

**Jacek Dziura**  
TRAFTA, Myszków

## WŁAŚCIWE OKREŚLENIE WARUNKÓW PRACY URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH KLUCZOWYM CZYNNIKIEM ICH NIEZAWODNEJ EKSPLOATACJI

### PROPER DETERMINATION OF OPERATING CONDITIONS AS THE KEY FACTOR FOR RELIABLE OPERATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT

**Streszczenie:** Zmiany dotyczące infrastruktury energetycznej coraz częściej wymagają, bądź też wręcz wymuszają zastosowanie urządzeń dobieranych indywidualnie. W znaczącej skali występują urządzenia energetyki rozproszonej, dużo więcej jest odbiorów przekształtnikowych o różnym charakterze składowych harmonicznych. Konkurencja kosztowa wymusza coraz oszczędniejsze konstrukcje, co może oznaczać, że w wielu wypadkach urządzenia muszą być dedykowane do określonych zastosowań i przewidzianych reżimów pracy, gdyż praca w innych warunkach może nie być efektywna lub też prowadzić do szybszego zużywania się urządzeń. Przy wysokim wykorzystaniu urządzeń istotne jest także, by pracowały one z odpowiednimi zabezpieczeniami, które we właściwy sposób będą informować o zbliżaniu się do stanów krytycznych. Artykuł ten, na podstawie doświadczeń produkcyjno-eksploatacyjnych firmy TRAFETA, opisuje specyficzne przypadki, w których poprawne, lub też niepełne określenie warunków eksploatacji, jak i dobór zabezpieczeń miały kluczowe znaczenie dla poprawnej pracy produktu. Z uwagi na profil produkcyjny firmy TRAFETA, specjalizującej się w transformatorach i dławikach dostosowanych do specyficznych wymagań, przypadki eksploatacji tych właśnie wyrobów, a zwłaszcza dławików, zostały poddane szczegółowej analizie.

**Abstract:** The changes of electrical infrastructure require the individual adjustment of electrical equipment. In a big scale there are devices of local generation, there are more and more convertor loads of different character of higher harmonics. The cost competition leads to material saving designs what means that the devices must fit to particular applications and operations regimes, because the operation in different conditions can be ineffective or may cause the faster degradation. Operation on the high level of device utilization must be linked with proper choice of protection systems informing about approaching the critical conditions. Basing on the experience of company TRAFETA concerning the design and operation of its products, the paper describes the chosen cases where the proper or insufficient description of site conditions as well as the choice of protection systems had the key importance for proper operation of the device. Taking into account the production profile of company TRAFETA offering transformers and reactors for specific applications the examples of these devices, especially reactors, were analyzed.

**Słowa kluczowe:** transformatory, dławiki, warunki pracy maszyn elektrycznych

**Keywords:** transformers, reactors, operating conditions of electrical machines

#### 1. Wstęp

Urządzenia elektryczne i elektroenergetyczne powinny być projektowane i budowane, tak aby pracowały niezawodnie i bezawaryjnie w zakładanym okresie czasu życia oraz przy zakładanym stopniu obciążenia danego urządzenia. Dla transformatorów i dławików o zakresie mocy mieszczącym się w przedziale urządzeń rozdzielczych deklarowany przez producenta czas użytkowania zawiera się między 20 a 40 lat. Właściwe warunki eksploatacji transformatora, czy też dławika z reguły pozwalają na tak długotrwałą pracę. Natomiast eksploatacja w innych, nietypowych warunkach może znacznie skrócić czas życia i doprowadzić do

zniszczenia urządzenia. Istotnym czynnikiem jest także ekonomiczna konkurencyjność wyrobu. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, gdy zakupy urządzeń podlegają procedurom przetargów publicznych, w których bardzo często jedynym ocenianym kryterium jest cena. Coraz dokładniejsze algorytmy projektowania urządzeń pozwalają na maksymalne wykorzystanie materiałów, ale tym samym mogą ograniczać wytrzymałość urządzenia w warunkach nietypowych, albo też nie pozwolić na osiągnięcie znamionowych parametrów. Istotna dla poprawnej eksploatacji produktu jest także wiedza o aktualnym stanie pracy szczególnie podczas

obciążeń bliskich znamionowym lub w szczególności powyżej znamionowych. W artykule tym omówiono kilka wybranych przypadków eksploatacyjnych dotyczących dławików i transformatorów, w których zasadniczą rolę odgrywały niestandardowe warunki eksploatacji.

