

## Analiza strat mocy czynnej w układzie kompensatora mocy biernej w wykonaniu przeciwybuchowym z osłoną ognioszczelną

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badania strat mocy w układzie kompensatora mocy biernej zbudowanego z baterii kondensatorów i dławików ochronnych. Zaprezentowane wyniki poddano analizie pod kątem możliwości zabudowania kompensatora w przeciwybuchowej obudowie ognioszczelnej do zastosowania w sieci niskiego napięcia wyrobisk kopalni z zagrożeniem wybuchu metanu i pyłu węglowego.

**Abstract.** The results of power losses in the reactive power compensator built of capacitor banks and protective chokes have been presented in the paper. The showed results were analyzed for the possibility of installing the compensator in a flameproof explosion-proof enclosure for use in the low-voltage network of mine headings with the risk of methane and coal dust explosion. **Power losses in the reactive power compensator built of capacitor banks and protective chokes**

**Słowa kluczowe:** kompensacja mocy biernej, straty mocy czynnej, przepływ ciepła, obudowa ognioszczelna.

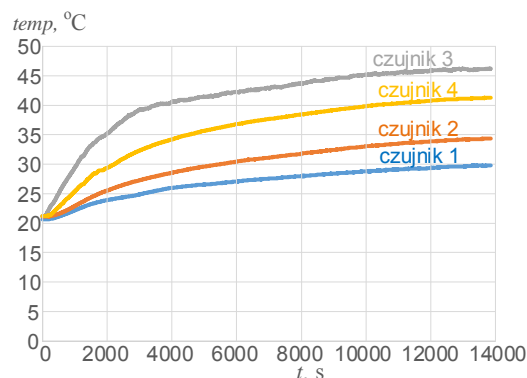
**Keywords:** reactive power compensation, active power losses, heat flow, flameproof enclosure.

### Wstęp

Mimo nieustannego postępu technicznego problem poboru mocy biernej jest ciągle aktualny i ważny ze względu jej wpływu na sieć dystrybucyjną i straty przesyłowe [1-5]. Ponadto restrykcyjne wymogi dotyczące jakości pobieranej energii, a w szczególności współczynnika mocy, skutkują naliczeniem na odbiorcę dodatkowych kar umownych za ponad umowny pobór energii biernej. Wymienione problemy uderzają szczególnie w dużych odbiorców energii elektrycznej posiadających rozległą wewnętrzną sieć elektroenergetyczną. Szczególnym przypadkiem są zakłady wydobywcze węgla kamiennego, w których nowoczesne maszyny urobkowo-wydobywcze zasilane za pomocą przekształtników energoelektronicznych ciągle ustępują rozwiązaniom z tradycyjnymi silnikami indukcyjnymi. Dodatkowo ze względu na rygorystyczne zasady odnośnie rezerwy zasilania i obciążenia transformatorów w kopalniach poprawa jakości energii dostarczanej do wyrobisk powinna się odbywać się bezpośrednio w miejscu nadmiernej poboru mocy biernej. Skutkuje to koniecznością wprowadzenia do podziemnych wyrobisk kompensatorów mocy biernej. Ze względu na niezawodność i stosunkowo prostą konstrukcję do kompensacji stosowane mogą być w tym przypadku układy zbudowane z baterii kondensatorów wyposażone w dławiki ochronne [2-5]. Jednak specyfika warunków panujących w podziemiach kopalń tj. wysoka temperatura dochodząca do ok. 40 °C, bardzo wysoka wilgotność oraz zagrożenie w postaci gazów wybuchowych stawia przed projektantami takiego rozwiązania poważne problemy natury technicznej. Wysokie stężenie metanu w wyrobiskach wymusza zastosowanie ochrony przeciwybuchowej. Jako środek ochrony wybrano umieszczenie urządzenia w obudowie przeciwybuchowej (Ex d), z czym wiąże się ograniczone możliwości odprowadzania ciepła ze środka na zewnątrz obudowy. Dodatkowo wysoka temperatura otoczenia znacznie pogarsza właściwości chłodzące obudowy.

