

5.2. Zasady obliczania i konstruowania dławników

Z uwagi na konstrukcję dławiki można podzielić na dwie grupy:

- dławiki z naturalnym chłodzeniem powietrznym, czyli tzw. suche;

- dławiki z chłodzeniem olejowym, czyli olejowe.

Dławiki do ograniczania prądu w sieciach średnich napięć są z zasady wykonywane jako suche, wewnętrzne.

Z punktu widzenia materiałów izolacyjnych użytych do izolowania i mocowania uzwojeń, można rozróżnić następujące odmiany dławików:

- betonową, w której funkcję izolacji międzyzwojowej (lub międzycewkowej) oraz konstrukcji mocującej uzwojenia, spełniają przegrody betonowe;

- porcelanową;

- drewnianą, w której jako materiał izolacyjny i mocujący uzwojenia, są użyte impregnowane klocki drewniane (najczęściej dębowe);

- żywiczną (np. z użyciem żywicy epoksydowej).

Izolacja główna dławika (tj. uzwojenie względem ziemi, bądź względem sąsiednich faz) jest najczęściej realizowane przy użyciu izolatorów porcelanowych bądź żywicznych.

Dławiki, ograniczające prądy zwarciove, są budowane zazwyczaj jako betonowe bądź porcelanowe. Jako materiał przewodzący stosuje się miedziane lub aluminiowe taśmy, linki względnie płaskowniki.

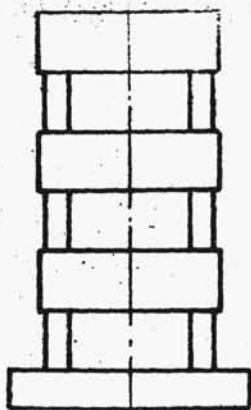
Zestawy trójbiegunowe są rozmieszczane pionowo, jeden nad drugim (rys.5.4a) lub obok siebie (rys.5.4b).

W pracy dławika można rozróżnić dwa stany: pracę długotrwałą w normalnych warunkach obciążeniowych oraz krótkotrwały stan zwarcia.

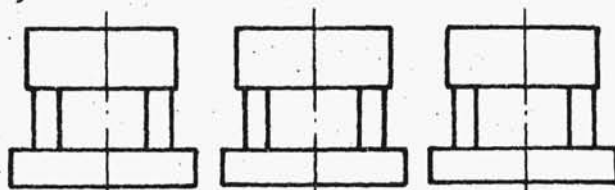
W warunkach pracy długotrwałej, dławik powinien poprawnie przewodzić prądy obciążeniowe w zakresie do wartości znamionowego prądu ciągłego, a jego izolacja główna powinna wytrzymać w sposób ciągły najwyższe napięcie robocze, jak również występujące w eksploatacji przepięcia.

Przy przepływie prądu zwarciovego w dławiku występują na-
rażenia mechaniczne (wywołane siłami oddziaływania elektrody-
namicznego) oraz ciepłne (wzrost temperatury uzwojeń dławika).

a)



b)



Rys.5.4. Rozmieszczenie trójfazowego zestawu dławików a) pio-
nowe, b) poziome

Ponadto powstają znaczne naprężenia napięciowe izolacji szere-
gowej dławika (międzyzwojowej i międzycewkowej), gdyż strata
napięcia na uzwojeniu dławika wzrasta niemal do wartości na-
pięcia fazowego.

Indukcyjność dławika dobiera się w zależności od przyję-
tego napięcia zwarcia.

Dobierając izolację dławika należy rozpatrzyć zarówno
izolację główną jak i szeregową. Zagadnienie izolacji głównej
sprowadza się do doboru odpowiednich izolatorów porcelanowych
(względnie żywicznych), dostosowanych do znamionowego napię-
cia izolacji dławika oraz do przewidywanego obciążenia me-
chanicznego, wywołanego masą dławika i siłami elektrodynamicz-
nymi.

Punktem wyjścia do obliczeń izolacji szeregowej będzie
określenie napięć międzyzwojowych, międzywarstwowych i ewen-
tualnie międzycewkowych, występujących przy przepływie prądu
zwarciovego. Umożliwi to wyznaczenie dla przyjętego systemu
izolacji oraz zastosowanych materiałów wymaganych grubości
izolacji zwojowej i warstwowej, odstępów pomiędzy cewkami
po powierzchni izolacji i w powietrzu. Przy obliczeniach te-

go rodzaju należy się kierować ogólnymi zasadami stosowanymi w technice izolacji.

