

## Analiza drgań rdzeni dławików gładzących stosowanych w układach prostownikowych.

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę drgań dławików gładzących pracujących w układach prostownikowych jednofazowych (jednokierunkowych i mostkowych) oraz trójfazowych (mostkowych i jednokierunkowych trój i sześciopulsowych). Tego rodzaju dławiki są powszechnie stosowane w układach przekształtnikowych, w których przez dławik płynie prąd o składowej stałej i przemiennej. Analizy wykonano dla różnych wartości prądu obciążenia i różnych kątów opóźnienia wyzwolenia tyrystorów (w przypadku układów sterowanych). Wykonano analizę harmoniczną drgań dla poszczególnych stanów pracy i przeanalizowano ich korelację z warunkami obciążenia.

**Abstract.** The article presents the analysis of vibration of smoothing reactors working in single-phase rectifier systems (unidirectional and bridge) and three-phase (bridge and one way, three and six pulse). These types of reactors are commonly used in converter systems, in which a constant and alternating current flows through the choke. The analyzes were performed for different values of the load current and different angles of the thyristor trigger delay (in the case of controlled systems). The harmonic analysis of vibrations for individual operating conditions was performed and their correlation with loading conditions was analyzed. **The analysis of vibration of smoothing reactors working in single-phase rectifier systems**

**Słowa kluczowe:** dławik gładzący, drgania, układy prostownikowe.

**Keywords:** smoothing reactor, vibrations, rectifier circuits.

### Wprowadzenie

Stosowane w układach przekształtnikowych dławiki można podzielić na grupy, biorąc pod uwagę składową stałą i przemiennej zarówno prądu płynącego w uzwojeniach jak i strumienia występującego w rdzeniu [1], [6], [7]. Jedną z grup są dławiki, w których przez uzwojenie płynie prąd pulsujący, zatem występuje w prądzie zarówno składowa stała jak i składowa przemienne, a w rdzeniu mamy również do czynienia z obydwo ma składowymi strumienia. Dławiki tego rodzaju są określane jako dławiki z nieskompensowaną składową stałą (NSS)[7]. Do tej grupy zaliczyć można dławiki gładzące prąd i dławiki ograniczające prądy obwodowe. W obydwu przypadkach składowa stała podmagnesowuje rdzeń dławika a stopień nasycenia rdzenia może mieć istotny wpływ na parametry dławika, np. na jego indukcyjność czy amplitudy drgań rdzenia i poziom emitowanego do otoczenia hałasu.

Przedmiotem przeprowadzonych analiz drgań były dławiki gładzące o konstrukcji kolumnowej i uzwojeniach umieszczonych na obydwu kolumnach. Prąd znamionowy badanych dławików wynosił 30A a indukcyjność 53mH.

### Dławik gładzący w układach prostownikowych

Podstawowym zadaniem dławika gładzącego pracującego w układach prostownikowych jest zmniejszenie pulsowania prądu obciążenia przez przejście składowej przemiennej napięcia wyprostowanego. Napięcie to zawiera oprócz składowej stałej, składową przemiennej odkształconą o różnej zawartości harmonicznym dla poszczególnych układów prostownikowych jedno i trójfazowych. Wartość średnia tego napięcia przy komutacji natychmiastowej może być obliczone ze wzoru (dla  $m_2 > 1$ ):

$$(1) \quad U_{s0} = \sqrt{2}U \frac{m_2}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_2}$$

gdzie:  $U$  – wartość skuteczna napięcia zasilającego,  $m_2$  – liczba pulsów po stronie obciążenia.

W tabeli 1 przedstawiono wartości średnie napięcia wyprostowanego ( $U_{s0}$ ) dla różnych typów układów prostownikowych niesterowanych odniesione do wartości skutecznej napięcia zasilającego i udział poszczególnych harmonicznym składowej przemiennej ( $U_n$ ) odniesionych

do wartości średniej napięcia wyprostowanego. Przykładowo, napięcie wyprostowane układu prostownikowego jednofazowego dwupołówkowego ( $m_2=2$ ) zawiera harmonicznym 2, 4, 6, 8 ...o amplitudach odpowiednio równych 47,2%, 9,42%, 4,05%, 2,25% wartości średniej napięcia wyprostowanego [2].