W pracy dokonano analizy strat mocy w przykładowym kompensatorze mocy biernej indukcyjnej, dla kilku typów kondensatora kompensującego wyposażonego w dławik ochronny. Przeprowadzona analiza jest punktem wyjścia do oceny możliwości stosowania takiego rozwiązania w przeciwybuchowej obudowie ognioszczelnej. Przydatne w analizie okazały się wyniki pomiarów zmian temperatury wewnątrz przykładowej obudowy ognioszczelnej przy założonej wydzielanej mocy cieplnej. Badania te przeprowadzono w ramach projektu *Rozproszony system*

*poprawy jakości energii elektrycznej przy współpracy Politechniki Śląskiej z Ośrodkiem Pomiarów i Automatyki S.A.* Przykładowe wyniki zmian temperatury w różnych punktach obudowy o wymiarach 1320 mm x 640 mm x 825 mm przy wydzielanej mocy czynnej o wartości 360 W pokazano na rys. 1.



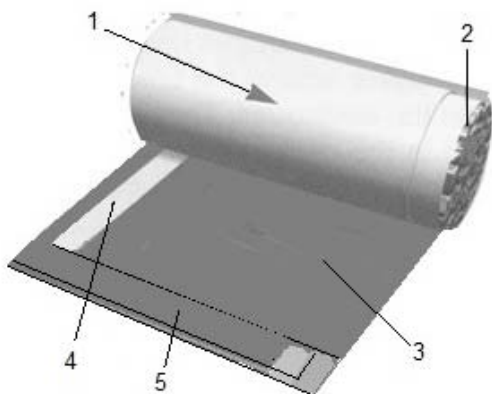
Rys. 1. Przykładowe wyniki pomiarów temperatury nagrzewania obudowy przeciwybuchowej ognioszczelnej

### Kondensatory kompensacji mocy biernej

Aktualnie najczęściej stosowanymi rozwiązaniami do poprawy współczynnika mocy w sieciach zasilających są energetyczne kondensatory i dławiki kompensacyjne. Nowoczesne kondensatory energetyczne przeznaczone do kompensacji mocy biernej wykonywane są głównie w technologii MKP bazującej na nisko stratnym dielektryku w postaci folii polipropylenowej [7, 11].

Tego typu wykonanie polega na nawinięciu dodatkowo na uzwojenie kilku warstw folii polipropylenowej częściowo metalizowanej mieszaniną cynku i aluminium (rys. 2). Umożliwia to samoregenerację materiału w miejscu wystąpienia łuku elektrycznego poprzez odparowanie metalu otaczającego punkt uszkodzenia, nie uszkadzając całego kondensatora. Jedynym negatywnym efektem jest spadek wartości pojemności [8]. Ze względu na optymalizację rozmiarów kondensatory MKP wykonywane są w obudowach cylindrycznych wykonanych z aluminium działających jako radiatory do odprowadzania ciepła z wnętrza kondensatora. Dodatkowo wypełnione są impregnatami i materiałami wypełniającymi w postaci gazów izolacyjnych oraz olei i żywic biodegradowalnych. Zapobiega to korozji elementów kontaktów prądowych,

przewodzących do wzrostu częściowych strat w dielektryku wydłużając w ten sposób czas pracy kondensatora.



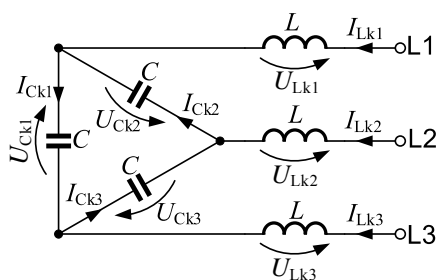
Rys. 2. Budowa kondensatora typu MKP. (1- uzwojenie, 2- kontakty prądowe, 3, 5- folia polipropylenowa metalizowana jednostronnie, 4- folia polipropylenowa niemetalizowana) [11]

