

Tadeusz Glinka

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

## DŁAWIKI W FILTRACH KOMPENSACYJNYCH PASYWNYCH

### CHOKES IN PASSIVE COMPENSATION FILTERS

**Streszczenie:** Filtry pasywne wyższych harmoniczných są stosowane w sieciach elektroenergetycznych, do których są przyłączone nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej dużej mocy. Filtr pasywny jest układem szeregowym indukcyjności  $L$  i pojemności  $C$ , tak dobranych, aby dla pulsacji  $\omega_v$  były w rezonansie. Pojedynczy filtr składa się z dławika indukcyjnego i baterii kondensatorów. Zarówno dławiki jak i kondensatory powinny mieć znamionową moc pozorną dopasowaną do mocy harmonicznej, którą kompensują. Jeśli moc filtra jest za mała to istnieje zagrożenie przegrzania termicznego dławika bądź baterii kondensatorów. Rdzenie magnetyczne dławików są dzielone tak, aby w obwodzie magnetycznym było kilka szczelin powietrznych. Segmenty rdzeni w zmiennym polu magnetycznym drgają. Drgania te, przy słabym zamocowaniu rdzenia prowadzą do uszkodzenia mocowania i uszkodzenia uzwojenia. Załączono zdjęcia dławika z przegrzanym uzwojeniem i uszkodzonym mocowaniem rdzenia.

**Abstract:** Harmonic passive filters are used in power networks to which non-linear high-power electric energy receivers are connected. Passive filter is built as a series connection of inductance  $L$  and capacitance  $C$ , calculated for resonance at  $\omega_v$ . A single filter consists of an induction choke and a capacitor bank. Both, chokes and capacitors, should have a nominal apparent power adjusted to the harmonic power they compensate. If the filter power is too low, there is a risk of overheating of the choke or capacitor bank. The magnetic cores of the chokes are divided so that there are several air gaps in the magnetic circuit. Segments of cores in a variable magnetic field vibrate. These vibrations lead to damage of the mounting and damage of the winding, when the core is not poorly installed. Photos of the choke with overheated winding and damaged core are attached.

**Słowa kluczowe:** wyższe harmoniczne, filtry pasywne, dławiki, awarie

**Keywords:** higher harmonics, passive filters, chokes, failures

#### 1. Filtry wyższych harmoniczných

Nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej nie są kompatybilne z siecią elektroenergetyczną i innymi odbiornikami energii elektrycznej, gdyż generują do sieci wyższe harmoniczne prądu, które zakłócają sinusoidalny przebieg napięcia w sieci. Należą do nich przede wszystkim odbiorniki dużej mocy, takie jak hutnicze piece łukowe, prostowniki i falowniki zasilające silniki elektryczne. Wpływ odbiorników nieliniowych na odkształcenie napięcia sieci klasyfikuje się według współczynnika zwarcia  $k_z$ , zdefiniowanego jako stosunek mocy zwarcia sieci  $S_{zz}$  w punkcie przyłączenia odbiornika nieliniowego do znamionowej mocy pozornej odbiornika nieliniowego  $S_N$ , [3].

