

## Trendy doboru materiałów magnetycznych dla wysokoczęstotliwościowych falowników sieciowych współpracujących ze źródłami energii odnawialnej.

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono generalne trendy technologiczne w zakresie użycia materiałów magnetycznych dla dławików filtra wyjściowego falownika sieciowego współpracującego ze źródłem energii odnawialnej. Przedstawiono rozważania dla falowników w zakresie mocy 3-60 kW oraz częstotliwościach modulacji 10-150 kHz. Przedstawiono opis narzędzi analizy oraz wyniki zakończone wnioskami dla różnych materiałów magnetycznych. Analiza jest udokumentowana wykresami, które przedstawiają trendy w doborze materiałów magnetycznych.

**Abstract.** This paper presents general trends in magnetic materials selection for grid connected inverter's output filter coupled with renewable energy source. The inductor size is analyzed in a power range between 3kW to 60kW and a frequency range between 10kHz to 150kHz. The paper presents tools of analysis and introduces magnetic materials and finally provides with the result and the summary. The analysis is underpinned with number of graphs that show trends in magnetic material selection for considered power, frequency and efficiency range. **General trends in magnetic materials selection for grid connected inverter's output filter coupled with renewable energy source**

**Słowa kluczowe:** Elementy magnetyczne, Energoelektronika, Falowniki sieciowe, Energia odnawialna.

**Keywords:** Magnetic components, Power electronics, Grid inverters, Renewable energy.

### Wstęp

Uwarunkowania ekologiczne, polityczne oraz ekonomiczne, w połączeniu ze znaczną erozją cen, przyczyniają się do popularyzacji odnawialnych źródeł energii elektrycznej, OZE [1]-[5]. Podstawowym elementem sprzęgającym OZE z siecią elektroenergetyczną jest falownik. Aby zachować przewagę rynkową, producenci falowników [6]-[9] sięgają po zaawansowane rozwiązania technologiczne bazujące na szerokopasmowych urządzeniach półprzewodnikowych, które pozwalają na podniesienie częstotliwości pracy urządzeń, a w konsekwencji ich miniaturyzację [10]-[17].

Znaczącą rolę w pracy falownika odgrywa filtr wyjściowy umieszczony pomiędzy modułem energoelektronicznym, a siecią. Podstawową jego funkcją jest zapewnienie spełnienia norm przyłączenia falownika do sieci poprzez eliminację składowych o częstotliwości modulacji [18]. Typową topologią filtra są układy LC oraz LCL, których parametry są ograniczone obszarem wyznaczonym przez wymagania przyłączenia do sieci, częstotliwość przełączania, rodzaj topologii falownika, kwestie EMC, generacja mocy biernej, sprawność [19]-[24]. Wymagania dotyczące indukcyjności determinują wielkość filtra [25].

W artykule tym przedstawiono analizę rozmiaru elementu indukcyjnego w zależności od parametrów falownika takich jak moc, częstotliwość pracy oraz sprawność. W części pierwszej został scharakteryzowany przedmiot analizy, a narzędzia i parametry analizy są omówione w części drugiej. Wyniki analizy są zaprezentowane w części trzeciej, a podsumowanie i wnioski są zawarte w części czwartej.

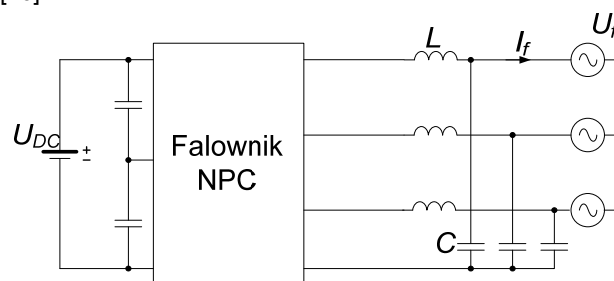
### Przedmiot Analizy

Przedmiotem analizy jest wpływ doboru materiału magnetycznego na rozmiar dławika użytego w filtrze LC umieszczonego pomiędzy falownikiem NPC, a siecią, którego uproszczony schemat zaprezentowano na rysunku 1.

Praca nie koncentruje się na zasadach doboru parametrów filtra z uwagi na obszerność zagadnienia i dużej liczby istniejących publikacji [19]-[24].

Rozmiar dławika dla określonych warunków pracy jest proporcjonalny do indukcyjności. Z perspektywy fizyki zjawiska rozmiar dławika może być ograniczony przez

strumień nasycenia, przyrost temperatury lub sprawność [26].



Rys. 1. Schemat ideowy falownika z filtrem LC.

Bazując na generalnym trendzie rynkowym [6]-[9], w tej pracy, tętnienie prądu modulowanego zostało przyjęte w przedziale 10-30% amplitudy znamionowego prądu sieciowego z krokiem co 10%. Zmienność trendu jest obserwowana dla przedziału mocy 3-60 kW oraz częstotliwości modulacji 10-150 kHz.

