

**Jacek Dziura**  
TRAFTA, Myszków

## WŁAŚCIWE ZABEZPIECZANIE DŁAWIKÓW KOMPENSACYJNYCH KLUCZEM DO ICH NIEZAWODNEJ EKSPLOATACJI

### PROPER PROTECTION OF SHUNT REACTORS AS THE KEY FACTOR FOR RELIABLE OPERATION

**Streszczenie:** Niewłaściwe zabezpieczanie urządzeń elektrycznych może prowadzić do ich zniszczenia oraz do wystąpienia poważnych awarii. Szczególnie dotyczy to przypadków, gdzie dotychczasowe urządzenia zostają zastępowane przez nowe urządzenia o rozszerzonej funkcjonalności – na przykład dławiki kompensacyjne z uzwojeniem potrzeb własnych. Na podstawie przypadków, w których nieprawidłowy dobór zabezpieczeń doprowadził do poważnych konsekwencji artykuł opisuje aspekty jakie należy wziąć pod uwagę, aby zapewnić długą i niezawodną eksploatację oraz przekazuje wytyczne do poprawnego zabezpieczania takich urządzeń.

**Abstract:** Nonsufficient or inadequate protection of electrical devices can lead to their destruction or to occurrence of serious malfunction. It concerns especially situations where the existing devices are being replaced by new ones having increased functionality, for example shunt reactors with self-needs winding. Upon cases where the improper protection led to serious damages, the paper deals with some aspects which have to be taken into consideration to secure the reliable operation and gives the guidelines for proper protection.

**Słowa kluczowe:** transformatory, dławiki, układy zabezpieczeń  
**Keywords:** transformers, reactors, protection devices

#### 1. Wstęp

W ostatnich latach pojawia się w sieciach elektrycznych średnich napięć coraz więcej dławików kompensacyjnych. Związane to jest z tendencją zamiany linii napowietrznych średnich napięć liniami kablowymi. Linie kablowe charakteryzują się znacznie większymi pojemnościami międzyfazowymi i doziemnymi niż linie napowietrzne, a to z kolei powoduje zapotrzebowanie na dużo wyższą moc bierną pojemnościową. Z uwagi na fakt, że płynący prąd pojemnościowy przez transformator zasilający sieć powoduje wzrost napięcia, czasem powyżej wartości dopuszczalnych, to opłaty taryfowe za pobór energii pojemnościowej są znacznie wyższe, niż za pobór energii czynnej, co sprawia, że zakup odpowiedniego dławika ma swoje uzasadnienie ekonomiczne. Jednak dla prawidłowej pracy dławik musi być odpowiednio zasilony i zabezpieczony. Inspiracją do napisania artykułu były informacje od użytkowników dławików, gdzie doszło do awarii w rozdzielniach zasilających dławiki (Fot.1). Niejednokrotnie po takiej awarii dławik pozostawał sprawny elektrycznie. Było to przesłanką, by dokładnie przyjrzeć się w jaki sposób te konkretne dławiki były zasilane i zabezpieczane.



Fot. 1. Ślady działania wysokich temperatur w polu zasilającym dławik

Pozwoliło to określić, jakie aspekty należy wziąć pod uwagę projektując układy zasilania dławików oraz w jaki sposób chronić je odpowiednio.

#### 2. Dławiki z uzwojeniem potrzeb własnych

Jedną z rozpowszechnionych w ostatnich latach wersją dławików kompensacyjnych jest konstrukcja z dodatkowym uzwojeniem potrzeb własnych. Jest ona szczególnie przydatna w lokalizacjach, w których pojawia się konieczność kompensacji mocy biernej i w których zachodzi potrzeba dostarczenia energii po stronie sieci