## 2. Właściwe warunki chłodzenia

Jednym z ważniejszych czynników podczas eksploatacji urządzeń jest zapewnienie odpowiednich warunków chłodzenia. Brak odpowiedniego chłodzenia może powodować, zgodnie z prawem Montsingera, skrócenie czasu życia urządzenia. Dotyczy to głównie transformatorów i dławików wewnętrznych chłodzonych w naturalny sposób konwekcyjny. Przy ograniczonej kubaturze komory transformatora istotne jest, by posiadała ona otwory wlotowe i wylotowe powietrza opływającego chłodzone urządzenie. W szczególności otwory muszą być umieszczone na przeciwległych ścianach, na różnych wysokościach dla zapewnienia odpowiedniego grawitacyjnego ruchu powietrza i muszą posiadać odpowiedni przekrój. Zwykle wymagania dotyczące otworów wentylacyjnych opisuje się zależnościami:

$$S_1 = \frac{0,18P}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

$$S_2 = 1,1 S_1 \quad (2)$$

gdzie:

$S_1$  - powierzchnia otworu wlotowego [ $m^2$ ],

$S_2$  - powierzchnia otworu wylotowego [ $m^2$ ],

$P$  - łączne straty transformatora przeliczone na temperaturę odniesienia [kW],

$H$  - różnica wysokości między osiami otworów wentylacyjnych (wlotowym i wylotowym) [m]

W przypadku, kiedy te warunki nie są spełnione można spodziewać się, że transformator, czy też dławik będzie pracował w wyższych temperaturach, co może przyczynić się do skrócenia jego żywotności. Przy wspomaganie chłodzenia komory w sposób wymuszony należy zwrócić uwagę na to, by wymuszony strumień powietrza nie zaburzał, a raczej wspomagał przepływ naturalny.

Ilustracją tego może być przypadek dławika suchego w izolacji żywicznej, który został zamówiony z obudową IP21. Został on zainstalowany w pomieszczeniu, gdzie otwór dolotowy

powietrza był zasłonięty (z uwagi na gryzonie), w którym dodatkowo pracował jeszcze transformator potrzeb własnych. Zamiast zapewnienia odpowiedniego grawitacyjnego przepływu powietrza pomieszczenie wyposażono w klimatyzator. Lokalizację dławika przedstawiono za zdjęciem Fot.1.



Fot. 1. Lokalizacja dławika w pomieszczeniu bez zapewnionego odpowiedniego przepływu powietrza chłodzącego

Łączna moc strat wydzielana przez dławik i transformator były rzędu kilkunastu kilowatów, co było wartością wielokrotnie większą od mocy klimatyzatora. Dodatkowo ruch powietrza wymuszony przez klimatyzator zaburzał naturalny konwekcyjny ruch powietrza w dławiku. Czynniki te sprawiły, że po kilkugodzinnej pracy dławika czujniki temperatury dławika zaczęły wskazywać stan alarmowy. W takich warunkach lokalizacyjnych, aby usprawnić oddawanie ciepła zaproponowano wymuszone chłodzenie samego dławika, co rozwiązało problem nadmiernego nagrzewania się dławika.

Kolejnym przykładem jest również dławik, tym razem olejowy, który został wyłączony przez zabezpieczenia przeciwpożarowe komory aktywujące się przy temperaturze powietrza w komorze na poziomie  $60^{\circ}C$ . Sam dławik nie osiągnął temperatury krytycznej.

