

Witalij SKOROPACKI, Michał SZEBESTA

PPHU ATUT Sp. z o.o.
Sosnowa 25, 40-467 Katowice

Przesyłanie energii elektrycznej w sposób iskrobezpieczny z wykorzystaniem toru współosiowego

Dr inż. Witalij SKOROPACKI

Ukończył studia na Wydziale Teletransmisji Odeskiej Narodowej Akademii Łączności. W 1971 r. obronił pracę doktorską. W latach 1972-1978 był starszym naukowym pracownikiem Instytutu Łączności w Kijowie. W latach 1979-2011 pracował jako docent w Centrum EMAG zatem w Głównym Instytucie Górnictwa. Obecnie pracuje jako konsultant naukowo-techniczny w PPHU „ATUT”. Specjalizuje się w dziedzinie automatyki górniczej. Jest autorem i współautorem 55 naukowych publikacji oraz 50 opatentowanych rozwiązań technicznych.



e-mail: wtskoropacki@gmail.com

Mgr inż. Michał SZEBESTA

Ukończył w 2011 r. Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej. Kontynuując naukę na studiach doktoranckich. Jego zainteresowania naukowe dotyczą nienaruszalności funkcjonalnej systemów kontroli bezpieczeństwa pracy i procesów technologicznych funkcjonujących w strefach zagrożonych wybuchem, a także iskrobezpiecznymi systemami łączności bezprzewodowej, nadzoru i lokalizacji środków transportu materiałów jak i personelu pracującego pod ziemią.



e-mail: michal.szebesta@atutnet.pl

Streszczenie

W pracy omówiono możliwość zwiększenia wartości energii elektrycznej przesyłanej na odległość w sposób iskrobezpieczny z wykorzystaniem metalowego toru do zasilania urządzeń elektronicznych ulokowanych w strefach zagrożonych wybuchem gazów i aerozoli palnych. W torze współosiowym zwiększenie dopuszczalnej wartości natężenia prądu może być zrealizowane za pomocą wykorzystania przewodu centralnego wykonanego jako skrętka z kilku cienkich przewodów odizolowanych od siebie elektrycznie (przewód typu lica). Pozwala to zmniejszyć indukcyjność wewnętrzną toru współosiowego i tym samym możliwość zwiększenia iskrobezpiecznej wartości natężenia prądu w obwodzie zdalnego zasilania.

Słowa kluczowe: strefa zagrożona wybuchem, iskrobezpieczeństwo, zdalne zasilanie, tor przewodowy, parametry kabla, energia elektromagnetyczna, wyładowanie iskrowe, układ ochronny.

Intrinsically safe electric energy transmission using a coaxial cable

Abstract

The paper presents the possibility of increasing the amount of electric energy sent via an intrinsically safe metal circuit for supply of power electronic devices located in hazardous areas where the fire/damp may occur. The factors deciding on the amount of the intrinsically safe electric energy transmitted over a distance are: loss of energy associated with the resistance of the circuit tracks, energy accumulated in reactance elements and the time delay caused by them. To minimize the energy loss, it seems to be a good solution to use a relatively high input voltage, but due to safety against electric shock only voltages up to 60 VDC can be taken under consideration. The transmission path represents a linear, passive electric cell with distributed parameters, which makes it a delay circuit whose time of delay is associated with its inductance and capacitance. The mentioned circuit delay affects the time of response of the safety circuit (with for ex. "foldback" type of protection) which ensures the intrinsic safety of the transmission path using the preemptive energy isolation at the moment of emergency commutation which may occur in any point of the circuit. In the paper there is stated that the coaxial cable permissible amount of energy can be increased within the usage of the central path made as the twisted pairs of multiple cords isolated electrically one from another (wire type "lica"). It allows decreasing the internal inductance of the coaxial path which enables the increase in the intrinsically safe current in the remote power supply circuit which also drops the response time of the safety barrier down.

Keywords: explosion-hazard zone, intrinsic safety, remote powering, metallic circuit, parameters of the cable, electromagnetic energy, spark discharge, protection device.

1. Uwagi wstępne

Z dniem uzyskania, przez Polskę, członkostwa w Unii Europejskiej wszystkie urządzenia automatyki, telemechaniki, telekomunikacji i systemy kontroli parametrów bezpieczeństwa przeznaczone

do stosowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem oraz urządzenia zabezpieczające, sterujące i regulacyjne, ulokowane w strefie bezpiecznej, lecz które przyczyniają się do bezpiecznego funkcjonowania urządzeń elektrycznych, ulokowanych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, muszą spełniać wymagania dyrektywy europejskiej ATEX [11,12]. Kontrola parametrów bezpieczeństwa i zagrożeń zawodowych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem powinna spełniać warunek autonomiczności, tzn. powinna być zapewniona ciągłość funkcjonowania przy dowolnej koncentracji medium wybuchowych, np. pyłów, gazów i par cieczy palnych. Warunek ten związany jest z koniecznością gwarantowanej, tzn. bez przerw, dostawy energii elektrycznej z wysoką stabilnością napięcia i niską zawartością składowych harmonicznych do terminali pomiarowych i telekomunikacyjnych ulokowanych w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Iskrobezpieczne zdalne zasilanie takich terminali jest najbardziej korzystną alternatywą dla zasilania lokalnego lub buforowego.