niskiego napięcia. Zwykle istniejące stacje, które wcześniej nie posiadały pola dławikowego mają jedynie pole transformatorowe transformatora potrzeb własnych. W takim przypadku dławik kompensacyjny z uzwojeniem potrzeb własnych pozwala na zabudowę w istniejącym polu transformatorowym przy zapewnieniu obu funkcjonalności [6]. Taka zamiana jednak musi pociągać za sobą zmianę dotychczasowych zabezpieczeń. Transformatory potrzeb własnych są typowo zabezpieczane po stronie niskiego napięcia zabezpieczeniami nadprądowymi chroniącymi transformator od przeciążeń. Zabezpieczenia te mogą wyłączać przeciążony odpływ po stronie niskiego napięcia przy stacjach wieloodpływowych, bądź też wyłączać cały transformator po stronie średniego napięcia. Od zwarć poza transformatorem lub w nim samym transformator może być chroniony bezpiecznikami średniego napięcia współpracującymi z rozłącznikiem. Można też zastosować wyłącznik średniego napięcia, choć zwykle jest to droższe rozwiązanie. Zmieniając transformator na dławik z uzwojeniem potrzeb własnych należy pamiętać, że nawet przy pozostawieniu tej samej mocy uzwojenia potrzeb własnych prąd po stronie średniego napięcia będzie się różnił o składową bierną wynikającą z mocy kompensacyjnej. Dla zobrazowania różnic, porównane zostaną parametry typowego transformatora potrzeb własnych o mocy 100 kVA zainstalowanego w sieci 15,75 kV oraz dławik o mocy kompensacyjnej 200 kVAr z uzwojeniem potrzeb własnych o mocy 100 kVA. Dla transformatora 100 kVA prąd znamionowy po stronie średniego napięcia wynosi 3,67A. Przy typowej wartości napięcia zwarcia wynoszącej 4% – 4,5% należy się spodziewać ustalonej wartości prądu zwarcia o krotności 22 – 25. Wytrzymałowany przez transformator czas trwania takiego przepływu prądu powinien wynosić 2 sekundy. Także podczas włączania transformatora do sieci występuje stan nieustalony, w którym obserwuje się przepływ prądu o wartości znacznie większej niż wartość znamionowa. Obliczeniowe wyznaczenie spodziewanej wartości prądu załączenia możliwe jest, jeśli znane są wymiary geometryczne załączanego uzwojenia oraz dane nawojowe. Typowe krotności prądu załączenia pozostają w granicach 8 – 12, a czas zanikania zawiera się zwykle w granicach 1 sekundy. Zgodnie z RIET [1] powinien on być zabezpieczony wkładką bezpiecznikową 16A. Wkładka taka powinna za-

pewnić wyłączenie transformatora przy przepływie prądu zwarcia, powinna także wytrzymać proces załączenia i nie powinna się przegrzewać przy przepływie prądu znamionowego transformatora. Podobne wytyczne doboru podawane są także przez inne źródła, takie jak katalogi producentów bezpieczników [2, 3]. Natomiast dławik o mocy 250 kVAr z uzwojeniem potrzeb własnych 100 kVA po stronie średniego napięcia pobiera prąd od 9,9A do 12,8A w zależności od współczynnika mocy obwodu potrzeb własnych. Typowe wartości napięć zwarcia dla dławików wahają się w granicach 2% – 8% w zależności od proporcji mocy kompensacyjnej do mocy uzwojenia potrzeb własnych. W przykładowym dławiku napięcie zwarcia wynosi 2%, co oznacza, że krotność prądu zwarcia w stosunku do prądu znamionowego potrzeb własnych wynosi 50, natomiast w stosunku do całkowitego prądu wynosi jedynie 16. W przypadku prądu załączenia, z uwagi na inne proporcje obwodu elektromagnetycznego krotność prądu załączenia przewyższa krotność prądu zwarcia. W rozpatrywanym przykładzie krotność wynosi 60 przy odniesieniu do znamionowej wartości prądu potrzeb własnych i około 19 przy odniesieniu do znamionowej wartości prądu całkowitego. Gdyby w powyższym przypadku doszło do pozostawienia takich samych bezpieczników należy spodziewać się następujących skutków:

- z uwagi na znaczne różnice w prądach załączenia mogą wystąpić trudności z pozytywnym załączeniem dławika – nastąpi zadziałanie bezpieczników przy próbie załączenia.
- z uwagi na znacznie wyższy prąd całkowity po stronie średniego napięcia wystąpi zwiększone nagrzewanie się bezpieczników zgodnie z zależnością  $I^2R$  (w opisywanym przypadku około 9-krotnie intensywniejsze)

W omawianym przypadku należałoby użyć wkładki bezpiecznikowej o prądzie co najmniej 25A.

Dla dokładnego doboru wkładki należy dobrze zapoznać się z charakterystyką bezpieczników, gdyż mogą one się różnić w zależności od typu i producenta [2, 3, 4]. Należy również upewnić się, w jakim stopniu dany typ bezpiecznika umożliwia ochronę przed prądami przeciążeniowymi. Często bowiem funkcjonują bezpieczniki o niepełnym zakresie działania. Pozwalają one na skuteczne zabezpieczenie przed

prądami zwarciovymi, lecz nie pozwalają na ochronę przed przeciążeniem. Stosując takie wkładki konieczne jest wyposażenie pola zasilającego dławik w rozłącznik z zabezpieczeniem od prądów przeciążeniowych. W tym przypadku należy odpowiednio ustawić priorytety zadziałania zabezpieczeń, aby uniknąć próby wyłączenia prądów zwarciovych przez rozłącznik przed zadziałaniem bezpieczników. Próba wyłączenia prądu zwarciovego przez rozłącznik doprowadzi do powstania łuku elektrycznego i tym samym do trwałego uszkodzenia pola rozdzielniczy. Ponadto, palący się łuk na stykach rozłącznika powoduje zwiększenie zastępczej rezystancji obwodu w stosunku do rezystancji przy zamkniętym rozłączniku. Powoduje to obniżenie prądu zwarciovego, a tym samym wydłuża czas zadziałania wkładki bezpiecznikowej, co w warunkach przepływu prądu zwarciovego jest stanem niepożądanym.

### 3. Dławiki kompensacyjne bez uzwojenia potrzeb własnych

Dławiki takie charakteryzują się mocą kompensacyjną o stałej wartości, bądź też o wartości regulowanej poprzez przełącznik do regulacji w stanie beznapięciowym lub też w specjalnych zastosowaniach poprzez przełącznik podobciążeniowy. Dobierając zabezpieczenie należy wziąć pod uwagę następujące aspekty. Pierwszym z nich jest prąd związany z załączeniem dławika do sieci. Prąd załączenia zależy od geometrii uzwojenia załączanego, wstępnego stanu magnetycznego rdzenia, znamionowej indukcji w rdzeniu oraz chwilowej wartości napięcia, przy której dokonujemy załączenia. Niższy poziom indukcji znamionowej w dławikach, niż w transformatorach wpływa korzystnie na obniżenie prądu załączenia. Niemniej, zwykle większe gabaryty uzwojenia dławikowego powodują skutek odwrotny. Również zwykle mniejsza niż w transformatorze rezystancja zastępcza dławika wpływa niekorzystnie na długość trwania stanu nieustalonego. W przybliżeniu można założyć, że zjawisko to jest nieco mniejsze, niemniej jednak krotność prądu załączenia zwykle nie jest mniejsza niż 10. Zatem z punktu widzenia umożliwienia poprawnego załączenia dławika do sieci bezpiecznik powinien być dobrany podobnie jak dla transformatora o takiej samej mocy pozornej. Bezpiecznik zabezpieczający transformator zwykle chroni go od skutków zwarc po stronie wtórnej. W przypadku dławika bezpiecznik chroni