Tabela 1. Wartości średnie napięcia wyprostowanego i harmonicznym składowej przemiennej dla prostownikow o różnej liczbie pulsow po stronie obciążenia.

$m_2$	$U_{s0}/U$	Harmonicznym $U_n/U_{s0}$
	[-]	[%]
1	0,45	1 - 111,0
		2 - 47,1
		3 - 9,40
2	0,9	2 - 47,2
		4 - 9,42
		6 - 4,05
		8 - 2,25
		10 - 1,43
3	1,17	3 - 17,7
		6 - 4,05
		9 - 1,77
		12 - 0,99
6	1,35	6 - 4,05
		12 - 0,99
		18 - 0,44

W przypadku układow sterowanym wartość średnia napięcia wyprostowanego ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem kąta opóźnienia wyzwolenia tyrystorow. Dla układow trójfazowym można to opisać zależnością:

$$(2) \quad U_s = U_{s0} \cos \alpha$$

Przy kącie  $\alpha$  równym 90 stopni napięcie średnie wyprostowane osiąga wartość zero (dla obciążenia rezystancyjno indukcyjnego). Mamy do czynienia wówczas tylko ze składową przemiennej napięcia o amplitudzie [2]:

$$(3) \quad U_{przem} = \sqrt{2}U \sin \frac{\pi}{m_2}$$

Amplituda ta ma przebieg piłokształtny i zmniejsza się ze wzrostem liczby pulsow napięcia wyprostowanego.

Przy projektowaniu dławików gładzących dla układów sterowanych, należy dobierać dławik do możliwych najgorszych warunków pracy (maksymalnego napięcia przemiennego), a nie do kilkakrotnie mniejszego napięcia przemiennego przy kącie opóźnienia wyzwalania tyrystorów  $\alpha=0^\circ$ . W tabeli 2 przedstawiono wartości skuteczne harmonicznych składowej przemiennego dla  $\alpha=0^\circ$  i  $\alpha=90^\circ$  dla układu sześciopulsowego odniesione do napięcia  $U_{s0}$  [2].

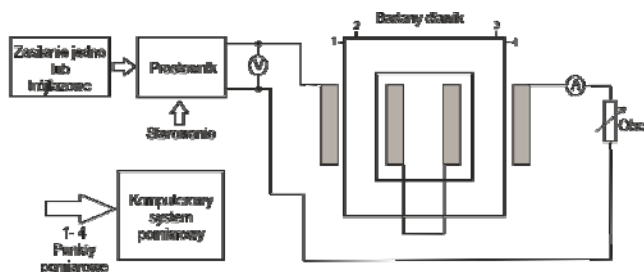
Tabela 2. Harmoniczne składowej przemiennego napięcia dla  $\alpha=0^\circ$  i  $\alpha=90^\circ$  dla układu sześciopulsowego odniesione do napięcia  $U_{s0}$

Harmoniczna		6	12	18
$\alpha=0^\circ$	[%]	4,05	0,99	0,44
$\alpha=90^\circ$	[%]	23,5	11,8	7,8

W normalnych warunkach pracy układu prostownikowego, strumień przemienny w rdzeniu dławika nakłada się na strumień stały, zwiększając indukcyjność wypadkową, czyli nasycenie rdzenia. Powoduje to zmniejszenie indukcyjności dławika, wzrost amplitudy drgań rdzenia i poziomu hałasu emitowanego do otoczenia [5].