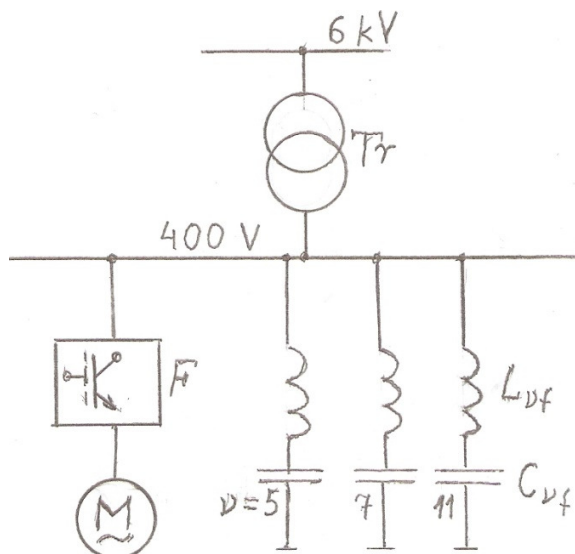
$$k_z = \frac{S_{zz}}{S_N}$$

Jeśli  $k_z > 200$ , to współczynnik odkształcenia napięcia

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_1} 100\%$$

nie przekracza wartości dopuszczalnych podanych w Rozporządzeniu [1] i filtrów wyższych harmoniczných można nie stosować. Jeśli ( $200 > k_z > 100$ ), to istnieje ryzyko przekroczenia dopuszczalnej wartości współczynnika  $THD_U$ , stosowanie przynajmniej jednego filtra dla najwyższej harmonicznej jest wskazane. Przy ( $k_z < 100$ ) stosowanie filtrów dla kilku harmoniczných o najwyższej wartości staje się konieczne. Na przykład układ napędowy o mocy 100 kW i napięciu 400 V, składający się z układu energoelektronicznego (prostownika bądź falownika) i silnika, jest zasilany z transformatora sieciowego o parametrach znamionowych: 1,5 MVA; 6/0,4 V;  $u_{z\%} = 6\%$ ; jak na rys. 1. Moc zwarcia sieci na napięciu 400 V, liczona z uwzględnieniem tylko impedancji transformatora, wynosi 25 MVA.

Współczynnik zwarcia  $k_z = 250$ , a więc nie ma ryzyka przekroczenia dopuszczalnej wartości odkształcenia napięcia  $THD_U$  dla innych odbiorców energii elektrycznej. W przypadku zasilania, z wymienionego transformatora, trzech podobnych układów napędowych o tej samej mocy, to współczynnik zwarcia obniży się ( $k_z = 83$ ). Pożądana jest zatem filtracja harmonicznymi o największej wartości.



Rys. 1. Schemat poglądowy filtracji wyższych harmonicznymi układu napędowego

Filtry pasywne wyższych harmonicznymi prądu są układami szeregowymi LC rezonansowymi i są włączane do sieci równolegle z odbiornikiem nieliniowym. Impedancja filtra dla harmonicznymi  $v$

$$Z_{vf} = \sqrt{R_{vf}^2 + \left( v\omega_1 L_{vf} - \frac{1}{v\omega_1 C_{vf}} \right)^2}$$

Dla częstotliwości rezonansowej

$$v\omega_1 L_{vf} - \frac{1}{v\omega_1 C_{vf}} = 0$$

$$Z_{vf} = R_{vf}$$

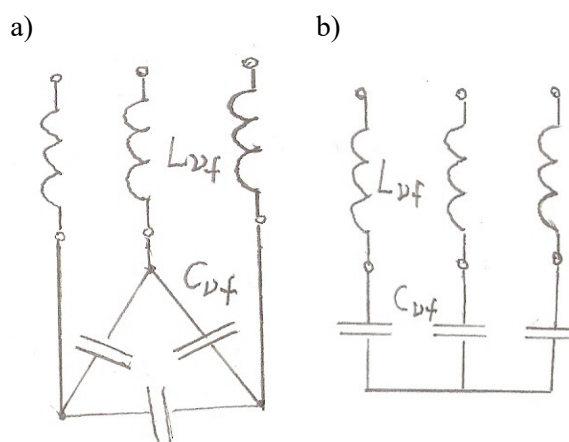
$R_{vf}$ ,  $L_{vf}$ ,  $C_{vf}$  – rezystancja, indukcyjność i pojemność filtra harmonicznymi  $v$ ,  $\omega_1$  – jest pulsacją napięcia sieci.  $R_{vf}$  – odwzorowuje straty mocy w dławiku i kondensatorze i może być wyliczona ze strat mocy w filtrze i wartości skutecznej prądu

$$R_{vf} = \frac{\Delta P_{filtra}}{3I_{filtra}^2}$$

Zadaniem filtra jest przejmować z sieci harmonicznymi prądu  $I_v$ . Funkcję tę filtr spełnia, gdy jego impedancja dla harmonicznymi  $v$  jest minimalna. Minimalną impedancję uzyskuje się gdy indukcyjność  $L_{vf}$  i pojemność  $C_{vf}$  filtra są w rezonansie. W praktyce częstotliwość rezonansową filtra  $f_{vf}$  ustawia się poniżej częstotliwości  $f_v$  harmonicznymi, którą kompensuje [2]

$$f_{vf} = (0,98 + 0,9)f_v$$

W układzie trójfazowym kondensatory mogą być połączone w trójkąt bądź w gwiazdę, jak to pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Układy połączenia kondensatorów w filtrze trójfazowym: a – w trójkąt, b – w gwiazdę