Nowoczesne kondensatory energetyczne niskiego napięcia wyposażone są w zabezpieczenia przeciwwybuchowe BAM (ang. *Break Action Mechanism*) [7, 9, 12] spowodowane podaniem zbyt dużej wartości napięcia na kondensator, bądź wzrostem temperatury wewnętrznej dielektryka. Mechanizm zabezpieczenia działa na podstawie rozerwania wewnętrznych przewodów doprowadzających napięcie do kontaktów prądowych. Pod wpływem rosnącego ciśnienia wewnątrz kondensatora, podnosi się górne wieko powodując przerwanie przewodów wewnętrznych oraz szybkie odłączenie kondensatora od napięcia zasilającego. Niektóre z kondensatorów mają dodatkowo styk temperaturowy umożliwiający dodatkowe nieniszczące rozłączenie baterii.

Zgodnie z normą PN-EN 60831: *Kondensatory samoregenerujące do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym do 1000 V włącznie* [12]. Napięcie na zaciskach kondensatora po jego odłączeniu od zasilania, musi zostać rozładowane do poziomu bezpiecznego  $U_{1f} = 50$  V w ciągu 1 minuty, dla kondensatorów jednofazowych oraz do poziomu  $U_{3f} = 75$  V dla trójfazowych. Zgodnie z tym zaleceniem, kondensatory należy wyposażyć w układ rezystorów rozładowczych dobranych odpowiednio wg. wzoru:

$$(1) \quad R = \frac{t}{\ln\left(\frac{U_n}{U_{3f}}\right) \cdot C}$$

gdzie:  $t$  – czas rozładowania baterii,  $C$  – wartość pojemności baterii jednej fazy,  $U_n$  – napięcie zasilania,  $U_{3f}$  – maksymalne napięcie po czasie  $t$ .



Rys. 3. Schemat układu rezonansowego baterii kondensatorów z dławikiem ochronnym

## Dławik zabezpieczający baterię kondensatorów

Wzrastający udział urządzeń energoelektronicznych powoduje wzrost poziomu wyższych harmonicznych w systemie elektroenergetycznym, co prowadzi do znacznych problemów z bateriami kondensatorów. Wyższe harmoniczne napięcia powodują bowiem znaczny wzrost wartości skutecznej prądu płynącego przez kondensatory. Rozwiązaniem tego problemu jest instalacja dodatkowego szeregowego dławika ochronnego baterii kondensatorów tworzącego wraz z nią układ rezonansowy (rys. 3).

Dobór parametrów tego typu układu odbywa się na podstawie widma harmonicznych występujących w sieci, w której pracuje układ. Częstotliwość rezonansowa  $f_r$  układu kondensator-dławik dobierana jest tak, aby była niższa od najniższej harmonicznej występującej w sieci. Pozwala to uzyskać nieznaczną impedancję dla częstotliwości rezonansowej  $f_r$ , natomiast dla wyższych częstotliwości układ bateria-dławik będzie wykazywał duże tłumienie.

Wybór częstotliwości rezonansowej określany jest przez współczynnik tłumienia [10]:

$$(2) \quad p = \left(\frac{f_n}{f_r}\right)^2 \cdot 100\%$$

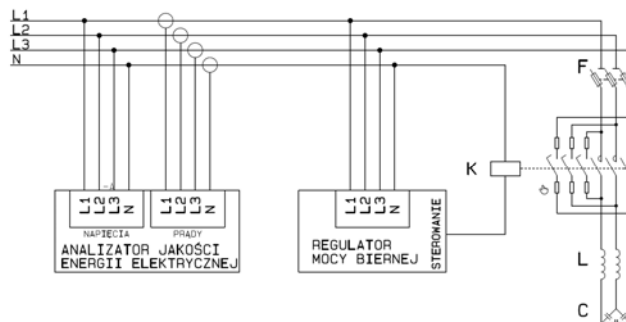
gdzie:  $f_n$  – częstotliwość znamionowa sieci,  $f_r$  – częstotliwość rezonansowa.

Aktualnie najczęściej stosowane dławiki ochronne wykonywane są dla współczynnika tłumienia  $p = 7\%$  ( $f_r \sim 189$  Hz) oraz  $p = 14\%$  ( $f_r \sim 134$  Hz).