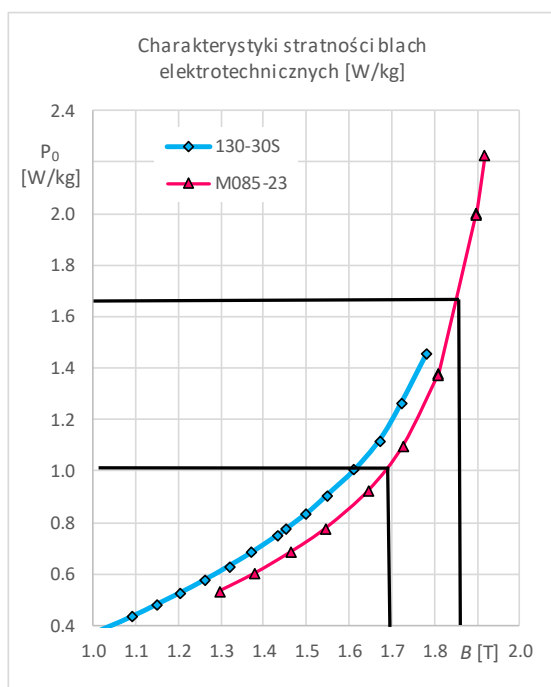
Powyższe przykłady pokazują, jak istotne jest wyposażanie transformatorów i dławików w odpowiednie urządzenia zabezpieczające, w tym przypadku w termometry lub układy kontroli temperatury pozwalające na ustawienie określonych progów reakcji (typu „Alarm” lub „Wyłączenie”). Pozwala to na bezpieczniejsze i bardziej efektywne wykorzystanie transformatorów, czasem nawet dopuszczając do ich okresowego przeciążania w zależności od aktualnej

temperatury otoczenia i warunków wstępnego nagrzania.

W przypadku energetyki rozproszonej należy wziąć pod uwagę również aspekt pracy urządzenia przy napięciu wyższym od znamionowego. Stan taki w transformatorze powoduje wyższe straty w rdzeniu, a przy obecnie stosowanym wysokim punkcie pracy przy indukcji rzędu 1.75 – 1.8 T. Straty rdzenia  $P_0$  w funkcji indukcji  $B$  mogą być opisane zależnością:

$$P_0 \sim B^n \quad (3)$$

Gdzie wykładnik  $n$  dla obecnie stosowanych blach przy takich wartościach indukcji wynosi 3 – 4. W tej sytuacji 10% wzrost napięcia, przekładający się na 10% wzrost indukcji oznacza, że przyrost strat w rdzeniu może przewyższać 50% (Rys.1).



Rys. 1. Typowe charakterystyki stanu jałowego dla obecnie stosowanych materiałów magnetycznych

Z uwagi na fakt, że dla obecnych transformatorów wykonywanych według ostatnich uregulowań unijnych [1] straty jałowe wynoszą poniżej 10% strat całkowitych dla transformatorów olejowych i około 15% strat całkowitych dla transformatorów suchych, ogólny bilans cieplny nie jest mocno naruszony. Jednak w przypadku dławików, zwłaszcza nieregulowanych, które pracują ciągle przy prądzie znamionowym, 10% wzrost napięcia pociąga za sobą 10% wzrost

prądu, a to już powoduje ponad 20% wzrost strat, co jest zjawiskiem nie do pominięcia.

### 3. Praca z niewłaściwym poziomem oleju

#### 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. Mniejsze transformatory są wyposażone w pływakowe wskaźniki poziomu oleju, które sygnalizują jeśli z jakichkolwiek przyczyn dochodzi do obniżenia poziomu. Najczęściej nie są one wyposażone w kontakty, które mogłyby przekazywać użytkownikowi informację o obniżonym poziomie w sposób zdalny, co jest pewną niedogodnością. W przypadku większych transformatorów bardzo często stosowane są zintegrowane zabezpieczenia reagujące dodatkowo na temperaturę oraz ciśnienie oleju, które standardowo posiadają kontakty pozwalające na sterowanie pracą transformatora w sposób zdalny i co najważniejsze w sposób niezwłoczny.

