

**Jacek Dziura**  
TRAFTA, Myszków

## NOWOCZESNE WARIANTY DŁAWIKÓW KOMPENSACYJNYCH W SIECIACH ŚREDNICH NAPIĘĆ

### MODERN VARIANTS OF SHUNT REACTORS IN MIDDLE VOLTAGE NETWORKS

**Streszczenie:** W ostatnim czasie coraz większego znaczenia nabierają aspekty jakości energii elektrycznej, jak i minimalizacji kosztów związanych z użytkowaniem sieci. W obliczu konkurencji występującej również na rynku wytwarzania, przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, szczególnie przy znacząco rosnących cenach surowców jak i kosztach związanych z emisją zanieczyszczeń, zagadnienia jak najefektywniejszego procesu dostarczania energii są kluczowe dla zabezpieczenia swej pozycji rynkowej. Dławiki kompensacyjne instalowane w sieciach mają za zadanie poprawę współczynnika mocy, a tym samym obniżenie strat powstających podczas przesyłu energii. Istotne jest także zapewnienie, by kompensacja była odpowiednia do aktualnego stanu sieci i nadążała za jej zmianami. Artykuł opisuje warianty dławików wprowadzonych ostatnio do produkcji i eksploatacji pozwalające na nadążną i efektywną kompensację mocy biernej

**Abstract:** In recent times the aspects of electrical energy quality and cost related to operation of electrical networks get the higher importance. For the markets of electrical energy generation, transmission and distribution operating in competition environment it is crucial to secure the effectiveness of the energy supply process, especially when the fuel prices and charges for emission are significantly rising. Shunt reactors which are installed in electrical networks to increase the power factor and hence to minimize the loss related to energy transmission. It is also essential to secure that compensation is adequate to the current state of a network and follows its changes. The paper describes the variants of shunt reactors recently introduced for production and operation which allow to compensate the reactive power in follow-up and effective way

**Słowa kluczowe:** dławiki, kompensacja mocy biernej

**Keywords:** reactors, compensation of reactive power

#### 1. Wstęp

Współczesne systemy przesyłu i rozdziału energii elektrycznej coraz częściej bazują na liniach kablowych. Są one bezpieczniejsze w użytkowaniu, mniej awaryjne od linii napowietrznych oraz w mniejszym stopniu zaburzają walory krajobrazowe. Niestety, jednocześnie posiadają znacznie większą pojemność niż linie napowietrzne, z czym wiąże się większy prąd upływu, a tym samym zwiększone straty podczas przesyłania energii. Z uwagi na ten aspekt korzystne jest, by elementy kompensujące pojemności linii były rozmieszczone stosunkowo gęsto. Z tego też powodu coraz częściej potrzebne są dławiki średniego napięcia o mocach kompensacyjnych od kilkudziesięciu do kilku tysięcy kilowarów.

Inną cechą współczesnych systemów jest duża dynamika zmian obciążenia. Przykładem takim są systemy zasilania trakcji kolejowej, które w chwili przejazdu pociągu stanowią odbiór o charakterze indukcyjnym, a w pozostałych

okresach o charakterze wyraźnie pojemnościowym. Na liniach kolejowych o dużych prędkościach zmiany takie mają charakter częsty i szybki. W takich przypadkach dławiki z mechaniczną regulacją szczeliny są zbyt wolne, a z kolei dławiki z podobciążeniowymi przełącznikami zaczepów są z kolei, w rozpatrywanym zakresie mocy, zbyt duże, zbyt drogie i zwykle nie zapewniają odpowiedniej głębokości regulacji.

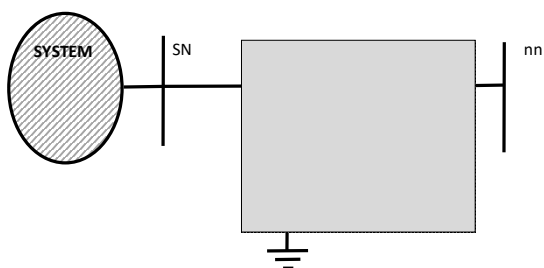
Innym ważnym aspektem jest także miejsce, bardzo często mocno ograniczone, w istniejących, modernizowanych stacjach zasilających, gdzie dostawienie kolejnego urządzenia (dławika) jest utrudnione. Problem ten dotyka także nowych stacji, gdzie z technicznego punktu widzenia kolejne urządzenie można dostawić, ale wymaga to zwiększonych nakładów kapitałowych – grunt o większej powierzchni, większe obiekty budowlane. W istniejących stacjach najczęściej był przewidziany transformator po-