Znając wartość tętnienia modulowanego prądu, wynikającą z założeń projektowych, dla danego napięcia sieci tętnienia te można odnieść do wartości wymaganej indukcyjności:

$$(1) \quad L = \frac{u_L \Delta t}{I_{fMAX} k}$$

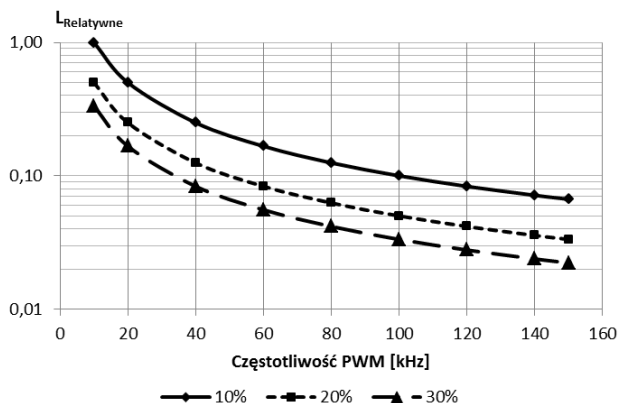
gdzie:  $u_L$  – napięcie chwilowe dławika – różnica napięć pomiędzy napięciem wejściowym falownika, a wyjściowym;  $I_{fMAX}$  – amplituda prądu sieciowego;  $k$  – współczynnik określający wartość tętnień prądu do wartości maksymalnej wynikającej z obciążenia układu;  $\Delta t$  – czas przyłożenia napięcia do dławika wyrażony:

$$(2) \quad \Delta t = \frac{2U_{fMAX}}{f_{PWM} U_{DC}}$$

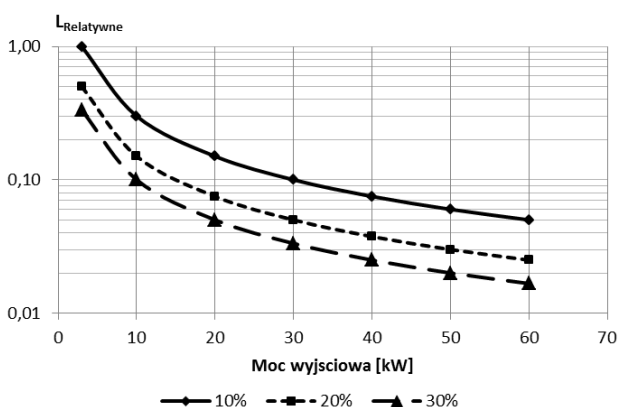
gdzie:  $U_{fMAX}$  – wartość maksymalna napięcia fazowego;  $f_{PWM}$  – częstotliwość modulacji;  $U_{DC}$  – wartość napięcia stałego zasilającego falownik

Z równań (1) oraz (2) wynika, że wymagana indukcyjność jest odwrotnie proporcjonalna do prądu wynikającego z obciążenia układu, co przy założeniu stałego napięcia jakie gwarantuje sieć odnosi się do jego mocy oraz do częstotliwości modulacji falownika.

Wraz z rozwojem półprzewodników mocy istnieje możliwość zwiększenia częstotliwości modulacji falownika. Jednym z efektów zwiększania częstotliwości jest możliwość zmniejszenia indukcyjności dławików, co przekłada się na zmniejszenie ich gabarytów i wagi. Ze względu na odwrotnie proporcjonalną zależność indukcyjności od częstotliwości efekt zmniejszenia indukcyjności może się wydawać mniejszy dla wyższych częstotliwości lecz jest on stały. Przykładowo zwiększając częstotliwość z 20kHz na 60kHz możliwe jest zmniejszenie indukcyjności 3 razy, jednak dalsze zwiększenie częstotliwości o 40kHz czyli z 60 na 100kHz pozwala na zmniejszenie indukcyjności 1,67 razy. Pokazuje to skalę wyzwania technologicznego konieczną do zmniejszenia rozmiaru układu. Aby zmniejszyć rozmiary układu 10 kHz o połowę należy podnieść częstotliwość do 20 kHz, jednak aby zmniejszyć o połowę rozmiary układu zaprojektowanego na 50 kHz, należy rozważyć częstotliwość 100 kHz. W przypadku podnoszenia mocy również następuje możliwość redukcji wymaganej indukcyjności. Zmiana wymagań indukcyjności w zależności od częstotliwości modulacji jak i mocy układu została zobrazowana odpowiednio na rysunkach 2 oraz 3, gdzie przedstawiono względną zmianę indukcyjności w odniesieniu do wartości wyznaczonej dla warunków mocy wyjściowej 10kW, częstotliwości modulacji 10kHz oraz tężni prądu 10%.



Rys. 2. Zależność indukcyjności względnej od częstotliwości modulacji falownika odniesiona do  $P=10\text{kW}$ ,  $f_{\text{PWM}}=10\text{ kHz}$  i  $k=10\%$ .



Rys. 3. Zależność indukcyjności względnej od mocy wyjściowej falownika odniesiona do  $P=10\text{kW}$ ,  $f_{\text{PWM}}=10\text{ kHz}$  i  $k=10\%$ .

Celem porównania zostały wyselekcjonowane cztery charakterystyczne materiały magnetyczne: nanokrystaliczny Vitroperm 500F [27], amorficzny 2605SA1 [28], stal-krzemowa o wysokiej zawartości krzemu 10JNHF600 [29] oraz ferryt 3C92 [30]. Tabela 1 prezentuje zestawienie wybranych parametrów materiałów.