jedynie przed intensywnymi zwarciami wewnętrznymi w dławiku. Bardzo często jednak intensywne zwarcie wewnętrzne w dławiku rozwija się stopniowo od zwarc międzyzwojowych, które początkowo nie powodują znacząco większego prądu płynącego przez bezpiecznik, który umożliwiłby jego zadziałanie. Jedynym sposobem na wczesne wykrycie takiego stanu są zabezpieczenia przeciążeniowe. W przypadku zastosowania dławików olejowych uzupełniającym sygnałem może być sygnał od przekąznika gazowo-przepływowego, czy też od zabezpieczeń gazowo-ciśnieniowo-temperaturowych [7, 8] w przypadku wersji hermetycznych. Istotnym aspektem w przypadku wyłączenia prądów awaryjnych, czy to przez bezpiecznik, czy też przez rozłącznik jest zdolność do wyłączenia prądów indukcyjnych. O ile w przypadku transformatorów prąd ma charakter czynno-indukcyjny o współczynniku mocy zwykle nie mniejszym niż 0,8, o tyle w przypadku dławików jest to prąd indukcyjny o współczynniku mocy mniejszym niż 0,1. Z uwagi na wysoką indukcyjność procesowi wyłączenia dławika towarzyszy powstawanie silnych przepięć zgodne z zależnością (1).

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Jest to zjawisko niebezpieczne, szczególnie w przypadku bardzo szybkich procesów łączeniowych realizowanych przez wyłączniki próżniowe. Prowadzić one mogą do przebicia izolacji międzyzwojowej lub międzywarstwowej dławika. Dlatego też dławiki powinny być zabezpieczone ogranicznikami przepięć, zwłaszcza zaś te, które podlegają częstym procesom załączania i wyłączania. Ograniczniki przepięć pozwalają także sprawniej wyłączyć dławik przez bezpiecznik. Powstający impuls napięcia podtrzymujący palenie łuku zostaje rozładowany przez ogranicznik przepięć i tym samym skraca czas wyłączenia. Ważnym aspektem mającym wpływ na pracę dławika jest zmienność napięcia zasilania. O ile w transformatorze wzrost napięcia jedynie minimalnie wpływa na wydzielane w nim straty, o tyle w dławiku zjawisko to jest nie do pominięcia, co szerzej opisano w [5], a w przybliżeniu zależy od kwadratu zmienności napięcia.

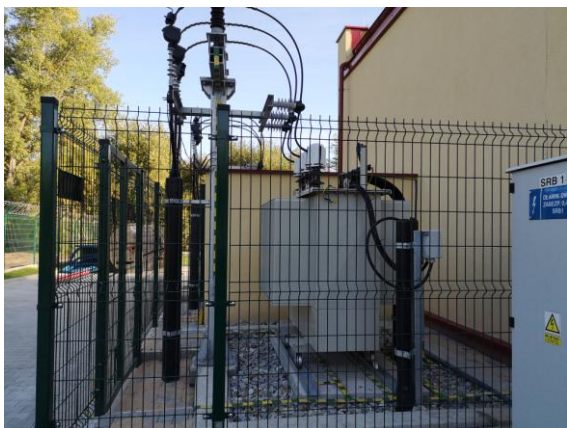
$$\Delta P \sim \Delta U^2 \quad (2)$$

Spotykane są lokalizacje dławików, gdzie możliwy wzrost napięcia sięga 20%. W takim przy-

padku konieczne jest, by dławik był na takie warunki pracy odporny. Oznacza to, że zabezpieczenia powinny być dostosowane do maksymalnego dopuszczalnego długotrwałego prądu dławika. Ponadto, jeżeli napięcie dławika wzrasta powyżej wartości dopuszczalnej długotrwałej, co równoznaczne jest z wydzielaniem wyższych strat i tym samym stwarza ryzyko jego przegrzania, zabezpieczenie przeciążeniowe powinno skutecznie taki dławik odłączyć. Taką funkcję może spełniać termometr z kontaktami zainstalowany w kieszeni dławika, pobudzający cewkę wyzwalającą rozłącznika.