### Układ pomiarowy

Pomiary drgań dławików gładzących wykonano w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 1. W zależności od rodzaju układu prostownikowego stosowano zasilanie jedno lub trójfazowe. Prąd płynący przez dławik regulowano poprzez zmiany obciążenia, maksymalnie do wartości prądu znamionowego. Pomiary drgań wykonywano czujnikiem piezoelektrycznym umieszczonym w punktach pomiarowych 1 - 4 (rys.1). W artykule prezentowane są przykładowe wyniki pomiarów drgań dla punktu pomiarowego nr 2 (na środku lewej kolumny w połowie grubości rdzenia). Zarejestrowane przebiegi czasowe prądów, napięć i drgań dla poszczególnych stanów obciążenia poddawano następnie analizie w komputerowym układzie pomiarowym.



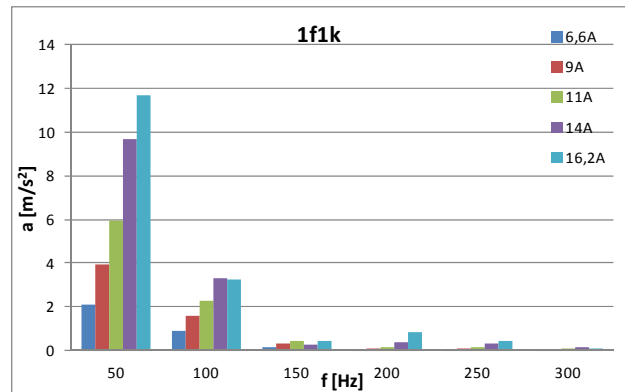
Rys.1. Schemat układu pomiarowego do badania drgań rdzenia dławików gładzących

### Układ prostownikowy jednofazowy jednokierunkowy

W układzie jednofazowym jednokierunkowym, przy braku dławika gładzącego i obciążeniu rezystancyjnym, prąd obciążenia odpowiada przebiegowi napięcia zasilającego i płynie tylko przez połowę okresu zmienności napięcia zasilającego. Przy odbiorniku RL i włączonym dławiku gładzącym prąd jest odkształcony, nieciągły i płynie także w czasie części ujemnej połówki zmienności napięcia zasilającego. Zawiera on harmoniczne będące wielokrotnością 50Hz, czyli 50, 100, 150, 200 ...Hz. Wynikają one z harmonicznych napięcia zasilającego przedstawionych w tabeli 1. Prąd ten przepływając przez uzwojenia dławika wytwarza strumień magnetyczny o identycznej zawartości harmonicznych, pobudzając rdzeń do drgań.

Na rysunku 2 przedstawiono pomierzone harmoniczne drgań w punkcie 2 rdzenia dla prądów obciążenia równych 6.6, 9, 11, 14 i 16,2A. Ich amplitudy wzrastają wraz

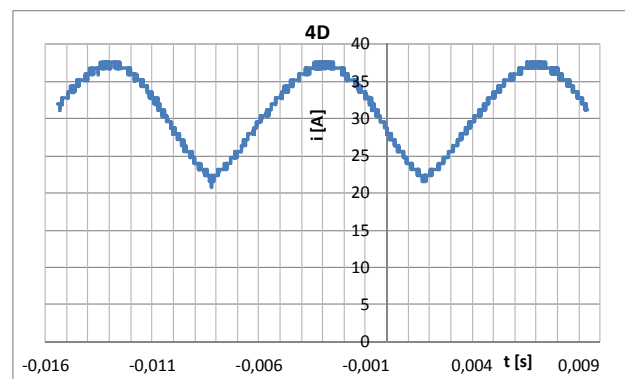
z prądem obciążenia, czyli nasyceniem rdzenia, wynikającym ze składowej stałej strumienia i składowych przemiennych dla poszczególnych harmonicznych. Należy zwrócić tutaj uwagę na fakt, że amplitudy drgań w tym przypadku są największe dla częstotliwości 50 i 100Hz (przyśpieszeniu  $12 \text{ m/s}^2$  odpowiada amplituda drgań  $121 \mu\text{m}$  dla 50Hz, a  $3,2 \text{ m/s}^2$  dla 100Hz amplituda  $8 \mu\text{m}$ ). Generowany przez nie hałas do otoczenia jest jednak stosunkowo słabo słyszalny przez ludzkie ucho, co wynika z krzywych korekcji A (dla 100 Hz współczynnik korekcji wynosi około 19dB, a dla 50 Hz 30dB) [3], [4].