trzeb własnych, przeważnie o mocy około 100 kVA, zasilających obwody pomocnicze stacji. W proponowanym rozwiązaniu przestrzeń zajmowaną przez transformator potrzeb własnych wykorzystuje się do posadowienia dławika, który dodatkowo posiada uzwojenie potrzeb własnych mogące zasiląć potrzeby stacji. W omawianym przypadku oprócz zasilania potrzeb własnych uzwojenie to wykorzystywane może być do regulacji przepływu mocy biernej przez dławik.

## 2. Właściwości eksploatacyjne dławików z uzwojeniami potrzeb własnych

### 2.1. Wyznaczanie prądów zwarcia

Dławiki z uzwojeniem potrzeb własnych łączą funkcje typowego dławika kompensacyjnego i transformatora. Na schematach systemu elektroenergetycznego można je przedstawić w sposób następujący (Rys.1). Kontur otaczający schemat dławika i transformatora oznacza umieszczenie obu tych cech w jednym urządzeniu.



Rys.1. Przedstawienie schematyczne dławika z uzwojeniem potrzeb własnych

Z takiego też modelu można korzystać wyznaczając na przykład warunki zwarcia występujące na szynach po stronie niskiego napięcia. Układ powyższy można przedstawić następującym schematem zastępczym (Rys.2.). W schemacie tym parametry gałęzi podłużnej  $R_T$ ,  $X_T$ ,  $Z_T$  wyznaczone są na podstawie napięcia zwarcia wyznaczonego dla potrzeb własnych, a parametry poprzeczne  $X_D$ ,  $R_D$ , wyznaczone są z mocy kompensacyjnej dławika oraz ze strat kompensacyjnych (bez potrzeb własnych) i można wykorzystać załączone poniżej formuły:

$$Z_T = \frac{U_{z\%} U_n^2}{S_n} \quad [\Omega] \quad (1)$$

$$R_D = \frac{P_c U_n^2}{Q_n} \quad [\Omega] \quad (2)$$

$$R_T = \frac{P_{pw} U_n^2}{S_n} \quad [\Omega] \quad (3)$$

$$X_D = \frac{U_n^2}{S_n} \quad [\Omega] \quad (4)$$

gdzie:

$P_{pw}$  – straty uzwojenia potrzeb własnych [W]

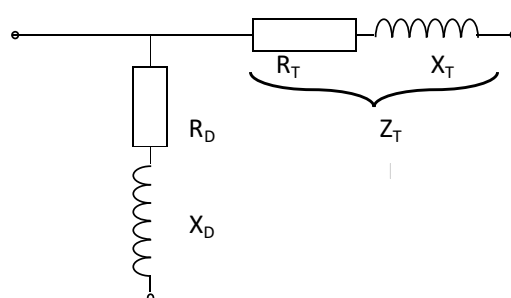
$P_c$  – straty kompensacyjne [W]

$U_n$  – napięcie znamionowe [V]

$S_n$  – moc potrzeb własnych [VA]

$Q_n$  – moc kompensacyjna [VAr]

$u_{z\%}$  – napięcie zwarcia uzwojenia potrzeb własnych [%]

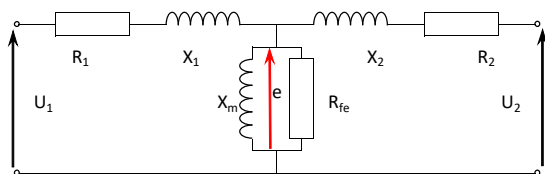


Rys. 2. Schemat zastępczy dławika z uzwojeniem potrzeb własnych

Typowe wartości napięcia zwarcia wahają się od 2% do 10 % i w głównej mierze zależą od proporcji mocy kompensacji do mocy potrzeb własnych. Powyższe parametry wyznaczone są pomiarowo w trakcie prób wyrobu. Są one też wyznaczone obliczeniowo jako wielkości projektowe.