## Stanowisko pomiarowe strat mocy czynnej

Celem prowadzonych badań laboratoryjnych była pomiarowa identyfikacja strat mocy czynnej w układzie baterii kondensatorowej, które bezpośrednio przenoszą się na wzrost temperatury wewnętrznej obudowy kompensatora. Obiektem badanym był automatyczny kompensator mocy biernej z jednym stopniem baterii kondensatorowej z szeregowym dławikiem zabezpieczającym, załączanym za pomocą stycznika.

Pomiary parametrów pracy baterii kondensatorowej realizowano za pomocą analizatora jakości energii elektrycznej Yokogawa WT5000. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Dla każdej fazy rejestrowano odczyty poboru mocy czynnej oraz biernej składowej podstawowej wraz przebiegami napięcia i prądu, ponadto zapisywano przebieg prądu w przewodzie neutralnym.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania strat mocy czynnej

Akwizycję danych pomiarowych przeprowadzono w następujących stanach pracy kompensatora: dla biegu jałowego, w stanie pracy z włączoną baterią kondensatorów bez dławika zabezpieczającego oraz z dławikiem zabezpieczającym stosując dla porównania zamiennie 3 typu kondensatorów kompensujących. Zastosowano dławik zabezpieczający firmy ELHAND ED3F-11,1/400/7-12,5/440

o współczynnika tłumienia  $p = 7\%$  przystosowany do pracy z baterią o napięciu znamionowym  $U_n = 440\text{ V}$  oraz znamionowej mocy biernej  $Q_n = 12,5\text{ kvar}$  [10]. Dane znamionowe testowanych kondensatorów przedstawiono w tabeli 1.

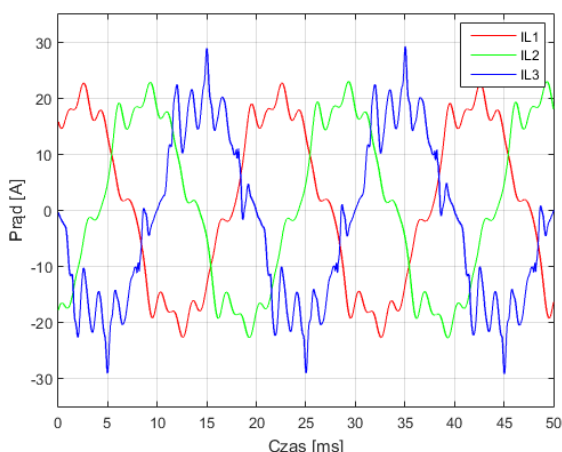
Tabela 1. Parametry katalogowe testowanych kondensatorów

Parametr	Kondensator I	Kondensator II	Kondensator III
$C, \mu\text{F}$	3 x 66,6	3 x 54,8	2 x 3 x 27,4
$U_n, \text{V}$	400	440	440
$f_n, \text{Hz}$	50	50	50
$\Delta P/Q, \text{W/kvar}$	0,2 w dielektryku	0,45 całkowite	0,45 całkowite

### Wyniki badań strat mocy czynnej

Badania rozpoczęto od wyznaczenia strat mocy czynnej występujących podczas pracy układu na biegu jałowym. Obciążenie w tym przypadku stanowi regulator mocy biernej, zasilacz oraz aparatura rozdzielczo-bezpiecznikowa znajdująca się wewnątrz urządzenia.