Do pracy z obniżonym poziomem oleju może dochodzić albo na skutek generacji gazów podczas pracy transformatora, albo też ze względu na brak hermetyczności (nieszczelność) kadzi. Brak hermetyczności może być spowodowany przez rozszczelnienie przepustu podczas przyłączania transformatora, nieostrożne obchodzenie się z zaworem nadciśnieniowym i jego przypadkowe rozszczelnienie lub też na skutek niezauważonej wady występującej w samym wyrobie. Do poważnej awarii najczęściej dochodzi, kiedy poziom spadnie odkrywając elementy będące pod napięciem – przełącznik zacząpów lub też sworznie przepustów. Dochodzi wówczas do wyładowania łukowego, które powoduje gwałtowny wzrost ciśnienia, co skutkuje coraz bardziej obniżonym poziomem oleju i może przenieść wyładowanie łukowe na kolejno odkrywane elementy części aktywnej. W konsekwencji może dojść do spalania części aktywnej, rozerwania kadzi, wycieku oleju, a nawet pożaru jeśli odpowiednio szybko transformator nie zostanie odłączony od sieci.

Przykład wizualnych skutków szybko wyłączonej awarii transformatora, do której doszło na skutek pracy z obniżonym poziomem oleju pokazano na zdjęciu Fot.2. Ze względów oszczędnościowych ten transformator mimo stosunkowo dużej mocy (3100 kVA) został zamó-

wiony jedynie z pływakowym wskaźnikiem poziomu oleju oraz zaworem nadciśnieniowym.



*Fot. 2. Widok części aktywnej transformatora olejowego, z widocznym poziomem oleju, przy którym nastąpiło wyladowanie łukowe wewnątrz kadzi*

### 3.2. Transformatory z konserwatorem

W transformatorach z konserwatorem poziom oleju zmienia się wraz z jego średnią temperaturą. Objętość konserwatora i początkowy poziom oleju w konserwatorze są tak dobierane, by z jednej strony móc pomieścić wzrost objętości oleju podczas pracy z pełnym obciążeniem przy maksymalnej temperaturze otoczenia oraz zapewnić jeszcze dostateczny poziom przy stanie jałowym w najbardziej chłodny dzień. Poziom oleju w konserwatorze zwykle jest monitorowany wskaźnikiem, który dodatkowo może być wyposażony w kontakty przekazujące informację o niewłaściwym poziomie. Dla poprawnej eksploatacji transformatora istotne jest, by pracował on w środowisku, w którym temperatury otoczenia nie będą przekraczały temperatur właściwych dla normalnych warunków eksploatacji [2] albo też wyspecyfikowanych w zamówieniu. W tym miejscu warto również wspomnieć, że nie wszystkie oleje, czy też ogólnie płyny chłodzące nie pracują jednakowo dobrze w temperaturach skrajnych. Dla skrajnych temperatur ujemnych konieczne jest użycie odpowiednio domieszkowanych olejów mineralnych [3, 4]. Podobnie jest też dla innych cieczy chłodzących, które są stosowane ze względu na lepsze właściwości biodegradowalne lub też mniejszą palność. Z chemicznego punktu widzenia płyny takie najczęściej mają budowę estrów naturalnych bądź syntetycznych. W przypadku estrów naturalnych, należy wziąć pod uwagę ich punkt krzepnięcia, który znajduje się w okolicach  $-10^{\circ}\text{C}$ , co sprawia, że nie nadają się one do pracy w warunkach napowietrznych w naszej strefie klimatycznej.