Impedancja filtra, dla podstawowej harmonicznymi napięcia ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ ), jest pojemnościowa

$$\left| \omega_1 L_v - \frac{1}{\omega_1 C_v} \right| \approx \frac{1}{\omega_1 C_v}$$

Filtry harmonicznymi  $v$  dla częstotliwości sieci  $f_1$  pełnią funkcję kompensatorów mocy biernej. Projektując filtry należy zbilansować moc bierną, aby nie przekompensować sieci i aby  $\cos\varphi$  sieci nie było pojemnościowe, gdyż napięcie sieci może wzrosnąć ponad wartość dopuszczalną i istnieje niebezpieczeństwo rezonansu równoległego. Rezonans równoległy dla harmonicznymi  $v$  powstaje w sieci, gdy reaktancja pojemnościowa baterii kondensatorów równa się z indukcyjnością sieci. Rezonans może być wzbudzany przez harmoniczne generowane przez układ napędowy. W rezonansie równoległym harmoniczne napięcia i prądy są wielokrotnie wzmacnione, co może skutkować uszkodzeniem filtra, przekształtnika

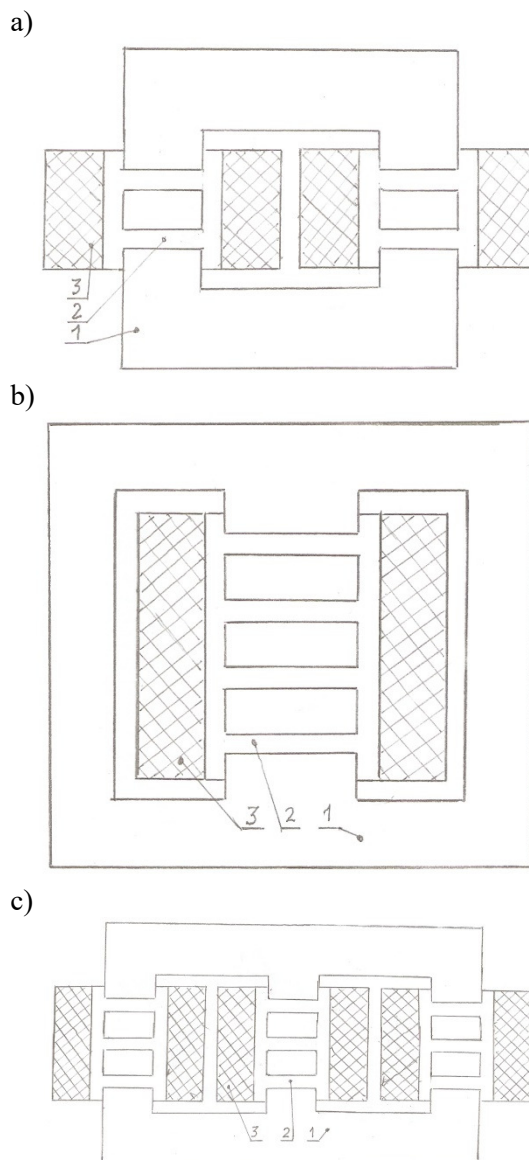
i innych odbiorników energii przyłączonych do sieci. Filtry pasywne wyższych harmonicznych powiększają koszty inwestycyjne i eksploatacyjne układu napędowego. Ich dobór, zakup i instalacja kosztuje, a w czasie eksploatacji w filtrach wydzielają się straty energii, które obniżają sprawność zainstalowanego napędu. Dobrze dobrane filtry, dopasowana moc bierna dławików i kondensatorów do mocy biernej harmonicznych, zapewniają bezproblemową pracę filtrów. Natomiast filtry o mocy za małej przegrzewają się i ulegają awarii.

## 2. Dławiki filtrów wyższych harmonicznych

Dławiki kompensacyjne są stosowane w sieciach elektroenergetycznych w układach filtrów wyższych harmonicznych, a także do kompensacji mocy biernej pojemnościowej, jeśli taka potrzeba zachodzi. Dławik składa się z rdzenia ferromagnetycznego, na którym jest umieszczone jedno uzwojenie. Rdzeń magnetyczny dławika, podobnie jak transformatora, wykonany jest z blachy transformatorowej anizotropowej izolowanej powierzchniowo izolacją ceramiczną. Rdzeń dławika jest przemagnesowywany z częstotliwością harmonicznej, którą kompensuje, a zatem powinien charakteryzować się małą stratnością. Obwód magnetyczny dławika musi być nienasycony, a jego indukcyjność powinna być stała. Uzyskuje się to budując obwód magnetyczny dławika ze szczelinami powietrznymi. Szczelin jest kilka, pokazano to na rys. 3. Dla powiększenia szczeliny, w kolumnie rdzenia, na której jest umieszczone uzwojenie, blachy układu się poprzecznie do strumienia. Strumień magnetyczny przy jednej dużej szczelinie wchodziłby do uzwojenia i wpływał na rozkład gęstości prądu w przekrojach przewodów, co zwiększałoby straty mocy w uzwojeniu. W celu ukierunkowania strumienia magnetycznego wzdłuż rdzenia, szczelina powietrzna jest dzielona.