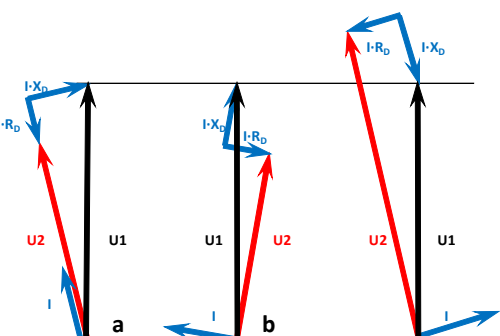
### 2.2. Przekładnia i zmienność napięcia

Zagadnieniem wymagającym szerszego omówienia jest kwestia przekładni napięciowej, gdyż jest ona zasadniczo odmienna od przekładni w transformatorze. Dla transformatora przekładnia zdefiniowana jest jako stosunek napięć po stronie pierwotnej i wtórnej  $U_1:U_2$  występujący przy biegu jałowym – patrz schemat (Rys.3.). Dla biegu jałowego transformatora można założyć zerowy prąd płynący w gałęzi podłużnej a tym samym, przy przekładni równej 1 napięcia  $U_1 = e = U_2$ . W przypadku transformatora przekładnia napięciowa jest wprost związana z przekładnią zwojową. W przypadku dławika nawet, gdy strona wtórna jest nieobciążona, to po stronie pierwotnej płynie prąd kompensacyjny powodujący spadki napięć na reaktancji rozproszenia dławika.



Rys 3. Schemat zastępczy transformatora

To powoduje, że przy takim samym stosunku zwojów jak w transformatorze, na stronie wtórnej dławika obserwujemy napięcia o kilka procent niższe niż w przypadku transformatora. Aby przeciwdziałać temu zjawisku przekładnię zwojową dławika z uzwojeniem potrzeb własnych należy dobrać nieco niższą niż w typowym transformatorze. Korekta ta zależy od proporcji mocy kompensacji i potrzeb własnych oraz od reakcji rozproszenia powiązanej z parametrem napięcia zwarcia. Z uwagi na brak możliwości dokładnego analitycznego uwzględnienia tych zjawisk na etapie projektowania zwykle uchyb przekładni dławika jest większy od uchybu przekładni transformatora i może wynosić około 1%.



Rys. 4. Wykresy wskazowe dla transformatora lub dławika z uzwojeniem potrzeb własnych przy obciążeniu o różnym charakterze: – a) rezystancyjnym; b) indukcyjnym; c) pojemnościowym

W tym miejscu należy wspomnieć o jeszcze jednym zjawisku.

Uzwojenie potrzeb własnych może również być obciążone pojemnościowo. W takim przypadku napięcie po stronie wtórnej przy obciążeniu może być wyższe od napięcia występującego bez obciążenia. Zilustrowano to na uproszczonym wykresie wskazowym (Rys.4), gdzie pokazano w jaki sposób zachowuje się napięcie po stronie wtórnej  $U_2$ , przy jednakowym napięciu strony pierwotnej  $U_1$ , gdy zasila odpowiednio odbiór o charakterze rezystancyjnym, indukcyjnym i pojemnościowym [1]. W przypadkach, w których z powodu charakteru obciążenia do-

chodzi do sytuacji wzrostu napięcia do poziomu krytycznego dla urządzeń, to należy wówczas odpowiednio doregulować napięcie przełącznikiem zacze- pów po stronie pierwotnej ustawia- jąc go na zacze- p dedykowany dla wyższego napięcia pierwotnego.