Vitroperm 500F charakteryzuje się najmniejszymi stratami mocy w porównaniu do pozostałych materiałów lecz również najniższym współczynnikiem wypełnienia oraz przeciętną wartością strumienia nasycenia. Stal amorficzna 2605SA1 charakteryzuje się relatywnie niskimi stratami i wyższym nasyceniem niż Vitroperm oraz lepszym współczynnikiem wypełnienia. Stal krzemowa 10JNHF600 charakteryzuje się największymi stratami mocy lecz również najwyższym współczynnikiem wypełnienia oraz najwyższym nasyceniem. Ferryt 3C92 charakteryzuje się niskimi stratami mocy oraz najniższą gęstością strumienia nasycenia, jest materiałem jednorodnym.

Tabela 1. Wybrane parametry analizowanych materiałów

Materiał	Vitroperm 500F	2605SA1	10JNHF600	3C92
$B_{\text{sat}} [\text{T}] @20^\circ\text{C}$	1,2	1,56	1,88	0,54
$B_{\text{MAX}} [\text{T}]$	1,1	0,9	1,15	0,33
Gęstość $[\text{g}/\text{cm}^3]$	7,3	7,18	7,53	4,8
Współczynnik wypełnienia	0,8	0,89	0,95	1

### Analiza i parametry

Do porównania materiałów magnetycznych została użyta uproszczona formuła wiążąca geometrię dławika wraz z parametrami elektrycznymi [31]. Formuła opisana nierówność (3) określa relację przekroju  $A_C$  i pola przekroju  $W_A$  rdzenia wraz ze średnią długością zwoju  $MLT$  do parametrów elektrycznych: przewodności  $\rho$ , indukcyjności  $L$ , maksymalnej wartości prądu  $I_{\text{MAX}}$  oraz maksymalnej gęstości strumienia  $B_{\text{MAX}}$ , rezystancji uzwojenia  $R$  wraz ze współczynnikiem wypełnienia okna przez uzwojenie  $K_U$ .

$$(3) \quad \frac{A_C W_A}{(MLT)} \geq \frac{\rho L^2 I_{\text{MAX}}^2}{B_{\text{MAX}}^2 R K_U}$$

Elementem determinującym otrzymane rozwiązanie równania (3) jest zachowanie poziomu strat mocy dławika poniżej dopuszczalnej wartości, gwarantującej zakładaną sprawność dławika. Proporcja strat pomiędzy uzwojeniem, a rdzeniem jest uzależniona od użytego materiału. Straty mocy w rdzeniu są określane za pomocą zmodyfikowanego równania Steinmetza [32][33]:

$$(4) \quad \Delta P_R = k_S f_{\text{PWM}}^\alpha B^\beta$$

gdzie:  $k_S$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – stałe wyznaczone empirycznie;

Tabela 2 znajdująca się na końcu artykułu przedstawia parametry Steinmetza dla analizowanych rdzeni.

Analiza została wykonana dla rdzenia składającego się z czterech bloków: dwóch kolumn na których nawinięte są uzwojenia oraz dwóch wieńczących je jarzm. Pozwala to na bezpośrednie porównanie bez wpływu geometrii na jakość wyników.

Do analizy przyjęto następujące założenia:

1. Napięcie wejściowe falownika  $U_{DC}$  wynosi 800V.
2. Wpływ rozproszenia szczelin jest pominięty.
3. Wpływ prądów wirowych w uzwojeniu jest pominięty. Straty w uzwojeniu generowane są przez składową podstawową sieci i stanowią 80% całych strat uzwojenia, natomiast straty wynikające z przepływu

prądu o częstotliwości modulacji generują pozostałe 20%.

4. Współczynnik wypełnienia okna dla uzwojenia jest stały i wynosi  $K_U = 0,5$ .
5. Wartość szczytowa gęstości strumienia jest zawsze równa maksymalnej gęstości strumienia  $B_{MAX}$  jak przedstawiono Tabeli 1.
6. Przyrost i ograniczenie maksymalnej temperatury pracy nie są uwzględnione.

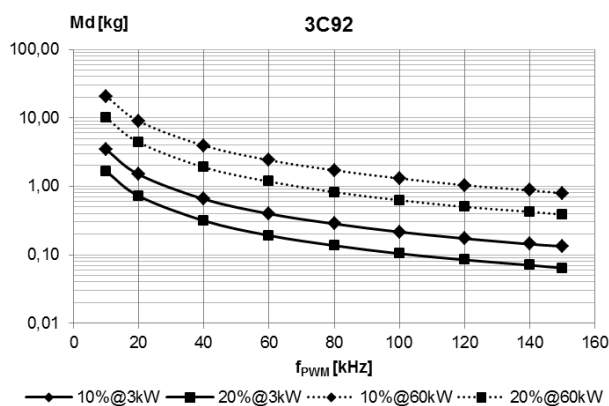
### Analiza wyników

Zostały przeprowadzone dwie uzupełniające się analizy. W pierwszej kolejności zbadano wpływ warunków pracy dławika na jego masę. Elementami zmieniającymi się są częstotliwość modulacji w zakresie 10-150 kHz, tętnienie prądu w zakresie 10-30% oraz moc układu w zakresie 3-60 kW przy założeniu stałej sprawności 99,5% oraz napięć wejściowych  $U_{DC}=800V$  oraz wyjściowego  $U_{AC}=230V$  50Hz. Dopelnieniem analizy jest dodanie wymaganego parametru w postaci parametru sprawności.