Rys.2. Harmoniczne drgań w punkcie 2 rdzenia dla prądów obciążenia równych 6.6, 9, 11, 14 i 16,2A (układ jednofazowy, jednokierunkowy).

### Układ prostownikowy jednofazowy mostkowy

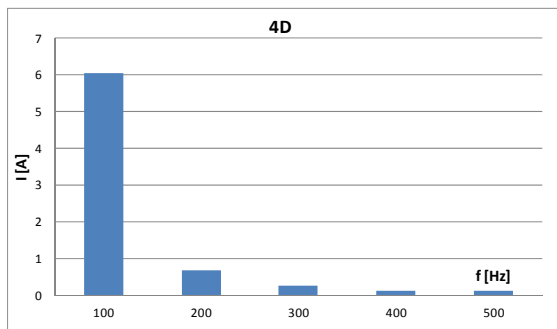
W układzie jednofazowym mostkowym z włączonym dławikiem gładzącym i obciążeniem rezystancyjnym indukcyjnym, przykładowy kształt prądu obciążenia przedstawiono na rysunku 3. Jest on ciągły, pulsujący i zawiera harmoniczne będące wielokrotnością 100Hz, czyli 100, 200, 300 ...Hz (Rys.4).



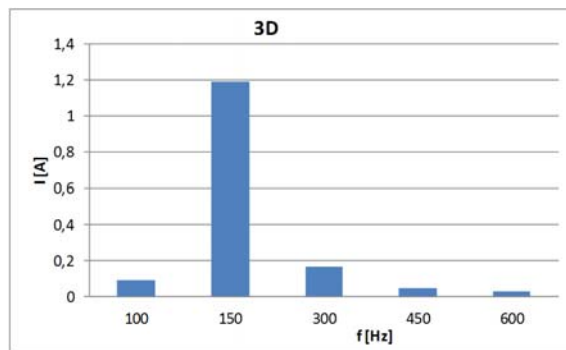
Rys.3. Prąd obciążenia układu prostownikowego jednofazowego, mostkowego (prąd obciążenia 28A).

Podmagnesowywany jednokierunkowo rdzeń dławika jest pobudzany do drgań harmonicznymi prądu wynikającymi z rysunku 3. Przy stałej indukcyjności dławika gładzącego, wzrost prądu obciążenia powoduje wzrost amplitudy drgań dla wszystkich harmonicznych (Rys.5). Amplitudy te, szczególnie dla częstotliwości 100 Hz przyjmują znaczne wartości (przyśpieszeniu  $6,7 \text{ m/s}^2$  odpowiada amplituda drgań  $17 \mu\text{m}$ ).

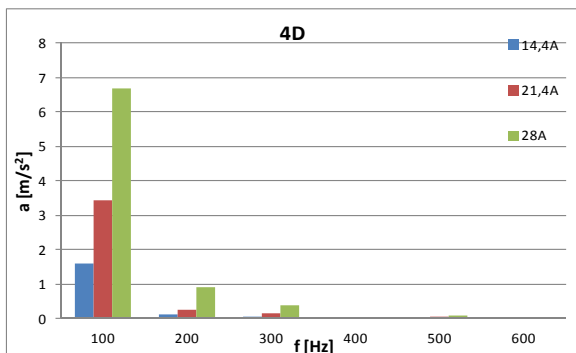
Wzrost indukcyjności dławika gładzącego powoduje zmniejszanie amplitud poszczególnych harmonicznych prądu, czyli w efekcie strumienia przemiennego w rdzeniu i amplitud drgań.



Rys.4. Harmoniczne prądu obciążenia układu prostownikowego jednofazowego, mostkowego (prąd obciążenia 28A).