Moce kompensacyjne dotychczas produkowa- nych dławików z uzwojeniami potrzeb wła- snych najczęściej zawierały się w przedziale do 1000 kVA, podczas gdy moc uzwojeń potrzeb własnych typowo wynosiła do 500 kVA. W zależności od lokalnych warunków panu- jących w sieci, proporcja pomiędzy mocą po- trzeb własnych a mocą kompensacyjną może być mniejsza, równa lub większa od 1. Z uwagi na fakt, że dławiki te bardzo często zastępują transformatory potrzeb własnych, zwykle o mo- cy do 100 kVA, które we wcześniejszych latach wykonywane były z grupą połączeń Yzn, to ta- kie same preferencje nadal obowiązują w przy- padku dławików z uzwojeniami potrzeb wła- snych. W przypadku małych transformatorów (do 100 kVA), w których należy się liczyć z asymetrią obciążenia po stronie niskiego napięcia wybór takiej grupy był ekonomicznie uzasadniony. Obecnie w zakresie mocy do 100 kVA równoważnie stosowana jest również grupa Dyn, a dla mocy wyższych od 100 kVA jest ona wręcz rekomendowana [2]. Z punktu widzenia asymetrii obciążenia obie te grupy połączeń zachowują się poprawnie, natomiast materiałochłonność transformatorów z grupą Dyn przy obecnie stosowanych technologiach jest mniejsza. Stąd też wymóg stosowania grup połączeń Yzn, szczególnie, gdy wiąże się z uz- wojeniem potrzeb własnych o mocach więk- szych niż 100 kVA, nie jest ekonomicznie uza- sadniony.

### 2.3. Metodyka wyznaczania strat

W przypadku transformatorów można wyod- rębnić czynnik strat związany z przepływem prądu przez uzwojenie – tak zwane straty ob- ciężeniowe oraz czynnik strat związany ze zja- wiskami magnetycznymi w rdzeniu (histereza, straty wiropądowe w blachach) – tak zwane straty stanu jałowego zależne od indukcji w rdzeniu. Z uwagi na stosunkowo mały prąd biegu jałowego transformatora można założyć w takim stanie, że całość mierzonych strat to straty w rdzeniu. Podobnie, przy wyznaczeniu strat obciążeniowych, z uwagi na niskie napię- cie zwarcia możliwe jest założenie, że całość strat wyznaczanych w tym stanie to straty wy-

łącznie wynikające z przepływu prądu, a więc straty obciążeniowe. Stąd też w sposób pomiarowy możliwe jest oddzielne wyznaczanie obu tych składników strat. Z uwagi na zależność strat od temperatury obowiązujące normy wymagają przeliczenia wartości strat wyznaczonych z pomiaru na temperaturę referencyjną uzależnioną od klasy ciepłoodporności izolacji uzwojeń [2]. W tym przypadku straty podstawowe przelicza się do wartości odpowiadającej temperaturze referencyjnej mnożąc przez temperaturowy współczynnik rezystancji [4], a straty dodatkowe, związane z przepływem prądów wirowych, wyznacza się dzieląc wartość wyznaczoną pomiarowo przez tenże współczynnik.

W dławiku sytuacja jest odmienna. Przy podaniu napięcia znamionowego obserwujemy przepływ pełnego prądu kompensacyjnego, a obserwowane straty pochodzą równocześnie i od przepływającego prądu, jak i od strumienia przenikającego rdzeń, a ich dokładne rozgraniczenie jest niemożliwe. Można jedynie wyznaczyć straty obciążeniowe podstawowe wynikające z rezystancji wyznaczanej przy prądzie stałym. Zgodnie z normą dotyczącą dławików straty te należy przeliczyć do temperatury referencyjnej, w taki sposób, że straty podstawowe mnożone są przez temperaturowy współczynnik rezystancji, natomiast pozostałe składniki strat, a więc straty w rdzeniu oraz straty wiropądowe w uzwojeniu są pozostawiane w wartości wyznaczonej pomiarowo [3].

W przypadku dławików z uzwojeniami potrzeb własnych zaproponowano metodykę wyznaczania i specyfikowania strat łączącą obie powyższe metody. Dla stanu pracy kompensacyjnej wyznaczamy składnik reprezentujący straty podstawowe w uzwojeniu i przeliczamy go zgodnie z wymaganiami normy dla dławików [3].

$$P_{kcm} = I_c^2 R_{GN} \quad (5)$$

$$P_o = P_{cm} - P_{kcm} \quad (6)$$

$$P_{kcn} = P_{kcm} \cdot k_t \quad (7)$$

$$P_c = P_o + P_{kcn} \quad (8)$$

gdzie

$I_c$  – wartość prądu kompensacyjnego

$R_{GN}$  – rezystancja uzwojenia GN (przy temperaturze otoczenia)

