$$

Po podstawieniu wcześniej przyjętych wartości do wzoru (14) otrzymuje się  $P = 43,6$  W.

### Szybkości chłodzenia

W celu zachowania stałej temperatury uzwojenia konieczne jest jego chłodzenie ciekłym helum. Ilość ciepła odbieranego przez hel w czasie 1 s, czyli szybkość chłodzenia  $Q$ , powinna być równa mocy strat ciepłych  $P$ . Odbieranie ciepła następuje w wyniku parowania ciekłego helu, dlatego zgodnie z zasadą bilansu cieplnego można napisać równanie

$$(15) \quad Q = m_h c_p = V_h \rho_h c_p = P$$

w którym  $m_h$ , oznacza masę helu parującego w czasie 1 s, zaś  $c_p$  – ciepło parowania helu ( $c_p = 2,09 \cdot 10^4$  J/kg) [26]. Ponadto  $V_h$  oznacza objętość ciekłego helu, odpowiadającą masie  $m_h$ , natomiast  $\rho_h = 145$  kg/m<sup>3</sup> jest jego gęstością. Ze wzoru (15) wyznacza się

$$(16) \quad V_h = \frac{P}{\rho_h c_p}$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości to wzoru (16) otrzymuje się  $V_h = 14,4 \cdot 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s, co odpowiada natężeniu przepływu 51,9 l/h.

### Wytrzymałość mechaniczna

Ważnym wielkością, którą należy obliczyć są naprężenia w uzwojeniu. Elementy uzwojenia przewodzące prąd znajdują się w polu magnetycznym, wytwarzanym przez to uzwojenie. Z tego powodu na te elementy działają siły Lorenza i uzwojenie podlega działaniu sił rozciągających w kierunku radialnym oraz sił ciskających w kierunku osiowym. Decydujące znaczenie mają naprężenia rozciągające  $\sigma_r$ , które najczęściej powodują rozerwanie magnesów. Naprężenia te oblicza się ze wzoru

$$(17) \quad \sigma_r = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

w którym  $B$  oznacza indukcję pola magnetycznego. Dla obliczonej wcześniej maksymalnej indukcji  $B = 12,3$  T ze wzoru (17) otrzymuje się  $\sigma_r = 5,99 \cdot 10^7$  N/m<sup>2</sup>. Wartość ta jest znacznie mniejsza, niż wytrzymałość wolframu na rozerwanie  $\sigma_{rm}$  wynosząca  $1,72 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup> [27].

### Dyskusja wyników

Najważniejszą zaletą opisanego magnesu Bittera jest bardzo mała moc zasilania, wynosząca 43,6 W. Wynika to z niezwykle małej rezystywności wolframu chłodzonego ciekłym helum o temperaturze 4,2 K. Dla porównania obliczona zostanie moc zasilania konwencjonalnego magnesu Bittera chłodzonego wodą. Będzie to magnes o tych samych wymiarach i zasilany prądem o tym samym natężeniu. Oznacza, że magnes ten wytwarza pole magnetyczne o tej samej wartości indukcji. Do jego wykonania zostanie użyta miedź i uzwojenie będzie pracowało w temperaturze  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ . W tych warunkach rezystywność miedzi  $\rho_m = 1,83 \cdot 10^{-8}$   $\Omega\text{m}$  [27]. Ze wzoru (14) otrzymuje się moc zasilania tego magnesu  $P_m = 2,99$  MW. Jest to moc strat ciepłych, którą należy odprowadzić przy użyciu wody przepływającej przez magnes. Niech woda chłodząca ten magnes ma temperaturę początkową  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Odprowadzanie ciepła zachodzi w tym przypadku w wyniku ogrzewania wody od temperatury  $t_1$  do  $t_2$ . Stosując zasadę bilansu cieplnego oblicza się objętość wody  $V_w$ , przepływającej przez magnes w czasie 1 s. Zgodnie z tą zasadą można napisać równanie

$$(18) \quad P_m = \rho_w V_w c_w (t_2 - t_1)$$

w którym  $\rho_w$ ,  $c_w$  oznaczają odpowiednio: gęstość wody i jej ciepło właściwe. Ze wzoru (18) wyznacza się