Dławiki jednofazowe budowane są z rdzeniami dwukolumnowymi i trójkolumnowymi – rys. 3a,b. Dławiki trójfazowe są zwykle trójkolumnowe. Gabaryt dławika trójfazowego trójkolumnowego jest mniejszy od gabarytu trzech dławików jednokolumnowych. Dławiki trójfazowe stosuje się do filtracji harmonicznych ( $v = 6n \mp 1$ ). W prądach transformatorów zasilających piece łukowe w hutach występują także harmoniczne parzyste, np. ( $v = 2$ ). Dla

filtracji harmonicznej parzystej korzystnie jest stosować trzy dławiki jednofazowe bądź jeden dławik trójfazowy pięciokolumnowy. Uzwojenia dławików standardowo wykonane są z miedzi zwykle przewodem o przekroju profilowym izolowanym (lakier, szkło, nomex). Na rdzeniu dwukolumnowym uzwojenie składa się z dwóch cewek, a na rdzeniu trójkolumnowym z jednej cewki, jak to pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Budowa dławików: a – jednofazowego dwukolumnowego, b – jednofazowego trójkolumnowego, c – trójfazowego trójkolumnowego

## 3. Narażenie dławików na uszkodzenia

Uzwojenie i rdzeń dławika narażone są na działania termiczne i dynamiczne. Jak już powiedziano w filtrze powstają straty mocy

$$\Delta P_{filtra} = \frac{m}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_C$$

W dławiku rozprasza się moc w uzwojeniu  $\Delta P_{Cu}$  i rdzeniu  $\Delta P_{Fe}$ , a w kondensatorach moc  $\Delta P_C$ . Głównym źródłem strat mocy są napięcie i prąd podstawowej harmonicznej ( $v = 1$ ) i harmonicznej kompensowanej  $f_v$ . Wartość skuteczna pierwszej harmonicznej prądu determinuje pojemność kondensatora  $C_v$ , (przy połączeniu kondensatorów w trójkąt należy pojemności transformować na układ gwiazdy)

$$I_1 \approx \omega_1 C_v U_1$$

Harmoniczną prądu  $I_v$  determinuje impedancja

$$I_v = \frac{U_v}{Z_{vf}}$$

Straty mocy w filtrze

$$\Delta P_{filtra} \approx 3(U_{L1} I_1 \cos \varphi_1 + U_v I_v \cos \varphi_v)$$

Straty mocy w dławiku

$$\Delta P_L = \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe} \approx 3(U_{L1} I_1 \cos \varphi_1 + U_{Lv} I_v \cos \varphi_v)$$

Straty mocy w kondensatorach

$$\Delta P_C \approx 3(U_{C1} I_1 \cos \varphi_1 + U_{Cvf} I_{vf} \cos \varphi_{vf})$$

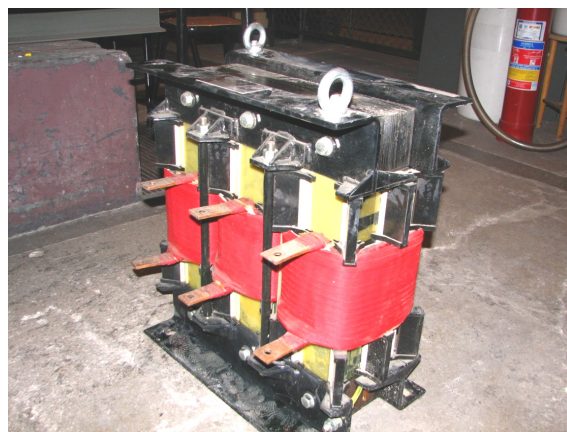
W filtrach zainstalowanych można zmierzyć napięcia na dławikach  $U_{L1}$ ,  $U_{Lv}$  i kondensatorach  $U_{C1}$ ,  $U_{Cv}$ , prądy  $i_1$  i  $I_v$  oraz moce  $\Delta P_{filtra}$ ,  $\Delta P_L$  i  $\Delta P_C$  weryfikując poprawny dobór filtra.