### 4. Odporność na stany przejściowe

Zwykle transformatory i dławiki pracują w stanach quasi-ustalonych i na taki stan pracy są zwykle projektowane. Z uwagi na fakt występowania w sieciach zakłóceń (zwarcia, doziemienia, przepięcia łączeniowe i atmosferyczne) transformatory oraz dławiki w pewnym stopniu muszą być na takie zjawiska odporne. Jednym z takich zjawisk jest prąd związany z załączeniem transformatora, czy też 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. W przypadku transformatorów rozdzielczych wartości prądu załączenia mogą osiągać wartości kilkunastokrotnie większe od prądu znamionowego. Wynika stąd, że załączane uzwojenie może podlegać porównywalnym naprężeniom, jak w przypadku zwarcia. Z uwagi na niższy poziom indukcji znamionowej w dławikach zjawisko to jest nieco mniejsze, niemniej jednak krotność prądu załączenia nie jest mniejsza niż 10. Z tego też powodu norma [2] wymaga poinformowania dostawcy, jeśli spodziewana liczba załączeń przekracza 24/rok. Specyfika energetyki rozproszonej, a w szczególności tryb pracy farm wiatrowych lub fotowoltaicznych, który jest bardzo nierównomierny sprawiają, że pracujące w tej sieci dławiki są wyłączane i załączane ponownie znacznie częściej, a fakt ten podczas procesu zamawiania zwykle jest pomijany. Zaobserwowane zostało również, że częste rozruchy transformatora od stanu zimnego przy obciążeniu znamionowym mogą prowadzić do znacznie szybszej degradacji izolacji niż długotrwała praca przy znamionowym obciążeniu. Zjawisko to jest związane z pewną bezwładnością izolacji olejowej. Zimny olej z uwagi na jego wyższą lepkość gorzej krąży wewnątrz transformatora, a to sprawia, że w początkowej chwili pracy nagrzewanie się uzwojeń jest znacznie intensywniejsze. [5]. Wyniki badań DGA oleju pobranego z kilku monitorowanych dławików potwierdziły możliwość występowania lokalnych przegrzań niskotemperaturowych.

### 5. Właściwy dobór zabezpieczeń oraz ich nastawa

W opisywanym wcześniej przypadku transformatora olejowego, który uległ awarii na skutek obniżenia się poziomu oleju można było awarii

uniknąć, gdyby transformator ten był wyposażony w odpowiednie układy zabezpieczeń. Pokrewnym tematem jest też ograniczona wytrzymałość urządzeń monitorujących na przepięcia pojawiające się na ich zasilaniu, lub też na przewodach sygnałowych. Taki przypadek wystąpił kilkakrotnie na jednym z żywiczych dławików kompensacyjnych, gdzie uszkodzenie objęło zarówno czujniki Pt100 umieszczone pomiędzy rdzeniem a uzwojeniem dławika, jak i sam układ kontrolujący ich pracę i komunikujący się z operatorem. W trakcie analizy stwierdzono, że powodem uszkodzeń nie były zjawiska zachodzące w samym dławiku, a przepięcia w sieci zasilającej urządzenie monitorujące. Co więcej do przepięć dochodziło również na przewodach sygnałowych podłączonych do portu RS-232 tego urządzenia. Te właśnie przepięcia powodowały uszkodzenia samych czujników Pt100.

## 6. Wnioski

Poprawna, bezawaryjna, długotrwała i bezproblemowa eksploatacja urządzenia uzależniona jest od tego, czy zostało ono dobrane poprawnie do miejsca, w którym jest zainstalowane. Im lepiej przeznaczenie urządzenia i warunki pracy zostały zdefiniowane przez użytkownika, tym bardziej poprawnie urządzenie będzie mogło

być zaprojektowane w stosunku do wymagań i tym poprawniej będzie mogło pracować.

W zapytaniu ofertowym i w zamówieniu należy podawać wszelkie dane, dotyczące niestandardowych warunków pracy. Ponadto należy eksploatować urządzenia zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach, zaleceniach branżowych i dokumentacji techniczno-ruchowej.

## 7. Literatura

- [1]. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 548/2014 (21 maja 2014) w sprawie wykonania dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE w odniesieniu do transformatorów elektroenergetycznych małej, średniej i dużej mocy
- [2]. EN-60076-1, "POWER TRANSFORMERS – Part 1: General", IEC, Ed.3 2011.
- [3]. PN-EN 60296:2012, "Ciecze stosowane w elektrotechnice -- Świeże mineralne oleje elektroizolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej". PKN, 2012.
- [4]. Nynas, "Transformer Oil Handbook", Nynas, 2011.
- [5]. Tom Breckenridge: "Specification of transformers for required service", *Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa TRANSFORMATOR'17*

## Autorzy

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