Obliczenia cieplne dławików są prowadzone dla dwóch przypadków:

- przy przepływie prądu ciągłego,
- przy przepływie prądu zwarciowego.

W obu przypadkach kryterium dopuszczalnej wartości prądu jest dopuszczalny przyrost temperatury przewodu bądź jego izolacji (przy przewodach izolowanych).

Obliczenia cieplne przy prądzie długotrwałym są w niektórych przypadkach kłopotliwe. Jeśli poszczególne zwoje dławika znajdują się w powietrzu w niewielkiej odległości względem siebie, warunki oddawania ciepła ulegają pogorszeniu, a temperatura przewodu zależna jest od położenia zwoju w cewce. Korzystanie w tym przypadku ze wzoru Newtona dla przewodu odosobnionego (patrz p.2.3 w [1]) prowadziłoby do zbyt dużych błędów. Pogorszenie warunków oddawania ciepła przez poszczególne zwoje, wywołane wzajemnym ekranowaniem, można w sposób przybliżony uwzględnić przez wprowadzenie do obliczeń współczynnika $\beta < 1$ zmniejszającego powierzchnię oddawania ciepła ($F_{od} = \beta F_{rz}$). Dla uzwojeń, w których odstęp między przewodami są porównywalne z wymiarami przewodu, można orientacyjnie przyjąć $\beta = 0,5 - 0,7$.

Obliczenia cieplne przy przepływie prądu zwarciowego prowadzą się do wyznaczania przekroju przewodu dławika przy określonym prądzie krótkotrwałym. Zasady obliczenia podane są np. w p.2.7 w [1].

Przy przepływie prądów zwarciowych konieczne jest sprawdzenie maksymalnych narażeń mechanicznych wywołanych prądem uderowym.

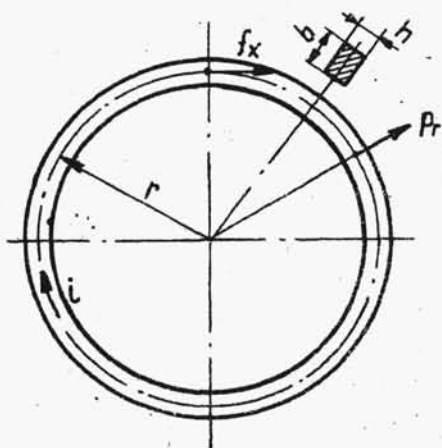
W przypadku, gdy uzwojenie dławika można traktować jako monolit, tj. sztywną jednolitą mechanicznie całość, w której nie występują żadne przemieszczenia wewnętrzne poszczególnych zwojów i warstw, obliczanie sprowadza się do wyznaczenia siły działającej promieniowo i powodującej rozrywanie uzwojenia. Zgodnie z p.3.11 w [1] siła w kierunku promieniowym (na jednostkę długości) wynosi:

$$p_r = \frac{\mu_0}{4\pi r} i^2 z^2 \ln\left(\frac{8r}{\rho_{sr}} - 1\right), \quad (5.5)$$

a średnie naprężenie rozrywające:

$$\sigma_{sr} = \frac{\mu_0}{4\pi S} i^2 z^2 \ln\left(\frac{8r}{\rho_{sr}} - 1\right), \quad (5.6)$$

przy czym:



Rys.5.5. Siły oddziaływania w uzwojeniu monolitycznym

- r - zastępczy średni promień cewki (rys.5.5),
- ρ_{sr} - średni odstęp geometryczny zastępczego przekroju; dla przypadku z rys.5.5 $\rho_{sr} = 0,22(b+h)$,
- S - przekrój (łączny) miedzi uzwojenia,
- z - liczba zwojów cewki.

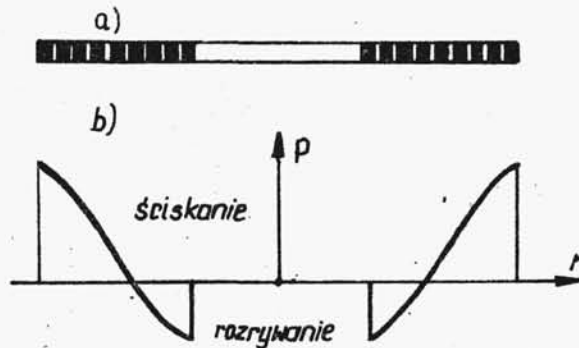
W przypadku, gdy uzwojenia dławika nie można traktować jako monolitu, konieczne jest rozpatrzenie sił występujących w poszczególnych zwojach. W uzwo-

jeniu, w którym występuje kilka warstw, a każda z warstw zawiera określoną liczbę zwojów, należy uwzględnić następujące siły oddziaływania:

- w kierunku promieniowym, jakiego doznaje określony zwoj od prądu płynącego w tym zwoju,
- w kierunku promieniowym, jakiego doznaje określony zwoj od prądu płynącego w zwojach tej samej warstwy,
- zarówno w kierunku promieniowym jak i osiowym od prądu płynącego w zwojach pozostałych warstw.