Kolejnym etapem pomiarów było wyznaczenie strat mocy czynnej dla układu z baterią kondensatorową bez dławika ochronnego. Podczas pomiarów zaobserwowano chwilowe wzbudzenie się kondensatora, który wchodził w rezonans z siecią zasilającą. Przebiegi prądów oraz napięć zarejestrowane podczas pomiarów przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi prądów zasilających baterię kondensatorową dla obciążenia kondensatorem bez dławika

Tabela 2. Wyniki pomiarów

	$\Delta P$ W	$Q$ kvar	$\Delta P/Q$ W/kvar
Bieg jałowy	17,81	-	-
Kondensator I bez dławika	47,3	9,9	3,0
Kondensator I z dławikiem	84,2	10,8	6,2
Kondensator II z dławikiem	63,2	8,7	5,2
Kondensator III z dławikiem	63,2	8,7	5,2

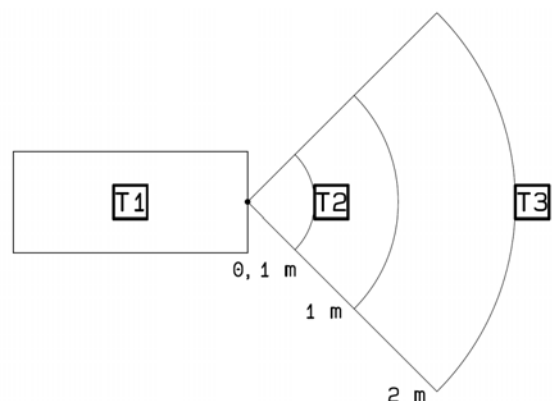
Następnie wykonano pomiary dla kondensatorów I, II oraz III w połączeniu z dławikiem ochronnym. Wartości pobranej mocy czynnej oraz generowanej mocy biernej wraz z wynikającym z tego stosunkiem strat mocy czynnej do generowanej mocy biernej  $\Delta P/Q$  przedstawiono w tabeli 2. Wyniki strat mocy czynnej dla poszczególnych kondensatorów nie zawierają strat mocy czynnej biegu jałowego wynoszącej  $\Delta P = 17,81\text{ W}$ .

Moc czynna pobierana podczas działania stopnia kompensującego pobierana jest nie tylko przez układy biegu jałowego i sam kondensator, ale rozpraszana jest również w przewodach przyłączeniowych, zabezpieczeniach nadprądowych, stycznikach oraz w dławiku ochronnym.

W przypadku kompensatora z kondensatorem I uzyskane wyniki pokazują wyraźny wzrost strat wynikający z podłączenia dławika ochronnego. Były one większe niż moc czynna wynikająca z przepływu wyższych harmonicznych przez kondensator. Kondensatory II i III, to baterie tego samego rodzaju, jednak o różnych mocach. Kondensator II wykonany jest jako pojedyncza bateria, natomiast kondensator III jako dwie baterie o mocy biernej równej połowie mocy kondensatora II. W obu przypadkach wyniki stosunku mocy czynnej do mocy biernej kompensatora były zbliżone i wynosiły  $\Delta P/Q = 5,2\text{ W/kvar}$ .

### Stanowisko pomiarowe badań temperaturowych

W celu wyznaczenia wzrostu temperatury wewnątrz obudowy kompensatora spowodowanych jego pracą przeprowadzono badania temperaturowe baterii kondensatorowej. Układ pomiarowy składał się z trzech czujników temperatury NTC oznaczonych na rys. 6 jako T1, T2 oraz T3 umieszczonych odpowiednio w środku obudowy kompensatora (T1) oraz na zewnątrz w odległości  $l_1 = 10\text{ cm}$  od bocznej ścianki kompensatora (T2) oraz w odległości  $l_2 = 2\text{ m}$  (T3). Urządzenie zbudowano na bazie stalowej obudowy hermetycznej o wymiarach  $800 \times 600 \times 300\text{ mm}$ .



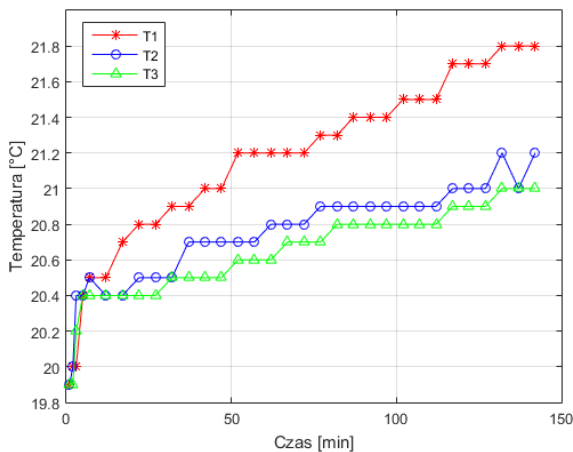
Rys. 6. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania wzrostu temperatury wewnętrznej kompensatora