#### 4. Rozwiązania praktyczne

Rozwiązanie konkretne stacji dławikowych zależy od wielu czynników. Mogą to być stacje zarówno z dławikami napowietrznymi jak i wewnątrzowymi. Wymagania przeciwpożarowe lub środowiskowe mogą wymusić konieczność zastosowania wersji żywicznych. Decydując się na wariant olejowy można wybrać wersję hermetyczną lub z konserwatorem oleju. Niemniej, każda z tych wersji wymaga podobnych środków ochrony.



Fot. 2. Dławik kompensacyjny z uzwojeniem potrzeb własnych w wersji napowietrznej hermetycznej na stanowisku pracy; widoczne ograniczniki przepięć oraz wyizolowane przepusty średniego napięcia

##### 4.1. Ochrona przeciążeniowa

Ochronę przeciążeniową zrealizować można albo poprzez pomiar prądu płynącego do dławika przez dokonanie odpowiednich nastaw wartości prądu i zwłoki czasowej wyzwalaczy nadprądowych, lub też poprzez ocenę skutku cieplnego wywołanego przepływem prądu. Zaletą tego drugiego sposobu jest możliwość uwzględnienia również innych czynników wpływających na temperaturę dławika. Mogą to

być na przykład skrajnie wysokie temperatury otoczenia lub też nieprzewidziane zakłócenia w dopływie powietrza chłodzącego. Z tego też względu dławiki produkcji TRAF TA Sp.z o.o. są wyposażane w termometry posiadające odpowiednio nastawialne kontakty pozwalające na ustawienie określonych progów reakcji (typu „Alarm” lub „Wyłączenie”). W dławikach żywicznych stosowane są układy kontroli temperatury zrealizowane na bazie czujników pozystorowych (PTC) lub czujników Pt100.

Przedstawione na fotografii Fot. 3 urządzenie pozwala także na sygnalizację innych stanów awaryjnych powodujących generację gazów w oleju lub też wzrost jego ciśnienia, jak na przykład w przypadku zwarć wewnętrznych. Dla wersji hermetycznych urządzenie takie pełni analogiczną rolę jak przekaźnik gazowo-przepływowy w wersji konserwatorowej.



Fot. 3. Zabezpieczenie gazowo-ciśnieniowo-temperaturowe dławika kompensacyjnego z uzwojeniem potrzeb własnych w wersji hermetycznej

##### 4.2. Ochrona przepięciowa

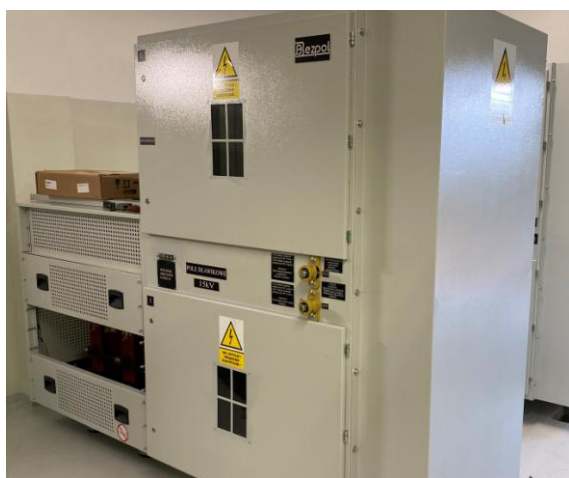


Fot. 4. Ograniczniki przepięć zainstalowane na dławiku kompensacyjnym średniego napięcia



Odpowiednia ochrona przepięciowa pozwala na ochronę dławika w trakcie procesów załączania a szczególnie wyłączenia. Umożliwia także sprawniejsze wyłączenie dławika w trybie awaryjnym przez wkładki bezpiecznikowe. Obecnie najczęściej instalowane są ograniczniki przepięć zbudowane z elementu nieliniowego na bazie warystora z tlenku cynku ZnO. Charakteryzują się one brakiem prądu następczego, odpowiednią szybkością zadziałania i precyzją nastawy napięcia zapłonu. Do ich wad należy stosunkowo duży prąd upływu i duża pojemność.