W uzwojeniu jednowarstwowym (rys.5.6a) występować będą siły oddziaływania jedynie w kierunku promieniowym, z tym, że siła działająca na określony zwoj będzie sumą algebraiczną siły wywołanej prądem płynącym w rozpatrywanym zwoju i siły oddziaływania od prądu w zwojach sąsiednich. Przykładowy rozkład obciążenia jednostkowego w kierunku promieniowym przed-

stawiono na rys.5.6b. Z rozkładu tego wynika, że wewnętrzne zwoje są rozrywane, a zewnętrzne ściskane. Największa siła promieniowa wystąpi w zwojach skrajnych. W uzwojeniach wielowarstwowych (rys.5.7a) wystąpią siły zarówno w kierunku pro-



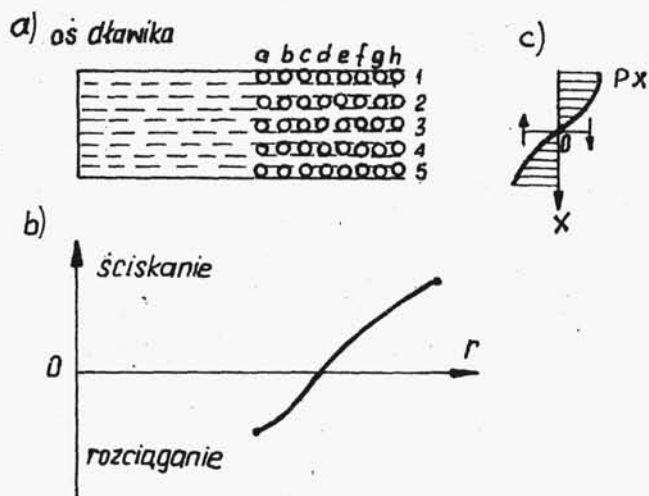
Rys.5.6. Siły oddziaływania w uzwojeniu jednowarstwowym a) rysunek uzwojenia, b) rozkład obciążenia jednostkowego

mieniowym jak i osiowym. Na rys.5.7b i rys.5.7c przedstawiono przykładowe rozkłady obciążeń jednostkowych w wybranych warstwach i rzędach. Największe obciążenie jednostkowe w kierunku promieniowym występuje w warstwie środkowej, gdyż dla tej warstwy jest największe oddziaływanie w kierunku promieniowym od prądu w warstwach pozostałych. Siły osiowe osiągają wartości maksymalne w zwojach warstw zewnętrznych, dla których sumują się arytmetycznie siły od prądów we wszystkich warstwach.

Ostatecznie obliczenie wytrzymałościowe sprowadza się do sprawdzenia naprężenia od sił w kierunku promieniowym oraz do sprawdzenia naprężenia zginającego wywołanego siłami w kierunku osiowym.

Bliższe dane na temat obliczania poszczególnych składowych sił znajdzie Czytelnik w [1].

Obliczenie wymiarów dławika o określonej indukcyjności możliwe jest jedynie drogą kolejnych przybliżeń przez podstawienia do wzoru na indukcyjność, w którym wymiary uzwojenia występują w uwikłanej formie. Jednym z najprostszych wzorów do wyznaczenia indukcyjności [2] dla uzwojenia o geometrii jak na rys.5.8a, o przekroju całkowicie wypełnionym materiałem przewodzącym, jest zależność:



Rys.5.7. Siły oddziaływania w uzwojeniu wielowarstwowym a) rysunek uzwojenia, b) rozkład obciążenia jednostkowego promieniowego w warstwie 3, c) rozkład obciążenia jednostkowego osiowego w rzędzie h

$$L = \frac{\mu_0}{4} z^2 d_{sr} \psi_1, \quad (5.7)$$

gdzie:

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ - przenikalność magnetyczna próżni,

z - liczba zwojów uzwojenia,

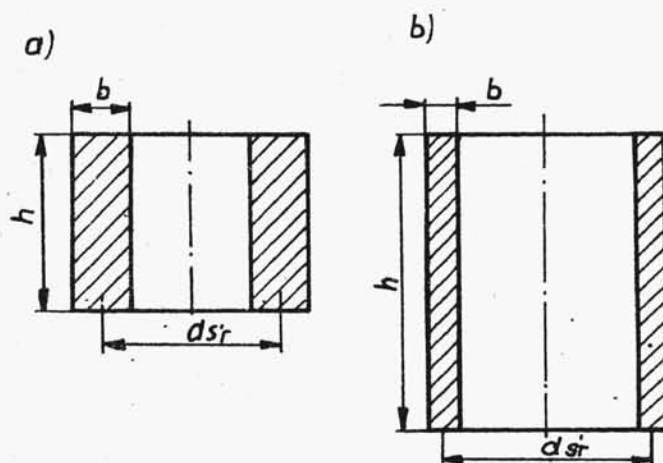
d_{sr} - średnia średnica uzwojenia,

$\psi_1 = f\left(\frac{h}{d_{sr}}; \frac{b}{d_{sr}}\right)$ - współczynnik o wartości

zależnej od wymiarów uzwojenia, przedstawiony na rys.5.9.

W przypadku uzwojenia, w którym wysokość h jest znacznie większa od szerokości b (rys.5.8b), indukcyjność można wyliczyć ze wzoru:

$$L = \frac{\mu_0}{4} z^2 d_{sr} \psi_2, \quad (5.8)$$



Rys.5.8. Kształty uzwojeń dławików

gdzie:

$$\psi_2 = f\left(\frac{b}{d_{sr}}\right) - \text{współczynnik o wartości zależnej od wymiarów uzwojenia, przedstawiony na rys.5.10.}$$

Jeżeli stopień wypełnienia przekroju uzwojenia materiałem przewodzącym jest niewielki, zachodzi konieczność obliczenia poprawki zmniejszającej wartość indukcyjności w stosunku do podanych wyżej wzorów.

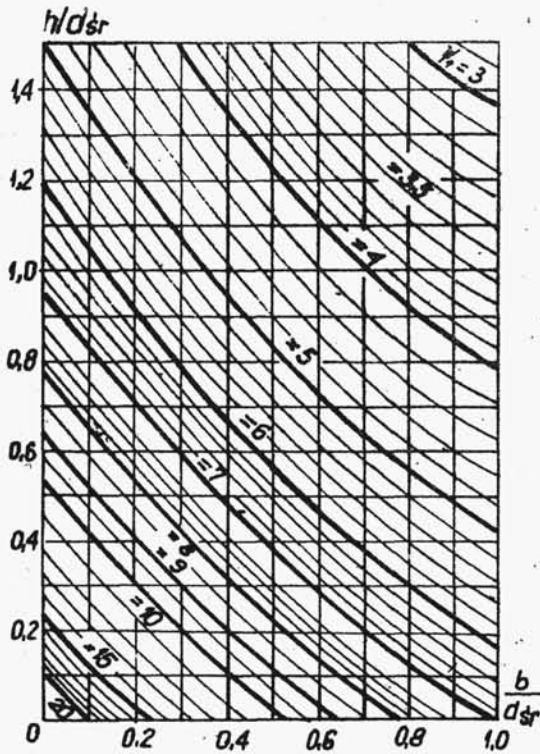
Niekiedy dławiki budowane są w postaci zestawów kilku oddzielnych cewek, najczęściej płaskich i umieszczonych współosiowo.

Dla zestawu dwóch jednakowych i zgodnie połączonych cewek (rys.5.11) indukcyjność wypadkowa wyrazi się wzorem:

$$L_w = 2(L + M_{12}) . \quad (5.9a)$$

W przypadku przeciwnego nawinięcia obu cewek indukcyjność wypadkowa będzie:

$$L_w = 2(L - M_{12}), \quad (5.9b)$$



Rys.5.9. Zależność $\psi_1 = f\left(\frac{h}{d_{sr}}, \frac{b}{d_{sr}}\right)$

gdzie:

- L - indukcyjność własna pojedynczej cewki,
- M_{12} - indukcyjność wzajemna obu cewek.