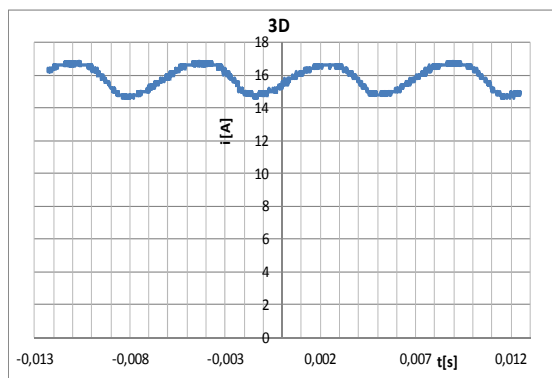
Rys.7. Harmoniczne prądu obciążenia układu prostownikowego trójfazowego, jednokierunkowego (prąd obciążenia 15,5A).



Rys.5. Harmoniczne drgań w punkcie 2 rdzenia dla prądów obciążenia równych 14,4, 21,4, 28A (układ jednofazowy, mostkowy).

#### Układ prostownikowy trójfazowy, jednokierunkowy (trójfazowy).

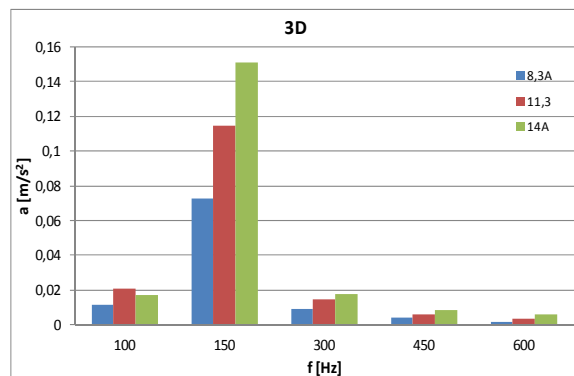
Dla układu prostownikowego trójfazowego, jednokierunkowego z dławikiem gładzącym, kształt prądu obciążenia przedstawiono na rysunku 6. Jest on ciągly, i zawiera harmoniczne 150, 300, 450 ...Hz (Rys.7). Ze względu na przebieg trójfazowego napięcia zasilającego układ prostownikowy, amplitudy poszczególnych harmonicznych prądu są zdecydowanie mniejsze od amplitud w układach jednofazowych. Generują one drgania rdzenia zdecydowanie mniejsze, niż w układach jednofazowych (Rys.8). Amplitudy tych drgań, podobnie jak dla układów jednofazowych, wzrastają dla poszczególnych harmonicznych ze wzrostem prądu obciążenia.



Rys.6. Prąd obciążenia układu prostownikowego trójfazowego, jednokierunkowego (prąd obciążenia 15,5A).

Przy wzroście indukcyjności dławika gładzącego można doprowadzić do stanu, w którym prąd obciążenia będzie całkowicie gładki i amplitudy prądów poszczególnych harmonicznych spadną praktycznie do

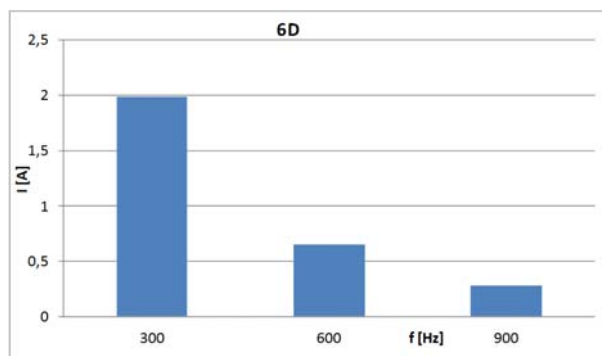
zera. Spowoduje to oczywiście także zanik harmonicznych drgań rdzenia, mimo silnego jednokierunkowego podmagnesowania. Przy niepełnym gładzeniu prądu, nawet niewielkie amplitudy drgań rdzenia dla poszczególnych harmonicznych, mogą powodować znaczny hałas emitowany przez dławik do otoczenia.



Rys.8. Harmoniczne drgań w punkcie 2 rdzenia dla prądów obciążenia równych 8,3, 11,3, 14A (układ trójfazowy, jednokierunkowy).

