

Właściwe zabezpieczanie dławików kompensacyjnych kluczem do ich niezawodnej eksploatacji

Jacek Dziura

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 przez transformator zasilający sieć prąd pojemnościowy powoduje wzrost napięcia, czasem powyżej wartości dopuszczalnych, 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, że 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 czynniki należy wziąć pod uwagę, projektując układy zasilania dławików, oraz w jaki sposób odpowiednio i prawidłowo je chronić. Kolejne rozdziały poruszają będą różne aspekty związane z zabezpieczeniami dławików.

2. Ochrona przepięciowa

Przepięcia pojawiające się na zaciskach dławika należą do czynników mogących doprowadzić do awarii dławika. Dławiki instalowane na zewnątrz są narażone na występowanie udarów

Streszczenie: Niewłaściwe zabezpieczanie urządzeń elektrycznych może prowadzić do skrócenia ich żywotności lub ich zniszczenia oraz do wystąpienia poważnych awarii. Szczególnie dotyczy to przypadków, gdzie dotychczasowe urządzenia są 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. Artykuł jest uzupełnioną i preredagowaną wersją wystąpienia zaprezentowanego na Konferencji PEMINE 2021 i zamieszczonego w „Zeszytach Problemowych – Maszyny Elektryczne” nr 125.

Słowa kluczowe: transformatory, dławiki, układy zabezpieczeń

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

Abstract: Insufficient or inadequate protection of electrical devices can lead to their lifespan decrease, 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. The paper is a completed and re-edited version of the paper presented during the PEMINE Conference in 2021 and presented in proceedings „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” No 125.

Keywords: transformers, reactors, protection devices

piorunowych pochodzenia atmosferycznego. Nie jest to jednak jedyne zagrożenie. Znacznie częściej do przepięć dochodzi w trakcie prowadzenia czynności łączeniowych w obwodach zawierających dławiki. Z uwagi na wysoką indukcyjność

procesowi wyłączania dławika towarzyszy powstawanie silnych przepięć zgodnie z zależnością (1).

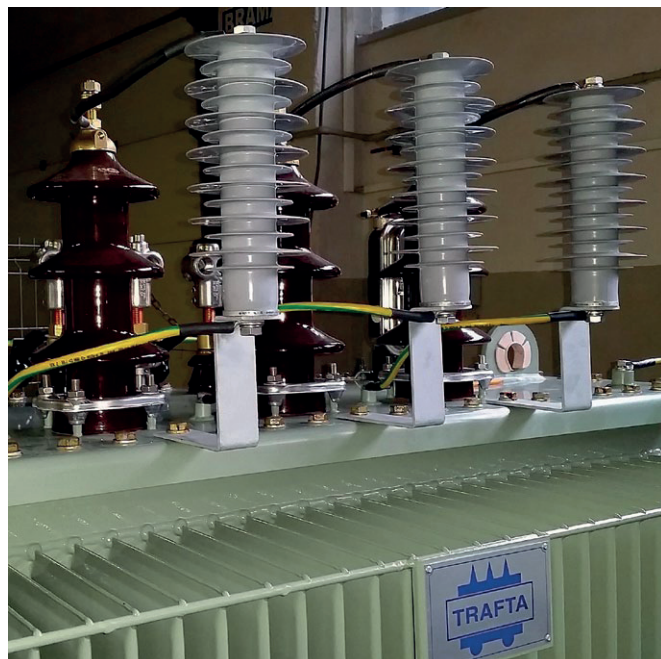
$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Jest to zjawisko niebezpieczne szczególnie w przypadku bardzo szybkich i częstych procesów łączeniowych realizowanych przez wyłączniki próżniowe. Prowadzić one mogą do przebicia izolacji międzyzwojowej lub międzywarstwowej dławika. Standardowo izolacja dławika jest projektowana zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 60076-3 „Transformatory. Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępy izolacyjne w powietrzu” [1] dotyczącej prób napięciowych z uwzględnieniem poziomu napięcia znamionowego i związanych z tą wartością poziomów napięć probierczych. Dlatego też w sytuacjach powodujących możliwość generowania narażeń większych niż określone napięcia probiercze dławiki powinny być zabezpieczane ogranicznikami przepięć, zwłaszcza zaś te, które podlegają częstym procesom załączania i wyłączania. O ile w przypadku uderów pochodzenia atmosferycznego istotne jest, by pomiędzy miejscem uderzenia pioruna a zaciskami dławika w dowolnym miejscu występował ogranicznik, o tyle w przypadku przepięć łączeniowych, które w naturalny sposób mogą generować się wewnątrz dławika, istotne jest, by ograniczniki były zainstalowane jak najbliżej zacisków dławika.