$$(19) \quad V_w = \frac{P_m}{\rho_w c_w (t_2 - t_1)}$$

Podstawiając do wzoru (19)  $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_w = 4,18 \text{ kJ/(kg}^\circ\text{C)}$  i wcześniej otrzymane wartości otrzymuje się  $V_w = 17,9 \text{ dm}^3/\text{s}$ . Tej wartości odpowiada natężenie przepływu wody wynoszące  $41,9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Z przeprowadzonego porównania wynika wniosek, że zastosowanie do budowy magnesu Bittera wolframu chłodzonego ciekłym helum pozwala wielokrotnie zmniejszyć moc zasilania. W rozpatrywanym przykładzie jest to  $6,86 \cdot 10^4$  razy. Dzięki temu uzyskuje się ewidentną oszczędność energii elektrycznej i kosztów eksploatacji magnesu.

Zachowanie stałej temperatury uzwojenia wymaga dopływu dostatecznej ilości ciekłego helu, wynoszącej  $51,9 \text{ l/h}$ . Wydajność obecnie budowanych skraplarek helu wynosi od kilku do kilkudziesięciu  $\text{l/h}$  a ich moc zasilania ok.  $40 \text{ kW}$  [28]. Duże stacje do skraplania helu mają wydajność ok.  $250 \text{ l/h}$ . Dlatego ciągle zaopatrzenie rozpatrywanego magnesu w ciekły hel leży granicach obecnych możliwości technicznych. Natomiast całkowita moc instalacji zasilania takiego magnesu byłaby w granicach kilkuset  $\text{kW}$ .

Istotną zaletą wolframu jest jego wysoka wytrzymałość na rozrywanie, wynosząca  $1,72 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$  w temperaturze  $20^\circ\text{C}$ . W temperaturze ciekłego helu wytrzymałość ta jest prawdopodobnie jeszcze wyższa. Dla porównania, wytrzymałość miedzi na rozrywanie w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  wynosi  $0,20 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ . Z tego powodu uzwojenia magnesów Bittera wykonane z miedzi wymagają specjalnego wzmocnienia, np. przez ściskanie ich śrubami o dużej wytrzymałości. Ze wzoru (17) wynika, że przekroczenie wytrzymałości na rozrywanie w magnesie wykonanym z wolframu nastąpiłoby dla indukcji magnetycznej  $65,7 \text{ T}$ . Z tego powodu wolfram chłodzony ciekłym helum jest bardziej przydatny do budowy magnesów wytwarzających silne pola magnetyczne, niż miedź. Najsilniejsze konwencjonalne magnesy Bittera, które obecnie działają, są złożone z kilku uzwojeń umieszczonych jedno wewnątrz drugiego i wytwarzają pola magnetyczne o indukcji ok.  $30 \text{ T}$ . W rozważanym przykładzie przyjęto dość dużą średnicę obszaru, w którym wytwarzane jest pole magnetyczne ( $2r_1 = 40 \text{ mm}$ ). W magnesach Bittera wytwarzających najsilniejsze pola średnica ta jest mniejsza i wynosi ok.  $20 \text{ mm}$ . Ze wzorów (10) i (14) wynika, że zmniejszając  $r_1$  można spowodować wzrost indukcji pola i zmniejszenie mocy zasilania. W ten sposób można uzyskać lepsze chłodzenie i niższe koszty eksploatacji magnesu.

**Autorzy:** dr hab. Stanisław Bednarek, dr Julian Płoszajski, Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, ul. Pomorska 149/153, 90-236 Łódź. E-mail: [stanislaw.bednarek@uni.lodz.pl](mailto:stanislaw.bednarek@uni.lodz.pl), [julian-p@wp.pl](mailto:julian-p@wp.pl).

#### LITERATURA

- [1] Herlach J.F., Miura N. (Editors), High Magnetic Fields Science and Technology, Vol. 2, Theory and Experiments I, World Scientific (2003)
- [2] Wu Chao A., Mess K.H., Tinger M., Zimmermann F., Handbook of Accelerators Physics and Engineering, World Scientific (2013)
- [3] Truck B., Tore supra: A tokamak with superconducting toroidal field coils, *IEEE Trans. Mag.*, 25 (1989) 1473-1480