#### Układ prostownikowy trójfazowy mostkowy

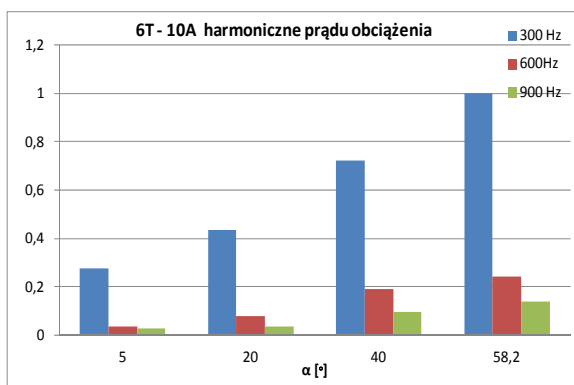
W układzie prostownikowym trójfazowym mostkowym pulsacje prądu obciążenia, ze względu na przebieg napięć zasilających dla układu 6 – pulsowego i odpowiadające im wartości amplitud wyższych harmonicznych (Tabela 1), są jeszcze mniejsze niż w układzie trójfazowym jednokierunkowym. Na rysunku 9 przedstawiono harmoniczne prądu obciążenia w rozpatrywanym układzie przy słabym gładzeniu prądu (300, 600, 900 ...Hz) i obciążeniu równym 27A.



Rys.9. Harmoniczne prądu obciążenia układu prostownikowego trójfazowego, mostkowego (prąd obciążenia 27A).

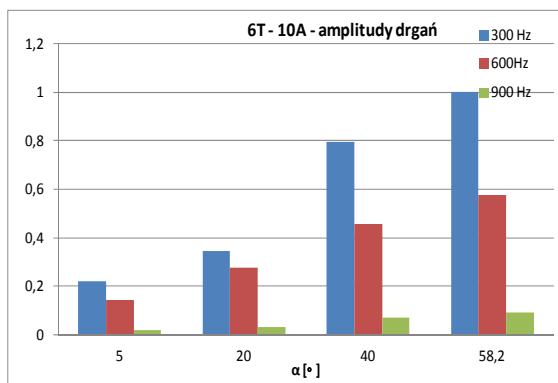
Wraz ze wzrostem indukcyjności dławika prąd obciążenia jest coraz bardziej wygładzony i amplitudy drgań wynikające z wyższych harmonicznych prądu ulegają zmniejszeniu. Jednak, ze względu na wyższe częstotliwości harmonicznych prądu obciążenia, już niewielkie amplitudy drgań mogą powodować generowanie uciążliwego dla otoczenia hałasu, którego częstotliwości zbliżają się do obszaru najlepszej słyszalności ucha ludzkiego (1000Hz).

W układach prostownikowych sterowanych, wzrost kąta opóźnienia wyzwolenia tyrystorów powoduje zwiększenie amplitud wyższych harmonicznych prądów. Na rysunku 10 przedstawiono zmianę amplitud harmonicznych 300, 600 i 900Hz w prądzie obciążenia mostka trójfazowego sterowanego dla kątów opóźnienia wyzwolenia tyrystorów równych 5, 20, 40 i 58 stopni i prądu obciążenia równego dziesięć amperów (w jednostkach względnych odniesionych do amplitudy dla 300Hz przy kącie opóźnienia równym 58 stopni). Zmiana kąta opóźnienia wyzwolenia tyrystorów w mostku w prezentowanym zakresie powoduje ponad trzykrotną zmianę amplitud poszczególnych harmonicznych prądów.



Rys.10. Zmiana amplitud harmonicznych prądów obciążenia dławika gładzącego dla częstotliwości 300, 600 i 900Hz mostka trójfazowego sterowanego dla różnych kątów opóźnienia wyzwolenia tyrystorów.