Rozdzielenie mocy strat w dławiku  $\Delta P_L$  na uzwojenie  $\Delta P_{Cu}$  i rdzeń  $\Delta P_{Fe}$  z danych pomiarowych nie jest możliwe. Obliczenie strat w uzwojeniu bazując na rezystancji uzwojenia  $R_{Cu}$  zmierzonej prądem stałym nie jest poprawne, gdyż rozkład gęstości prądu harmonicznego w przekrojach przewodów nie jest stały i straty mocy są większe. Straty te można obliczyć metodą elementów skończonych z rozkładu indukcji w rdzeniu i uzwojeniu. Obliczenia te nie są łatwe, gdyż rozkład gęstości prądu w przekroju każdego zwoju, w obrębie szczeliny, jest inny.

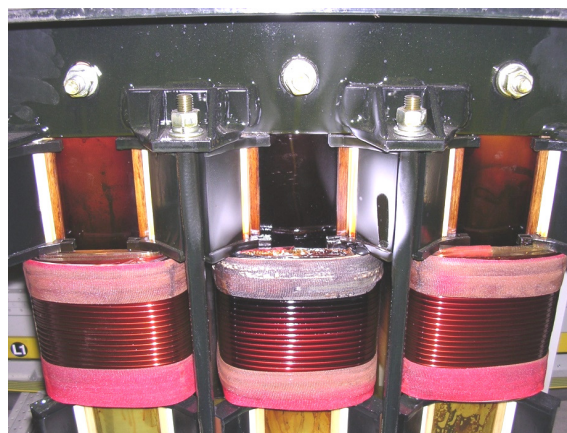
Energia strat w dławiku rozprasza się w formie ciepła

$$Q_L = \int_0^t \Delta P_L dt$$

Ciepło  $Q_L$  stwarza zagrożenie przegrzania uzwojenia i rdzenia. Na rysunku 4 przedstawiono dławik nowy, a na rysunkach 5 i 6 dławik i uzwojenie przegrzane. Przegrzaniu uległa cewka uzwojenia fazy środkowej, która jest słabo chłodzona. Przegrzewać może się także rdzeń.



Rys. 4. Nowy dławik trójfazowy



Rys. 5. Przegrzane uzwojenie i rdzeń dławika



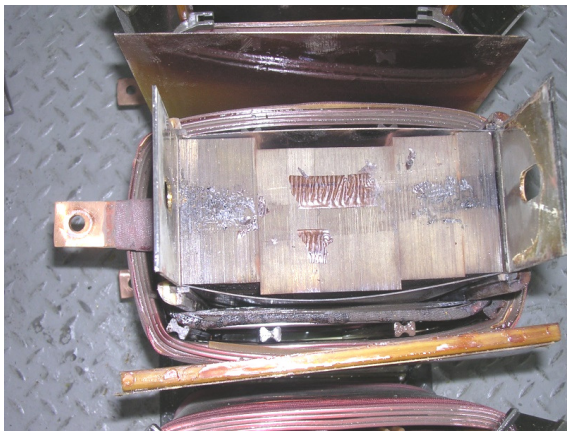
Rys. 6. Przegrzana cewka uzwojenia

W dławiku działają także siły dynamiczne na uzwojenie i na rdzeń. Prądy  $I_1$  i  $I_v$  wzbudzają strumień magnetyczny

$$\Phi(t) \approx N \left( \frac{l_1(t)}{R_{\mu 1}} + \frac{l_v}{R_{\mu v}} \right)$$

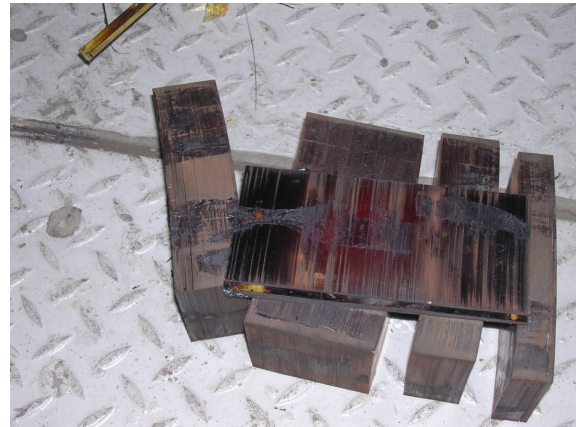
gdzie  $N$  jest liczbą zwojów uzwojenia, a  $R_{\mu 1}$  i  $R_{\mu v}$  reluktancjami obwodu magnetycznego.