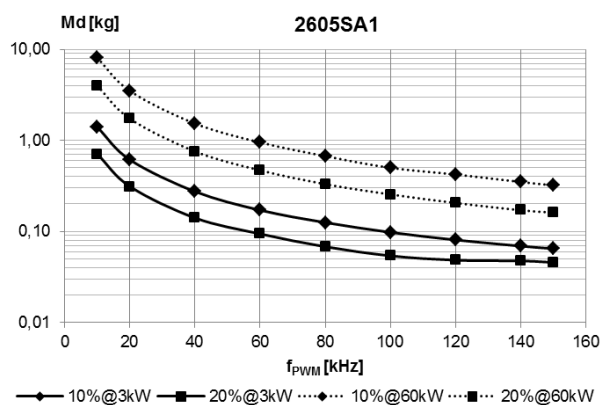
### Wpływ Warunków Pracy

Wyniki analizy warunków pracy dla rozważanych materiałów przedstawiono na rysunkach 4-7. Zgodnie z przewidywaniami masa dławika zmniejsza się wraz ze wzrostem częstotliwości oraz mocy. Niemniej zauważalny jest wpływ strat mocy na rozmiar dławika. Podczas gdy wysoce sprawne materiały, takie jak ferryt oraz materiał nanokrystaliczny, zachowują stałą proporcję masy w funkcji częstotliwości, materiały mniej sprawne, takie jak materiał amorficzny i stal krzemowa, wykazują tendencję mniejszej redukcji masy niż wyznaczonej przez trendy zaprezentowane na rysunkach 2 i 3. Dla materiału amorficznego 2605SA1 przy mocy 3 kW zauważalne jest zawężenie się obszaru wyznaczonego przez krzywą dla 20% tętnienia prądu. Oznacza to że rozmiar dławika jest zdeterminowany przez straty mocy w materiale magnetycznym. W przypadku 60 kW efekt ten nie występuje. Materiał 10JNHF600 wykazuje zdecydowanie większe straty mocy niż materiał amorficzny, stąd niemożliwe było wyznaczenie wartości dla wyższych częstotliwości, gdyż wiązało by się to koniecznością ograniczenia amplitudy gęstości strumienia magnetycznego, co byłoby sprzeczne z założeniami analizy.

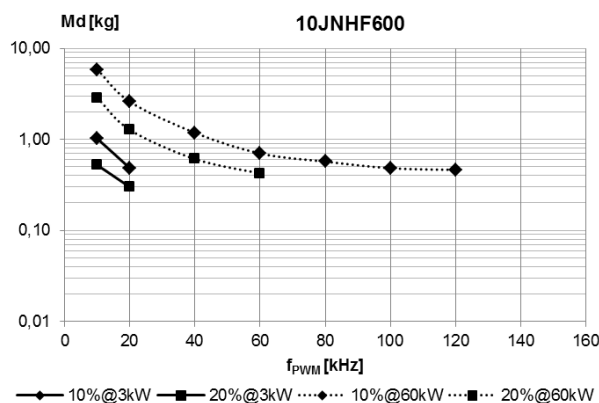
Wpływ parametrów pracy na rozmiar dławika można wyeksponować poprzez relatywne porównanie masy dla różnych materiałów. Wykresy na rysunkach 8 oraz 9 przedstawiają relatywne porównanie dławików wykonanych z rozważanych materiałów odpowiednio dla 3 kW oraz 60 kW. Materiałem odniesienia jest Vitroperm 500F, który wykazuje największą zgodność z trendami wynikającymi z analizy indukcyjności. Dla każdego punktu osi odciętych wykresu przyjmowana jest nowa baza. Takie podejście pozwala na skuteczne wyeksponowanie zmienności rozmiarów dławika. Intuicyjnie dławik bazujący na ferrycie jest trzykrotnie cięższy od dławika bazowego. Zależność ta wynika wprost z ograniczenia maksymalnej gęstości strumienia. A więc wielkość dławika podąża za trendem zmiany indukcyjności. Jednakże trend ten nie jest zachowany w przypadku materiału amorficznego oraz stali krzemowej dla mocy układu równej 3kW. Widoczne jest zwiększanie wagi wraz ze wzrostem częstotliwości. W przypadku dławika dla układu 60kW oraz rdzenia z materiału amorficznego, zmienność jego waga jest zgodna z trendem indukcyjności, podczas gdy dla dławika z rdzeniem ze stali 10JNHF600 zmienność wagi zdecydowanie odbiega od tego trendu. Niemniej dławik wykonany ze stali krzemowej może osiągnąć najmniejszą masę w niższym zakresie częstotliwości wynikającą z najwyższej gęstości strumienia nasycenia materiału.