Ma to oczywiście wpływ na wzrost amplitud drgań rdzenia dławika w obwodzie obciążenia. Na rysunku 11 przedstawiono zmianę amplitud drgań w punkcie nr 2 rdzenia dławika gładzącego pracującego w omówionych wyżej warunkach (w jednostkach względnych odniesionych do amplitudy drgań dla 300Hz przy kącie opóźnienia wyzwolenia tyrystorów równym 58 stopni).



Rys.11. Zmiana amplitud drgań rdzenia dławika gładzącego dla częstotliwości 300, 600 i 900Hz mostka trójfazowego sterowanego dla różnych kątów opóźnienia wyzwolenia tyrystorów.

## Układ prostownikowy trójfazowy jednokierunkowy sześciopulsowy

W układzie trójfazowym jednokierunkowym sześciopulsowym przebieg napięcia wyjściowego jest identyczny jak w układzie trójfazowym mostkowym. Wszystkie omówione w poprzednim rozdziale cechy układu mostkowego można przenieść na układ trójfazowy jednokierunkowy sześciopulsowy.

## Podsumowanie

W stosowanych w układach przekształtnikowych dławikach gładzących przez uzwojenie płynie prąd pulsujący, zatem występują w prądzie zarówno składowa stała jak i składowa przemienna. Jednocześnie w rdzeniu dławika mamy również do czynienia ze składową prąd stałą i przemienną strumienia. Rdzeń jest pobudzany do drgań o częstotliwościach wynikających z częstotliwości składowej przemienną strumienia, czyli harmonicznych prądów. Amplitudy i częstotliwości tych drgań, a zatem i hałas emitowany przez rdzeń do otoczenia są uzależnione od rodzaju układu przekształtnikowego. Najgorsza sytuacja występuje w dławikach, w których przepływający prąd jest nieciągły (układy jednofazowe i sterowane). Amplitudy drgań są wówczas największe. Najlepsze warunki pracy dławików z punktu widzenia wibroakustycznego dają układy wielofazowe o dużej liczbie pulsów na wyjściu. Częstotliwości wyższych harmonicznych napięcia na wyjściu prostownika są wtedy powyżej 200 Hz, a ich amplitudy mają małe wartości. Wygładzenie prądu jest wtedy zdecydowanie łatwiejsze, niż dla układów jednofazowych o większych amplitudach wyższych harmonicznych i najistotniejszych częstotliwościach poniżej 200 Hz.

W najlepszej sytuacji prąd obciążenia prostownika może zostać całkowicie wygładzony i wówczas drgania dławika mają bardzo małą amplitudę, a co za tym idzie poziom emitowanego przez dławik hałasu jest praktycznie nieistotny.

**Autor:** dr inż. Krzysztof Majer, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: [krzysztof.majer@p.lodz.pl](mailto:krzysztof.majer@p.lodz.pl)

## LITERATURA

- [1] Jabłoński M.: Transformatory. Wydanie 3, Politechnika Łódzka, Łódź 1978.
- [2] Jabłoński M.: Przekształtniki (Static converters), Łódź 1978.
- [3] Krzysztof Majer: Wpływ podmagnesowania rdzenia na zawartość wyższych harmonicznych drgań i hałasu rdzeni transformatorów. Przegląd Elektrotechniczny 6/2011, str. 202-205.
- [4] Krzysztof Majer: Wpływ obciążenia układem prostownikowym na parametry wibroakustyczne transformatora. Przegląd Elektrotechniczny 4a/2012, str. 38-44.
- [5] Majer K., Szczerbanowski R., Wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na indukcyjność dławika gładzącego, VI Konferencja Transformatory specjalne i energetyczne, Kazimierz 2006.
- [6] Jabłoński M., Prosta metoda obliczania dławików z rdzeniami stalowymi stosowanych w przekształtnikach energetycznych, Rozprawy Elektrotechniczne, 1978, 24, z.1, s.55.
- [7] Szczerbanowski R., Przegląd dławików z rdzeniami ferromagnetycznymi stosowanych w układach przekształtnikowych, II Konferencja Transformatory specjalne i energetyczne, Kazimierz 1998.