$P_{cm}$  – zmierzone straty kompensacyjne (przy temperaturze otoczenia)

$k_t$  – współczynnik temperaturowy rezystancji

Przy wyznaczaniu strat obciążeniowych związanych z przepływem prądu od potrzeb własnych w pełni możemy wykorzystać sposób podany w podstawowej normie transformatorowej [2] określając straty podstawowe oraz straty dodatkowe i odpowiednio je przeliczyć do temperatury referencyjnej.

$$P_{kp} = I_{DN}^2 R_{DN} + I_{GN}^2 R_{GN} \quad (9)$$

$$P_{kd} = P_{km} - P_{kp} \quad (10)$$

$$P_{kn} = P_{kp} \cdot k_t + P_{kd} / k_t \quad (11)$$

W stanie pracy łącznej całkowitą wielkość strat wyznaczamy (14) jako sumę podstawowych strat obciążeniowych przy prądzie potrzeb własnych po stronie uzwojenia dolnego napięcia oraz sumarycznym prądzie od potrzeb własnych i kompensacyjnym po stronie górnego napięcia (12), strat dodatkowych odpowiadających sumarycznemu prądowi potrzeb własnych i pracy kompensacyjnej (13) oraz strat kompensacyjnych jałowych (6).

$$P_{kpt} = I_{DN}^2 R_{DN} + (I_{GN} + I_c)^2 R_{GN} \quad (12)$$

$$P_{kdt} = P_{kd} ((I_{GN} + I_c) / I_{GN})^2 \quad (13)$$

$$P_m = P_{kpt} + P_{kdt} + P_o \quad (14)$$

### 3. Rodzaje wykonan dławików z uzwojeniami potrzeb własnych

Wybór odpowiedniej wersji dławika podyktowany jest warunkami lokalizacyjnymi, wliczając w to przepisy przeciwpożarowe, przepisy ochrony środowiska, dostępną powierzchnię i narażenie na warunki atmosferyczne i klimatyczne. Wybór wersji powinien być poprzedzony odpowiednim rachunkiem ekonomicznym, uwzględniającym oprócz kosztu zakupu dławika również planowane koszty użytkowania oraz dodatkowe koszty infrastruktury. Ważnym aspektem wpływającym na wybór wersji jest także przewidywany reżim pracy, w tym sposób sterowania i reagowania na niestandardowe warunki pracy. W przypadku instalacji wewnętrznych można stosować zarówno wykonanie suche, jak i olejowe. W przypadku insta-

lacji napowietrznych konieczny jest wybór wersji olejowej. Wersje olejowe jednak wymagają dodatkowej ochrony przeciwpożarowej i środowiskowej, co również wiąże się z adekwatnymi nakładami inwestycyjnymi.

### 3.1. Wersje hermetyczne

Konstrukcja hermetyczna transformatora lub też dławika jest w zasadzie bezobsługowa. Olej całkowicie wypełnia zamkniętą szczelnie kadź a jego zmiany objętości związane z temperaturą kompensowane są elastycznością ścianek falistych. W przypadku większych dławików bardzo często stosowane są zintegrowane zabezpieczenia reagujące na temperaturę, poziom oleju, generowanie się gazów oraz ciśnienie oleju, które standardowo posiadają zestawy pozwalające na monitorowanie pracy dławika w sposób zdalny i co najważniejsze w sposób niezwłoczny. Dławiki takie można montować zarówno w stacjach wewnątrzowych, jak i napowietrznych, a ich kompaktowa budowa pozwala na instalowanie w ograniczonej przestrzeni. Przykład wyposażenia dławika w wersji hermetycznej przedstawiono na fotografii Fot.1.



Fot 1. Przykładowe wyposażenie dławika w wersji hermetycznej

### 3.2. Wersje z konserwatorem

W wielu wypadkach dławiki są wykonywane z konserwatorem i z przełącznikiem Buchholza. Ma to na celu wykorzystanie istniejących lub standardowo stosowanych układów zabezpieczeń w oparciu o taki właśnie przełącznik. Aby ograniczyć negatywny wpływ kontaktu atmosfery z olejem dławiki są wyposażane w odwilżacze. Niemniej należy regularnie sprawdzać stan odwilżacza oraz parametry oleju. Z uwagi na lokalizację wersje z konserwatorem nadają się do instalacji zewnętrznych i wewnętrznych. Wymagają jednak większej przestrzeni niż analogiczne dławiki hermetyczne.