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. Ważne jest, by zainstalowane ograniczniki przepięć posiadały odpowiednio dobrane parametry. Do najistotniejszych parametrów należy napięcie trwałej pracy ogranicznika U_c oraz napięcie obniżone U_o pojawiające się na ograniczniku przy przepływie prądu związanego z udarem. Należy zwrócić uwagę, że wartości napięć obniżonych są znacznie większe od napięcia trwałej pracy (około czterokrotnie), stąd zastosowanie ograniczników o zbyt wysokim napięciu pracy trwałej U_c nie będzie chroniło urządzenia w sposób odpowiedni. Dobór parametrów uzależniony jest od sposobu połączenia punktu neutralnego uzwojenia chronionego.

Z punktu widzenia ochrony przed przepięciami łączeniowymi najbardziej korzystny sposób podłączenia ograniczników to połączenie ich w trójkąt do poszczególnych zacisków liniowych dławika. Wówczas ich parametry powinny być dobrane zgodnie z roboczymi napięciami międzyprzewodowymi. Zalecany przez producentów ograniczników sposób połączenia w gwiazdę przy doborze parametrów na napięcie międzyprzewodowe nie będzie chronił dławika przed przepięciami łączeniowymi w sposób odpowiedni. Z punktu widzenia ochrony dławika połączenie w gwiazdę może być zastosowane, jeśli punkt gwiazdowy dławika jest uziemiony, co jest raczej rzadkim rozwiązaniem, a parametry ograniczników są dobrane zgodnie z napięciami fazowymi.

W przypadku zastosowania ograniczników przepięć nie bez znaczenia jest też fakt, że ograniczniki przepięć pozwalają także sprawniej wyłączyć dławik przez bezpiecznik. Powstający



Fot. 2. Ograniczniki przepięć zainstalowane na dławiku kompensacyjnym średniego napięcia

impuls napięcia, podtrzymujący palenie łuku, zostaje rozładowany przez ogranicznik przepięć i tym samym skraca czas wyłączenia.

3. Ochrona nadnapięciowa

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 [2], 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%. Jeśli taki fakt jest znany, to konieczne jest poinformowanie producenta, by dostarczył dławik dobrany do takich warunków pracy. W takim też przypadku zabezpieczenia powinny być dostosowane do maksymalnego dopuszczalnego długotrwale napięcia i w konsekwencji prądu dławika. Ponadto, jeżeli napięcie dławika wzrasta powyżej wartości dopuszczalnej długotrwale, co równoznaczne jest z wydzielaniem wyższych strat, i tym samym stwarza ryzyko jego przegrzania, zabezpieczenie nadnapięciowe lub przeciążeniowe powinno skutecznie taki dławik odłączyć. Taką funkcję w ostateczności może spełniać termometr z kontaktami zainstalowany w kieszeni dławika, pobudzający cewkę wyzwalającą rozłącznika.

4. Ochrona nadprądowa dławików z uzwojeniem potrzeb własnych

Jedną z rozpowszechnionych w ostatnich latach wersji 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 [7].

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 250 kVAr z uzwojeniem potrzeb własnych o mocy 100 kVA.

Dla transformatora 100 kVA prąd znamionowy po stronie średniego napięcia wynosi 3,67 A. Przy typowej wartości napięcia zwarcia wynoszącej 4–4,5% należy się spodziewać ustalonej wartości prądu zwarcia o krotności 22–25. Wytrzymał 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 [3] powinien on być zabezpieczony wkładką bezpiecznikową 16 A. Wkładka taka powinna zapewnić 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 [4, 5].