Strumień  $\Phi(t)$  jest zmienny i wzbudza drgania o częstotliwości ( $2f_1 = 100$ ) Hz i o częstotliwości ( $2f_v$ ). Drgania te oddziałują zarówno na uzwojenie jak i na rdzeń. Uzwojenie jest impregnowane lakierem, który je zespala i mniej jest podatne na drgania. Natomiast rdzeń składa się z dzielonych segmentów umieszczonych w tulei izolacyjnej bądź obłożony płytami z tworzywa i skrępowanych taśmą. Fragmenty rdzenia drgają, co objawia się głośną pracą dławika, a z czasem pod wpływem drgań segmentów rdzenia zostaje zniszczone mocowanie rdzenia, wówczas segmenty rdzenia przemieszczają się na boki i uszkadzają izolację cewek powodując zwarcia zwojowe.



Rys. 7. Zniszczone mocowanie rdzenia i przesunięte fragmenty rdzenia

Na rysunku 7 pokazano segmenty rdzenia, które były poprzysuwane w stronę uzwojenia i uszkodziły izolację uzwojenia oraz miedź przewodów. Na rysunku 8 pokazano segmenty rdzenia i osłonę bakelitową z widocznymi odciskami blach i zmienioną barwą, co świadczy o jej przegrzaniu.



Rys. 8. Przegrzana osłona rdzenia

## Wnioski

Nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej generują wyższe harmoniczne prądu do sieci elektroenergetycznej, które zakłócają sinusoidalny przebieg napięcia sieci. Równolegle z odbiornikiem nieliniowym należy stosować filtry, które przejmują harmoniczne prądu.

Filtry pasywne są układami szeregowymi  $L$ ,  $C$  rezonansowymi.

Pojedynczy filtr składa się z dławika indukcyjnego i baterii kondensatorów. Zarówno dławiki jak i kondensatory powinny mieć znamionową moc pozorną dopasowaną do mocy harmonicznej którą kompensują. Jeśli moc filtra jest za mała to istnieje zagrożenie przegrzania termicznego dławika bądź baterii kondensatorów. Rdzenie magnetyczne dławików są dzielone tak aby w obwodzie magnetycznym było kilka szczelin powietrznych. Segmenty rdzenia w zmiennym polu magnetycznym drgają. Drgania te, przy słabym zamocowaniu rdzenia prowadzą do uszkodzenia uzwojenia.

Filtry pasywne wyższych harmonicznych powiększają koszty inwestycyjne i eksploatacyjne układu napędowego. Ich dobór, zakup i instalacja kosztuje, a w czasie eksploatacji w filtrach wydzielają się straty energii, które obniżają sprawność zainstalowanego napędu. Dobrze dobrane filtry, dopasowana moc bierna dławików i kondensatorów do mocy biernej harmonicznych, zapewniają bezproblemową pracę

filtrów. Natomiast filtry o mocy za małej przegrzewają się i ulegają awarii. Na rysunkach 5 do 8 pokazano dławik, który uległ awarii.

### Literatura

- [1]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 4 maja 2007 r. w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznych. (Dziennik Ustaw 93 z dnia 29 maja 2007, poz. 623).
- [2]. Warecki J., Gajdzica M.: Praktyka doboru filtrów harmonicznych dla układów zasilania pieców łukowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Electrical Engineering. Nr 84/2015, str. 45÷53.
- [3]. Zuchlsdorf P., Chojnowski P., Iwaniak A.: Kompensacja mocy biernej i tłumienie wyższych harmonicznych za pomocą aktywnych filtrów sieciowych. Wiadomości Elektrotechniczne. Nr 9/2001, str. 352÷354.
- [4]. PN-EN 60076 – 1 - Transformatory – Część 1: Wymagania ogólne.
- [5]. PN-EN 60076 – 2 - Transformatory – Część 2: Przyrosty temperatury dla transformatorów olejowych.
- [6]. PN-EN 60076 – 6 - Transformatory – Część 6: Dławiki.