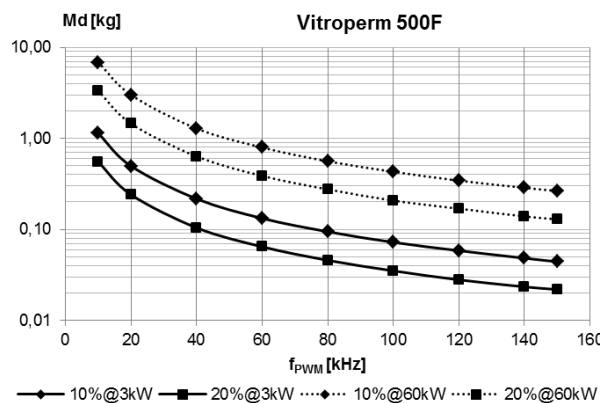
Rys. 4. Zależność całkowitej masy dławika od częstotliwości dla materiału 3C92 oraz sprawności 99,5%



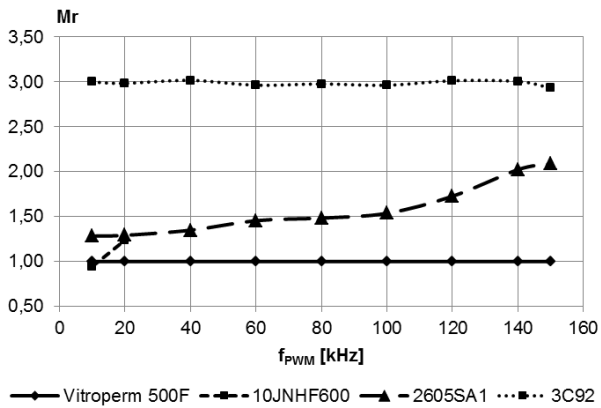
Rys. 5. Zależność całkowitej masy dławika od częstotliwości dla materiału 2605SA1 oraz sprawności 99,5%



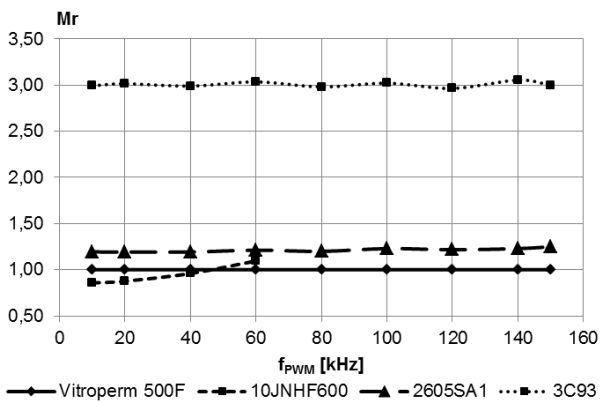
Rys. 6. Zależność całkowitej masy dławika od częstotliwości dla materiału 10JNHF600 oraz sprawności 99,5%



Rys. 7. Zależność całkowitej masy dławika od częstotliwości dla materiału Vitroperm 500F oraz sprawności 99,5%



Rys. 8. Zależność relatywnej masy dławika od częstotliwości modulacji dla mocy 3kW oraz tętnień prądu 20%. Baza odniesienia jest materiał Vitroperm 500F



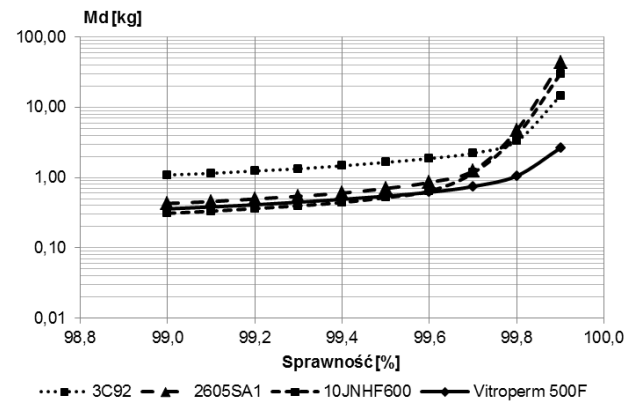
Rys. 9. Zależność relatywnej masy dławika od częstotliwości modulacji dla mocy 60kW oraz tętnień prądu 20%. Baza odniesienia jest materiał Vitroperm 500F

#### Wpływ uwzględnienia sprawności

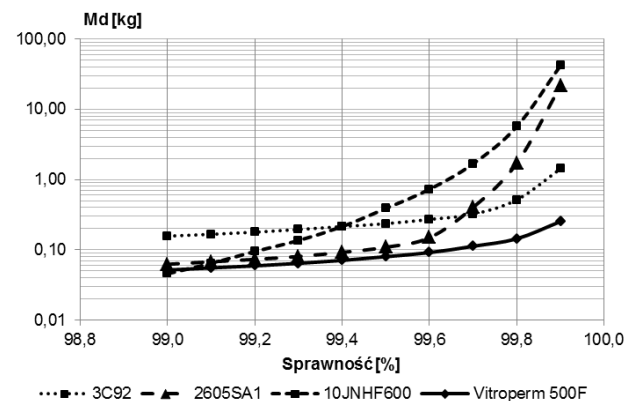
Dopełnieniem analizy wpływu warunków pracy na masę dławika jest wyznaczenie jej zmienności w zależności od wymaganej sprawności. Wyniki wskazują, że zmienność wagi dławika może nie podążać za trendem zmiany indukcyjności co jest wynikiem dominującego udziału strat mocy w rdzeniu. Prezentowana analiza została wykonana dla dwóch przypadków mocy układu równej 3kW i 60 kW oraz trzech częstotliwości pracy 10kHz, 50kHz i 100kHz. Wpływ sprawności został przeanalizowany w zakresie 99,0-99,9%. Dla potrzeb analizy uwolniony został warunek maksymalnej gęstości strumienia. Oznacza to że dławik może zostać zoptymalizowany w taki sposób, aby uzyskać minimum rozmiaru przy amplitudzie strumienia mniejszej niż dopuszczalna.