### Wyniki badań temperaturowych

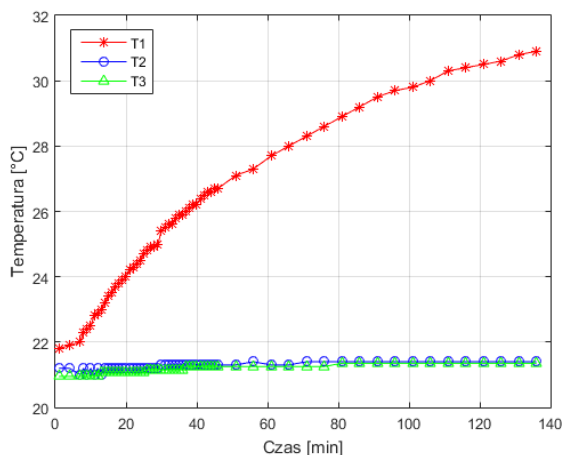
Badania temperatury rozpoczęto od rejestracji pracy jałowej kompensatora. Wyniki pomiarów zaprezentowano na rys. 7. W wyniku działania układu na biegu jałowym zaobserwowano wzrost temperatury wewnątrz urządzenia o  $\Delta T_1 = 2\text{ °C}$  w przeciągu 140 minut od momentu włączenia urządzenia. Wskazania dwóch pozostałych czujników temperatury również uległy wzrostowi odpowiednio o  $\Delta T_2 = 1,2\text{ °C}$  oraz  $\Delta T_3 = 1,2\text{ °C}$ . Początkowy duży przyrost temperatury spowodowany jest przepływem prądu pomiarowego przez termistory.

Kolejnym etapem było wyznaczenie przyrostu temperatury przy załączonym stopniu baterii kompensatora. W tym celu zamontowano kondensator II, który według pomiarów strat mocy wykazał się najniższym współczynnikiem  $\Delta P/Q$  w przypadku z użytym dławikiem ochronnym. Zmierzony przebieg nagrzewania się wnętrza obudowy kompensatora w postaci inercji pierwszego rzędu z opóźnieniem jest typowy dla układów temperaturowych (rys. 8). Początkowo w momencie włączenia stopnia kompensacyjnego dochodzi do tzw. opóźnienia, podczas

którego temperatura rośnie nieznacznie, aż do około szóstej minuty, gdy zaczyna narastać według funkcji eksponencjalnej do stanu ustalonego.



Rys. 7. Przebiegi badanych temperatur w czasie dla pracy jałowej kondensatora



Rys. 8. Przebiegi badanych temperatur w czasie dla pracy przy obciążeniu baterią kondensatorową z dławikiem zabezpieczającym

Temperatury na zewnątrz kondensatora kształtują się na bardzo zbliżonym poziomie i ustalają się na wartości:

$T_2 = T_3 = 21,4^{\circ}\text{C}$ . Temperatura wewnętrzna po czasie 135 minut od momentu włączenia obciążenia ukształtowała się na poziomie  $T_1 = 31,0^{\circ}\text{C}$ . Względny przyrost temperatury na koniec pomiarów wynosi  $\Delta T_1 = 9,6^{\circ}\text{C}$ . Odnosząc przyrost temperatury wewnętrznej do mocy biernej wytworzonej przez kondensator oraz uwzględniając objętość obudowy  $V = 144 \text{ dm}^3$  można wyznaczyć względny przyrost temperatury na jednostkę objętości obudowy w zależności od generowanej mocy biernej przez baterię kondensatorową.

$$(3) \quad \Delta T_{QV} = \frac{\Delta T}{Q \cdot V} = \frac{9,6}{8,68 \cdot 144} = 7,68 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{kVAr} \times \text{dm}^3}$$