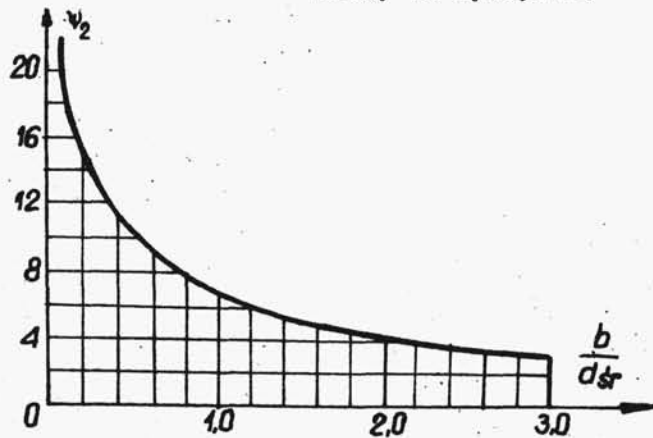
Indukcyjność wzajemna dwu jednakowych i współosiowych cewek może być wyznaczona ze wzoru wg [2]:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} z^2 d_{sr} \Phi, \quad (5.10)$$

przy czym:

$$\Phi = f\left(\frac{b}{d_{sr}}; \frac{x}{d_{sr}}\right)$$

- współczynnik o wartości zależnej od wymiarów uzwojeń i odległości pomiędzy nimi, przedstawiony na rys.5.12.

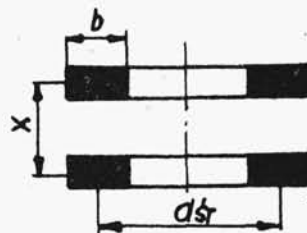


Rys.5.10. Zależność $\psi_2 = f\left(\frac{b}{d_{sr}}\right)$

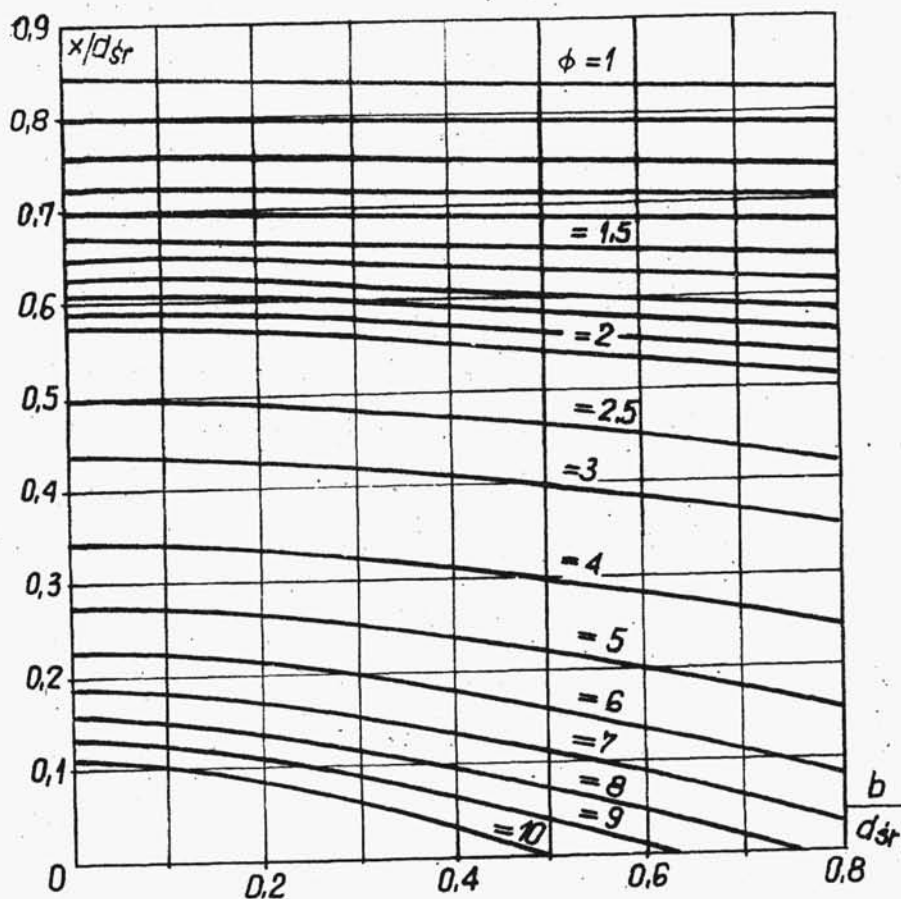
Wzory do obliczeń indukcyjności wzajemnej dla różnych przypadków wzajemnego położenia cewek oraz z uwzględnieniem wysokości uzwojeń, może Czytelnik znaleźć w [1].

Przy n cewkach połączonych zgodnie, indukcyjność zestawu wynosi:

$$L_w = \sum_{k=1}^n L_k + \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n M_{ki} (k \neq i). \quad (5.11)$$



Rys.5.11. Układ dwóch cewek sprzężonych magnetycznie



Rys.5.12. Zależność $\Phi = f \frac{b}{d_{sr}} \frac{x}{d_{sr}}$