Wykresy przedstawione na rysunkach 10-12 obrazują wpływ zmiany sprawności na ciężar dławika dla 3kW układu o tężnieniu prądu 20% odpowiednio dla 10kHz, 50kHz oraz 100kHz. Generalnie, wzrost sprawności przekłada się na zwiększenie masy dławika. Dla sprawnych energetycznie materiałów takich jak ferryt i materiał nanokrystaliczny obserwowany jest mały wzrost masy dławika aż do 99,8%, powyżej tej wartości następuje zdecydowane zwiększenie masy. Dla materiałów o mniejszej sprawności takich jak stal krzemowa 10JNHF600 wzrost masy dławika jest o wiele silniejszy. Dla wyższych częstotliwości przyrost masy jest silniejszy niż dla małych. Dla 10 kHz obserwujemy klasyczny trend, gdzie do sprawności 99,6% wszystkie materiały podlegają ograniczeniu gęstością strumienia nasycenia, podczas gdy dla wyższej sprawności zauważalny jest silny wzrost masy dławików wykonanych z

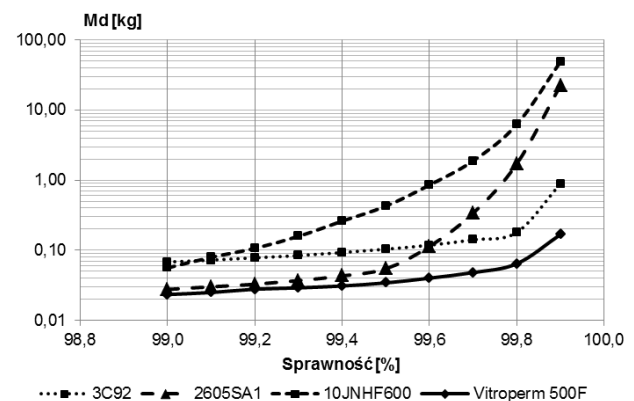
materiału amorficznego i stali krzemowej JFE. Powyżej sprawności 99,8% wszystkie materiały wykazują zdecydowany wzrost masy. Dla częstotliwości 50kHz oraz 100kHz sytuacja jest analogiczna, lecz ze względu na silną zależność strat mocy od częstotliwości zdecydowany wzrost masy dławików na bazie stali krzemowej i materiału amorficznego przesuwają się w rejon niższych sprawności. O ile dławik na bazie ferrytu charakteryzuje się największym ciężarem dla niskich częstotliwości i mniejszych sprawności, o tyle jest korzystnym rozwiązaniem gdzie wymagana jest wyższa sprawność lub częstotliwość modulacji eliminuje użycie materiałów laminowanych. Zdecydowanie najbardziej korzystnym materiałem w całym zestawieniu jest materiał nanokrystaliczny.



Rys. 10. Zależność masy dławika od jego sprawności dla częstotliwości 10kHz, mocy 3kW oraz tętnień prądu 20%

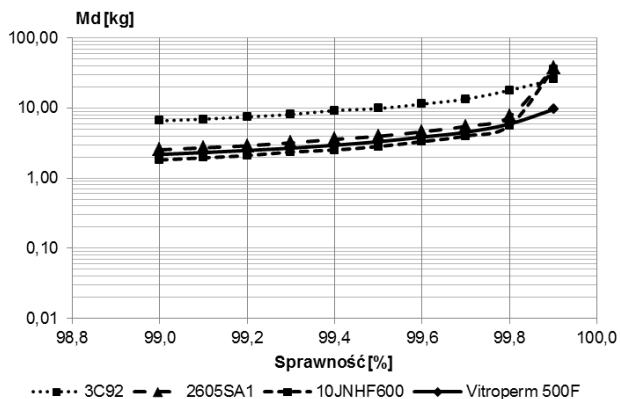


Rys. 11. Zależność masy dławika od jego sprawności dla częstotliwości 50kHz, mocy 3kW oraz tętnień prądu 20%