Natomiast dławik o mocy 250 kVAr z uzwojeniem potrzeb własnych 100 kVA po stronie średniego napięcia pobiera prąd od 9,9 A do 12,8 A 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

reklama

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:

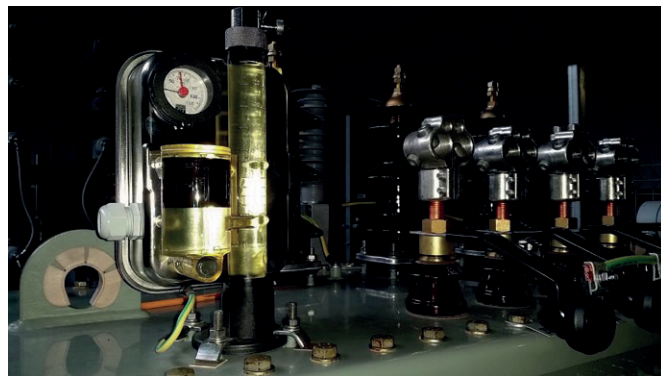
- Z uwagi na znaczne różnice w prądach załączenia mogą wystąpić trudności z pozytywnym załączeniem dławika – nastąpi zadziałanie bezpieczników przy próbie załączenia.
- Z uwagi na znacznie wyższy prąd całkowity po stronie średniego napięcia wystąpi zwiększone nagrzewanie się bezpieczników zgodnie z zależnością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

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

Dla dokładnego doboru wkładki należy dobrze zapoznać się z charakterystyką bezpieczników, gdyż mogą one się różnić w zależności od typu i producenta [4, 5, 6]. 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 rozdzielnic. 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.

5. Ochrona nadprądowa dławików kompensacyjnych 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



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

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 przekąźnika gazowo-przepływowego czy też od zabezpieczeń gazowo-ciśnieniowo-temperaturowych [8, 9] 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 w trakcie procesu wyłączenia dławika należy liczyć się z powstawaniem silnych przepięć zgodnie z zależnością (1).

Ważnym aspektem mającym wpływ na prąd dławika jest zmienność napięcia zasilania. Wzrostowi napięcia towarzyszy wzrost prądu w przybliżeniu w zależności liniowej. Jeśli w danej lokalizacji dławika, gdzie możliwy wzrost napięcia sięga 20%, 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 długotrwałe, co równoznaczne jest z wydzieleniem 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 wyzwalamą rozłącznika.

Ochronę przeciążeniową zrealizować można albo poprzez pomiar prądu płynącego do dławika przez dokonanie odpowiednich nastaw wartości prądu i zwłoki czasowej wyłączaczy 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 TRAFITA Sp. z o.o. są wyposażane w termometry posiadające odpowiednio nastawialne kontakty, pozwalające na ustawienie określonych progów reakcji (typu „Alarm” lub „Wyłączenie”). W dławikach żywicznym 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 przekładnik gazowo-przepływowy w wersji konserwatorowej.


6. 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 wydłuża czas trwania procesów nieustalonych. Ponadto należy eksploatować urządzenia zgodnie z wytycznymi zawartymi w normach, zaleceniach branżowych i dokumentacji techniczno-ruchowej.

Literatura

- [1] PN-EN 60076-3 „Transformatory. Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępy izolacyjne w powietrzu”, PKN, 02 2014.
- [2] DZIURA J.: *Właściwe określenie warunków pracy urządzeń elektrycznych kluczowym czynnikiem ich niezawodnej eksploatacji*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, INiME Komel, 2018.
- [3] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, Energopomiar – Elektryka, 2006.
- [4] *Wkładki bezpiecznikowe*, EFEN, 12.2017, http://www.efen.com.pl/pliki/katalogi/EFEN_PL_Wkladki_bezpiecznikowe.pdf.

- [5] *Bezpieczniki*, ABB, 10.2014, <https://www.google.com/url?sa=t&ct=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>.
- [6] MUSIAŁ E.: *Bezpieczniki w nowoczesnych układach zabezpieczeń urządzeń niskiego napięcia*, strona domowa, 2006, www.edwardmusial.info/pliki/bezp.pdf.
- [7] DZIURA J.: *Nowoczesne warianty dławików kompensacyjnych w sieciach średnich napięć*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe”, INiME Komel, 2019.
- [8] „DGPT2* protection relay for electrical transformers”, <http://www.tanandsons.com/en/product/detail/24/DGPT2%C2%AE-protection-relay-for-electrical-transformers>,
- [9] „IDEF SYSTEMES The Protection Relay Specialist”, <http://www.idefsystemes.com/the-dmcr-a-complete-safety-solution>,

 dr inż. Jacek Dziura – Dyrektor do spraw badań i rozwoju firmy TRAFITA Sp. z o.o.

reklama

reklama