### 3.3. Wersje suche (żywiczne)

Wersje suche mogą być stosowane w lokalizacjach o bardziej restrykcyjnych wymaganiach środowiskowych i przeciwpożarowych. Są także w najwyższym stopniu bezobsługowe. Wymagają jednak instalacji wewnątrzowych. Standardowo stosuje się w nich dwustopniowe zabezpieczenia temperaturowe chroniące urządzenie przed przegrzaniem.

### 4. Szczególne wersje dławika z uzwojeniem potrzeb własnych

Szczególnym przypadkiem dławika z uzwojeniem potrzeb własnych jest dławik, którego uzwojenie po stronie średniego napięcia jest skojarzone w zygzak. Uzwojenie takie umożliwia również kompensację prądu składowej zerowej po stronie średniego napięcia. W tym przypadku dławik charakteryzował się następującymi parametrami:

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| Napięcie znamionowe           | – 21000 V  |
| Moc kompensacyjna             | – 550 kVAr |
| Moc potrzeb własnych          | – 400 kVA  |
| Napięcie zwarcia              | – 4%       |
| Moc kompensacyjna składowej 0 | – 970 kVA  |
| Prąd składowej 0              | – 100 A    |
| Impedancja dla składowej 0    | – 13,8 Ω   |
| Grupa połączeń                | – ZNyn11   |
| Straty kompensacyjne          | – 4953 W   |
| Straty potrzeb własnych       | – 3598 W   |
| Straty całkowite              | – 12082 W  |

### 5. Inne wersje dławików kompensacyjnych

Sposobem regulacji indukcyjności dławika może być regulacja zaczepowa. Można ją zrealizować z wykorzystaniem bądź to przełącznika beznapięciowego, bądź też przełącznika podobciążeniowego. W obu tych przypadkach regulacja jest skokowa, przy czym, przy odpowiedniej liczbie zaczepów możliwe jest wykonanie regulacji dość głębokiej – od mocy znamionowej do  $\frac{1}{2}$  lub  $\frac{1}{3}$  tej wartości. W przypadku przełącznika podobciążeniowego regulacja może być stosunkowo szybka natomiast koszt dławika i jego gabaryty oraz masa są znacznie powiększone. W przypadku przełącznika beznapięciowego do zmiany indukcyjności wymagane jest wyłączenie dławika spod napięcia. To praktycznie uniemożliwia zastosowanie tego typu dławików w sieciach, w których zachodzą dynamiczne zmiany charakteru obciążenia.

## 6. Wnioski

Opisywane wersje dławików z uzwojeniami potrzeb własnych pozwalają poprzez zmianę charakteru obwodu przyłączonego do uzwojenia potrzeb własnych, na regulację indukcyjności. Połączenie funkcji dławika i transformatora potrzeb własnych pozwala na zainstalowanie go w stacjach, w miejsce transformatora potrzeb własnych, bez konieczności rozbudowy stacji.

Również koncepcja połączenia funkcji dławika regulowanego, transformatora potrzeb własnych oraz transformatora uziemiającego pozwoli na efektywniejsze zarządzanie stacjami, w których przewidywany jest punkt uziemiający sieci średniego napięcia.

## 7. Literatura

- [1]. Eugeniusz Jeziński: "Transformatory", *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983*
- [2]. PN-EN 50588-1, "Transformatory średniej mocy 50 Hz, o najwyższym napięciu urządzenia nieprzekraczającym 36 kV -- Część 1: Wymagania ogólne", *PKN*, 04 2016.
- [3]. PN-EN 60076-6:2008, "Transformatory -- Część 6: Dławiki". *PKN*, 10.2008.
- [4]. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Temperaturowy\\_współczynnik\\_rezystancji](https://pl.wikipedia.org/wiki/Temperaturowy_wsp%C3%B3lczynnik_rezystancji) (dostęp 2019-03-07)

### Autorzy

dr inż. Jacek Dziura – Dyrektor do spraw badań i rozwoju firmy TRAF TA Sp.z o.o. Myszków, ul.1.Maja 152.