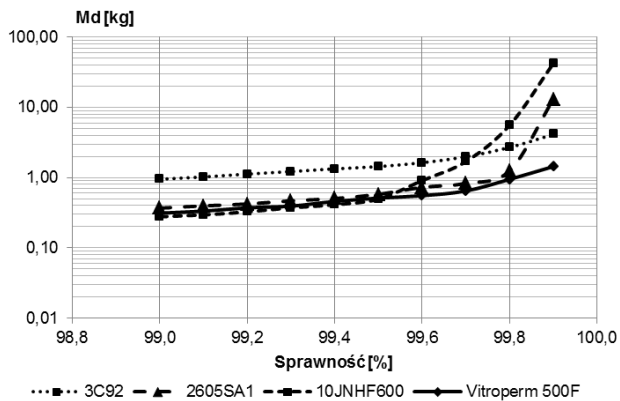


Rys. 12. Zależność masy dławika od jego sprawności dla częstotliwości 100kHz, mocy 3kW oraz tętnień prądu 20%

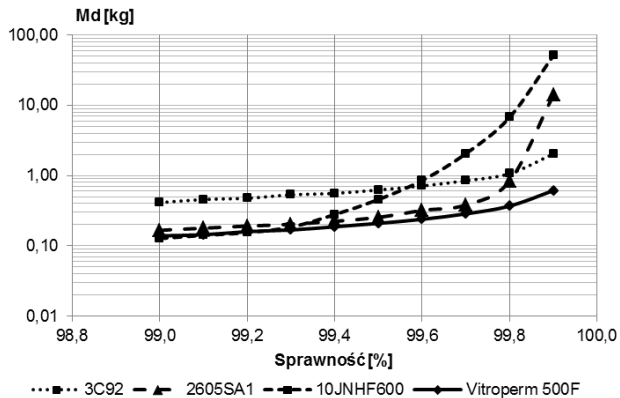
Na wykresach 13-15 przedstawiono wpływ sprawności na masę dławika dla 60kW układu o tętnieniu prądu 20% odpowiednio dla 10kHz, 50kHz oraz 100kHz. Analogicznie jak dla 3kW systemu następuje wzrost masy dławika wraz ze wzrostem sprawności. Wyraźny jest trend, gdzie wzrost masy dławika następuje dla wyższej sprawności niż miało to miejsce dla układu 3 kW. Przewagę w takim przypadku zyskują materiały o wysokiej gęstości strumienia nasycenia, gdyż wysoka moc układu pozwala również na wyższe straty. Dla sprawności do 99,8% w zakresie 10kHz dominującym materiałem jest stal krzemowa 10JNHF600, która pozwala na zbudowanie elementu o najmniejszej masie. Dla pozostałych częstotliwości sytuacja prezentuje się analogicznie.



Rys. 13. Zależność masy dławika od jego sprawności dla częstotliwości 10kHz, mocy 60kW oraz tętnień prądu 20%



Rys. 14. Zależność masy dławika od jego sprawności dla częstotliwości 50kHz, mocy 60kW oraz tętnień prądu 20%



Rys. 15. Zależność masy dławika od jego sprawności dla częstotliwości 100kHz, mocy 60kW oraz tętnień prądu 20%

## Podsumowanie

Prezentowana praca przedstawia trendy w zakresie doboru materiałów magnetycznych dla dławików filtra wyjściowego falownika pracującego na sieć. Zostały przedstawione generalne trendy związane z wymaganą indukcyjnością filtra, a następnie wykonano analizę wyboru materiałów magnetycznych. Analiza bazuje na uproszczonym modelu obliczeniowym uwzględniającym jednak ograniczenia wynikające z parametrów materiałów magnetycznych. W wyniku analizy został określony wpływ warunków pracy oraz sprawności dławika na jego masę.

W zależności od warunków pracy dławika może być on ograniczony przez maksymalną gęstość strumienia użytego materiału magnetycznego lub maksymalne straty mocy będące wynikiem strat zarówno w rdzeniu jak i uzwojeniu. Wyniki przedstawionej analizy wskazują, że wraz ze wzrostem częstotliwości pracy, straty mocy zaczynają odgrywać dominującą rolę. W efekcie zmienia to kolejność w szeregu optymalnych materiałów na rdzeń. Podobna zależność jest widoczna jeśli moc dławika wzrasta. Co za tym idzie, optymalny wybór materiału jest ściśle powiązany z warunkami pracy. Elementem dopełniającym obraz jest analiza wpływu sprawności dławika na jego rozmiar. Jest to kolejny parametr analizy, który wskazuje, że małe zmiany wymagań mogą za sobą pociągnąć znaczące zmiany wielkości dławika. Jeśli wymaganie sprawności zostanie zmniejszone, pozwala to na pełne wykorzystanie możliwości materiałów o wysokiej wartości nasycenia, dla których wielkość dławika może być mniejsza od wysoce sprawnych materiałów nanokrystalicznych.