#### 4.2. Ochrona zwarciova



Fot. 5. Dławik kompensacyjny podczas montażu na stanowisku w wykonaniu suchym w obudowie IP21 wraz z komorą zasilania mieszczącą rozłącznik i bezpieczniki

Dla odpowiedniej ochrony zwarciovej konieczne jest zapewnienie selektywności zabezpieczeń. Dla dławików z uzwojeniami potrzeb własnych posiadającymi kilka odpływów niskiego napięcia prawidłowo działające zabezpieczenia powinny odłączyć jedynie odpływ, na którym doszło do uszkodzenia. Jeżeli stacja dławikowa zasilana jest poprzez rozłącznik, należy wyeliminować możliwość rozłączenia prądu awaryjnego przez ten rozłącznik.

#### 5. Wnioski

Poprawna, bezawaryjna, długotrwała i bezproblemowa eksploatacja urządzenia uzależniona jest od tego, czy zostało ono dobrane poprawnie do miejsca, w którym jest zainstalowane i czy zostało w adekwatny sposób zabezpieczone. W szczególności zamiana transformatorów potrzeb własnych na dławiki z uzwojeniami potrzeb

własnych musi prowadzić do zmiany zabezpieczeń. Zabezpieczenia dławików muszą uwzględniać ich specyficzny indukcyjny charakter obciążenia o bardzo niskim współczynniku mocy, który utrudnia procesy wyłączenia poprzez generowanie silnych przepięć łączeniowych i wydłużając czas trwania procesów nieustalonych. Ponadto należy eksploatować urządzenia zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach, zaleceniach branżowych i dokumentacji technicznej.

#### 7. Literatura

- [1]. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, *Energopomiar-Elektryka*, 2006.
- [2]. "Wkładki bezpiecznikowe", *EFEN*, 12.2017. [http://www.efen.com.pl/pliki/katalogi/EFEN\\_PL\\_Wkladki\\_bezpiecznikowe.pdf](http://www.efen.com.pl/pliki/katalogi/EFEN_PL_Wkladki_bezpiecznikowe.pdf).
- [3]. "Bezpieczniki", *ABB*, 10.2014, <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjN0Yiy9oPoAhWrBRAIHfkVCHcQFjAAegQIARAB&url=http%3A%2F%2Fsearch.abb.com%2Flibrary%2Fdownload.aspx%3Fdocumentid%3D3405pl202-w5-pl%26languagecode%3Dpl%26documentpartid%3D%26action%3Dlaunch&usg=AOvVaw3Kt0c52fYLACEaTVITzrtE>.
- [4]. E. Musiał: "Bezpieczniki w nowoczesnych układach zabezpieczeń urządzeń niskiego napięcia", *strona domowa*, 2006, [www.edwardmusial.info/pliki/bezpz.pdf](http://www.edwardmusial.info/pliki/bezpz.pdf)
- [5]. J. Dziura: "Właściwe określenie warunków pracy urządzeń elektrycznych kluczowym czynnikiem ich niezawodnej eksploatacji", *Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, INiME Komel*, 2018
- [6]. J. Dziura: "Nowoczesne warianty dławików kompensacyjnych w sieciach średnich napięć", *Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, INiME Komel*, 2019.
- [7]. "DGPT2® protection relay for electrical transformers". <http://www.tanandsons.com/en/product/detail/24/DGPT2%20AE-protection-relay-for-electrical-transformers>.
- [8]. "IDEF SYSTEMES The Protection Relay Specialist". <http://www.idefsystemes.com/the-dmcr-a-complete-safety-solution>.

#### Autorzy

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