### Wnioski

Przeprowadzone badania układu kompensacji mocy biernej pozwoliły na wyznaczenie strat mocy czynnej wewnątrz kondensatora w zależności od generowanej mocy biernej dla różnych typów kondensatorów kompensacyjnych. Dodatkowe badania umożliwiły zebranie wstępnych informacji dotyczących wzrostu temperatury

wewnątrz obudowy kompensatora w zależności od generowanej mocy biernej oraz kubatury obudowy. Przeprowadzone badania posłużą jako wytyczne dla projektantów obudowy przeciwwybuchowej dla kompensatorów o wyższych mocach, która to obudowa musi spełnić określone warunki odprowadzania ciepła wytwarzanego przez wewnętrzne układy sterująco-łączeniowe. Pomiary zmian temperatury dla przykładowej obudowy przy obciążeniu generującym 360 W mocy czynnej wskazują wstępnie, że będzie możliwe umieszczenie w niej kompensatora dla mocy biernej nie większej niż 50 kvar.

Praca zrealizowana w ramach projektu pt.: Rozproszony system poprawy jakości energii elektrycznej. Projekt współfinansowany z Funduszy Europejskich w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój.



**Autorzy:** Prof. dr hab. inż. Marian Pasko, [marian.pasko@polsl.pl](mailto:marian.pasko@polsl.pl), dr inż. Tomasz Adrikowski [tomasz.adrikowski@polsl.pl](mailto:tomasz.adrikowski@polsl.pl), dr inż. Dawid Buła, [dawid.bula@polsl.pl](mailto:dawid.bula@polsl.pl), Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, mgr inż. Damian Błaszczok [damian.blaszczok@polsl.pl](mailto:damian.blaszczok@polsl.pl), Politechnika Śląska, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice

### LITERATURA

- [1] Bielecki S.: Określanie strat powodowanych obciążeniem mocą bierną – metoda nie wykorzystująca pojęcia energetycznego równoważnika mocy biernej Przegląd Elektrotechniczny, R. 94 NR 9/2018, pp.80-84.
- [2] Roos, F., Bansal, Ramesh: Reactive power and harmonic compensation: A case study for the coal-mining industry, Journal of Energy in Southern Africa. 30, pp 34-48.
- [3] Hyla M.: Automatic compensation of reactive power with a system for monitoring a 6 kV electrical power grid in a mine, Min. - Inf. Autom. Electr. Eng. 2015 R. 53 nr 2, pp. 5-10.
- [4] Morán L., Albistur C. A., Burgos R.: Multimega VAR Passive Filters for Mining Applications: Practical Limitations and Technical Considerations," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 6, Nov.-Dec. 2016, pp. 5310-5317.
- [5] Rodriguez J. R. et al.: Technical evaluation and practical experience of high-power grinding mill drives in mining applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 3, May-June 2005, pp. 866-874.
- [6] Terkar A et al.: Investigation of harmonics and watt loss of capacitors bank, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, 2016, pp. 1-5.
- [7] Technical information, Capacitors and other key components for power factor correction in 50 Hz mains, Electronicon - [www.electronicon.com](http://www.electronicon.com)
- [8] Datasheet, Kondensatory trójfazowe niskiego napięcia LPC, ETI-Polam - [www.etipolam.com.pl](http://www.etipolam.com.pl)
- [9] Datasheet, Trójfazowe gazowe kondensatory do kompensacji mocy biernej niskich napięć MKG, Elma Energia [www.elma-energia.pl](http://www.elma-energia.pl)
- [10] Technical information, Dławiki do ochrony baterii kondensatorowych, Elhand - [www.elhand.pl](http://www.elhand.pl)
- [11] Technical information, Baterie kondensatorów, Bezpieczeństwo Elektryczne - [www.bezel.com.pl](http://www.bezel.com.pl)
- [12] PN-EN 60831, Kondensatory samoregenerujące do równoległej kompensacji mocy biernej w sieciach elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu znamionowym do 1 000 V włącznie