Tabela 2. Parametry Steinmetza dla analizowanych materiałów magnetycznych

		20kHz	50kHz	100kHz	150kHz
Vitroperm 500F	$k_s$	1,419	12,004	3,469	0,00235
	$\alpha$	1,902	1,380	1,710	3,185
	$\beta$	1,918	2,096	2,096	2,111
2605SA1	$k_s$	112,391	35,133	28,523	-
	$\alpha$	1,322	1,617	1,670	-
	$\beta$	1,934	1,813	1,834	-
10JNHF600	$k_s$	19,354	118,187	101,133	-
	$\alpha$	2,160	1,585	1,585	-
	$\beta$	2,019	1,985	1,918	-
3C92	$k_s$	243,734	-	1,751	-
	$\alpha$	1,322	-	2,263	-
	$\beta$	3,419	-	3,070	-

## LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/72/WE z dnia 13 lipca 2009r.
- [2] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne.
- [3] Ustawa z dnia 26 lipca 2013 r. o zmianie ustawy – Prawo energetyczne oraz niektórych innych ustaw
- [4] Projekt ustawy o odnawialnych źródłach energii <http://www.konsultacje.gov.pl/node/3252>
- [5] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Annual Report 2014/15, Fraunhofer ISE
- [6] <http://www.sma.de>

- [7] <http://new.abb.com/solar>
- [8] <http://www.danfoss.com>
- [9] <http://sungrowpower.com/sungrow-english/>
- [10] Lorenz, L., "New power semiconductor components for future innovative high frequency power converters," Industrial Technology, 2003 IEEE International Conference on , vol.2, no., pp.1173,1177 Vol.2, 10-12 Dec. 2003
- [11] Beres, R.; Xiongfei Wang; Blaabjerg, F.; Bak, C.L.; Liserre, M., "A review of passive filters for grid-connected voltage source converters," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE , vol., no., pp.2208,2215, 16-20 March 2014
- [12] Carrasco, J.M.; Franquelo, L.G.; Galvan, E.; Guisado, R.C.P.; Prats, Ma.A.M.; Leon, J.I.; Moreno-Alfonso, N., "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.53, no.4, pp.1002,1016, June 2006
- [13] Peter Friedrichs, SiC Power Devices - Recent and Upcoming Developments, IEEE ISIE 2006, July 9-12, 2006
- [14] Stefanos Saridakis, Eftichios Koutroulis, Frede Blaabjerg, Optimization of SiC-Based H5 and Conergy-NPC Transformerless PV Inverters, *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, Vol. 03, No. 2, June 2015
- [15] Łukasz Stawiński, Miłosz Szarek, Andrzej Mondzik, Robert Stala, Adam Penczek, Jednofazowy system fotowoltaiczny dołączany do linii elektroenergetycznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 2, 218-222
- [16] Burger B., Kranzer D., Stalter O.: Cost reduction of PV-inverters with SiC-DMOSFETs, 5th International Conference on Integrated Power Systems (CIPS), pp. 1-5, 2008
- [17] Barlik R., Rąbkowski J., Nowak M., Przyrządy półprzewodnikowe z węgla krzemu (SiC) i ich zastosowania w energoelektronice, *Przegląd Elektrotechniczny*, 82 (2006), nr 11, 1-8
- [18] *IEEE Application Guide for IEEE Std. 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems*, IEEE 1547.2-2008, 2008.
- [19] Hamid R. Karshenas, Hadi Saghafi, Basic Criteria in Designing LCL Filters for Grid Connected Converters, *IEEE ISIE* 2006, July 9-12, 2006
- [20] Erika Twining; Holmes, D.G., "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," Power Electronics, IEEE Transactions on , vol.18, no.3, pp.888,895, May 2003
- [21] Beres, R.; Xiongfei Wang; Blaabjerg, F.; Bak, C.L.; Liserre, M., "A review of passive filters for grid-connected voltage source converters," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE , vol., no., pp.2208,2215, 16-20 March 2014
- [22] David O. Boillat, Thomas Friedli, Jonas Mühlethaler, Johann W. Kolar, Wolfgang Hriberniky, Analysis of the Design Space of Single-Stage and Two-Stage LC Output Filters of Switched-Mode AC Power Sources, Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2012 IEEE
- [23] Marco Liserre, Frede Blaabjerg, Steffan Hansen, Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, September/October 2005
- [24] Samuel Vasconcelos Araújo, Alfred Engler, Benjamin Sahan, Fernando Luiz Marcelo Antunes, LCL Filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines, The 7th International Conference on Power Electronics October 22-26, 2007 / EXCO, Daegu, Korea
- [25] Marek S. Rylko, Magnetic Materials and Soft-Switched Topologies for High-Current DC-DC Converters, A thesis presented to the National University of Ireland for the degree of Doctor of Philosophy, January, 2011
- [26] M.S. Rylko, B.J. Lyons, J.G. Hayes, M.G. Egan, "Revised magnetics performance factors and experimental comparison of high-flux materials for high-current dc-dc inductors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011
- [27] <http://www.vacuumschmelze.com/>
- [28] <http://www.metglas.com/>
- [29] <http://www.jfe-steel.co.jp/en/index.html>
- [30] <http://www.ferroxcube.com>
- [31] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics 2nd Edition*
- [32] Alex Van den Bossche, Vencislav Cekov Valchev, *Inductors and Transformers for Power Electronics*, CRC Press, 2005
- [33] Colonel Wm. T. McLyman, *Transformer and Inductor Design Handbook*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., 1988

---

**Autorzy:** Mgr inż. Miłosz Handzel, dtw Sp. z o.o., ul. Krakowska 390, 32-080 Zabierzów, E-mail: mh@dtw.com.pl;  
dr inż. Marek S. Rylko, dtw Sp. z o.o., ul. Krakowska 390, 32-080 Zabierzów, E-mail: mr@dtw.com.pl.