- [4] N'gotta P., Le Beck G., Chavanne J., Hybrid high gradient permanent magnet quadrupole, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 19 (2016) 122-124
- [5] Elder F.R., Gurewitsch A.M., Langmuir R.V., Pollock H.C., Radiation from electrons in a synchrotron, *Phys. Rev.*, 71, (1947), 11, 829-830
- [6] Motokawa M., Watanabe K., Awaji S., High magnetic field research in Tohoku University, *Curr. Appl. Phys.*, 3 (2003), 367-376
- [7] Lubkin G.B., Florida dedicated National High Magnetic Field Laboratory, *Phys. Today*, 12 (1994), 21-23
- [8] Xia J.C., Vicente C., Aoms E.D., Sullivan N.S., The National High Magnetic Field Laboratory Ultra-High B/T Facility, *Phys. B*, 346-347 (2004), 649-653
- [9] Trojnar K., Kopetzki N., High Field Magnets at the International Laboratory Wrocław, *Phys. B*, 155 (1989), 85-86
- [10] Herlach J.F., Miura N., (Editors), High Magnetic Fields Science and Technology, Vol. 1, Magnet Technology and Experimental Technique, World Scientific, (2003)
- [11] Bitter F., The design of powerful electromagnet, Part. II. The magnetizing coil, *Rev. Sci. Instr.*, 7 (1936), 482-489
- [12] Soghomonian V., Sabo M., Powell A., Murphy P., Rosanske R., Cross T.A., Schneider-Muntau H.J., Identification and minimization of sources of temporal instabilities in high field (>23 T) resistive magnets, *Rev. Sci. Instr.*, 71 (2000), 7, 2882-2886
- [13] Cyrot M., Pavuna D., Introduction to Superconductivity and High  $T_c$  Materials, World Scientific Publishing Co. (1992)
- [14] Ding H., Yuan Y., Xu Y., Jiang C., Li L., Duan X., Pan, J. Hu J., Testing and Commissioning of a 135 MW Pulsed Power Supply at the Wuhan National High Magnetic Field Center, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 24 (2014), 3, doi:10.1109/TASC.2013.2292305.
- [15] Knoepfel H., Pulsed High Magnetic Fields, Physical Effects and Generation Methods Concerning Pulsed Fields up to the Megaersted Level, Nord-Holland Publishing Company, (1970)
- [16] Kane B.E., Dzurak A.S., Facer G.R., Clark R.G., Starrett R.P., Skougarevsky A., Lumpkin N.E., Measurement instrumentation for electrical transport experiments in extreme pulsed magnetic fields generated by flux compression, *Rev. Sci. Instr.*, 69 (1997), 10, 3843-3860
- [17] Nojiri H., Takamasu T., Todo S., Uchida K., Haryama T., Katori H.A., Goto T., Miura N., Generation of 500 T fields by electromagnetic flux compression and their application to cyclotron resonance, *Phys. B* 201 (1994), 579-583
- [18] Motokawa M., Nojiri H., Tokunaga Y., An idea for the easy construction of a high field magnet, *Phys. B*, 155 (1989), 96-99
- [19] Mackay K., Bonfim M., Givord D., Fontaine A., 50 T pulsed magnetic fields in microcoil, *J. App. Phys.*, 87, (2000), 4, 1996-2002
- [20] Peng T., Jiang F., Sun Q.Q., Pan Y., Herlach F., Li L., Concept Design of 100 T Pulsed Magnet at the Wuhan National High Magnetic Field Center, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 26, (2014), nr.4, doi: 10.1109/TASC.2015.2523366
- [21] Back C.H., Siegmann H.C., Ultrashort magnetic field pulses and elementary process of magnetization reversal, *J. Magn. Mater.*, 200 (1999), 774-785
- [22] Siegmann H.C., Magnetism in the picrosecond time scale with electron accelerators, *Europhys. News*, 31 (2000), nr. 6, 24-25
- [23] Bjørk R., Bahl C.R.H., Insinga A.R., Topology optimized permanent magnet system, *J. Magn. Mater.*, 437 (2017) 78-85
- [24] Desai E., Electrical resistivity of tungsten, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 13 (1984), 4, 1091-1096
- [25] Haynes W.M., (Editor in Chief), CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press Taylor and Francis Group (2017)
- [26] Mendelson K., Cryophysics, Wiley and Sons, Inc., (1960)
- [27] Madelung O., Martienssen W., (Editors), Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, Springer-Verlag (1989)
- [28] Daunt J.G., Johnston H.L., A Large Helium Liquefier, *Rev. Sci. Instr.*, 122 (2004), 20, doi.org/10.1063/1.1741462