Wykonanie iskrobezpieczne "i" urządzeń elektrycznych jest jednym z rodzajów budo- wy przeciwwybuchowej, cechujące się tym, że wszystkie obwody elektryczne tych urządzeń nie są w stanie zainicjować zapłon mieszaniny palnej wskutek wyładowania iskrowego lub efektu termicznego podczas normalnej eksploatacji i w czasie prawdopodobnych uszkodzeń w postaci zwarcia lub rozwarcia obwodu elektrycznego (komutacji awaryjnej). Zapłon mieszaniny wybuchowej następuje w przypadku kiedy wartość energii bodźca energetycznego, tzn. wyładowania iskrowego, przekroczy wartość zdolną, z określonym prawdopodobieństwem w warunkach ustalonych, zainicjować zapłon mieszaniny palnej. W przypadku mieszanin gazowych całe ciepło wyładowania idzie na ogrzanie mieszaniny i jej utlenienie. W praktyce wartość ta określa się jako minimalna energia zapłonu i wyraża się w dżulach (J).

W pracy rozważono niektóre aspekty zwiększenia wartości energii elektrycznej przesyłanej na odległość w sposób iskrobezpieczny z wykorzystaniem toru współosiowego, którego centralny przewód jest wykonany w postaci kilku izolowanych między sobą żył roboczych. Sposób ten do tych czas nie został podejmowany w literaturze fachowej.

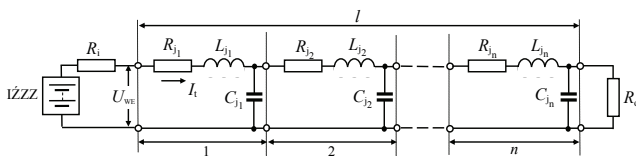
2. Warunki przesyłania energii elektrycznej w sposób iskrobezpieczny torem przewodowym

Przesyłanie energii elektrycznej na odległość w sposób iskrobezpieczny może być zrealizowane z wykorzystaniem toru macierzystego kabla metalowego (układ przewód- przewód) lub obwodu pochodnego utworzonego z dwóch torów macierzystych. Pożądanym jest aby tor przesyłowy, wykorzystywany do zdalnego zasilania, był jednocześnie być wykorzystywany do transmisji sygnałów informacyjnych.

Uproszczony model elektryczny obwodu zdalnego zasilania jest przedstawiony na rys. 1, gdzie tor przesyłowy o długości l jest przedstawiony w postaci kaskadowego połączenia n czwórników, zbudowanych ze skupionych elementów R, L, C o wartościach równych R_j, L_j, C_j - rezystancji, indukcyjności i pojemności jednostkowej toru odpowiednio [11]. Uwzględniając najmniej korzystny wariant, pod względem iskrobezpieczeństwa, iskrobezpieczne źródło zdalnego zasilania (IZZZ) przedstawiono w postaci elektrochemicznego źródła (baterii akumulatorów) o rezystancji wewnętrznej R_i .

Podstawowymi przyczynami zmniejszającymi wartość iskrobezpiecznej energii elektrycznej, dostarczanej na odległość, są: straty energii na rezystancji żył roboczych toru, magazynowanie energii elektrycznej w elementach reaktancyjnych toru oraz opóźnienie czasowe wskutek obecności tych elementów.

Iskrobezpieczna użyteczna moc P_{iskr} (moc elektryczna która może być przetworzona w energię ciepłą wskutek wyładowania iskrowego bez niebezpieczeństwa zapłonu mieszaniny wybuchowej) dostarczona do obciążenia R_o wynosi $P_{iskr} = I_t^2 \cdot R_o$, gdzie: I_t - natężenie prądu w torze, $I_t = U_{we} / (R_i + R_j \cdot l + R_o) \leq I_{zap}$, I_{zap} - minimalna wartość prądu zapłonu konkretnej mieszaniny wybuchowej, przyjmuje się jako wartość prądu, która wywoła je zapłon tej mieszaniny z prawdopodobieństwem $p=10^{-3}$. Dla zapewnienia optymalnych warunków przesyłania energii elektrycznej celowa jest praca w stanie dopasowania rezystancji wejściowych, $R_i + R_j \cdot l = R_o$. W warunkach praktycznych rezystancja wewnętrzna źródła zdalnego zasilania nie przekracza kilku omów, zwłaszcza przy stosowaniu zasilaczy akumulatorowych, $R_i \ll R_j \cdot l$ wtedy $I_t = U_{we} / 2R_j \cdot l \leq I_{zap}$.



Rys. 1. Model elektryczny obwodu zdalnego zasilania
Fig. 1. Remote power supply circuit model

Dla minimalizacji strat energii w torze celowe jest wykorzystanie stosunkowo wysokiej wartości U_{we} . Jednak, ze względu na bezpieczeństwo porażeniowe pod uwagę mogą być brane wartości U_{we} do 60 V [3].

Z kolei tor przesyłowy przedstawia sobą liniowe, pasywne ogniwo elektryczne o parametrach rozłożonych wskutek czego jest ogniwem opóźniającym, czas opóźnienia którego wynosi $\tau_o = l \sqrt{L_j C_j}$ [5], gdzie L_j, C_j - odpowiednio indukcyjność jednostkowa i pojemność jednostkowa toru. Opóźnienie wnoszone przez tor z kolei wpływa na czas zadziałania bariery ochronnej typu bocznika (np. "foldback" [3]), jako układu ochronnego na wyjściu źródła zdalnego zasilania, zapewniającego iskrobezpieczeństwo toru przesyłowego drogą wyprzedzającej izolacji energetycznej w chwili powstania komutacji awaryjnej w dowolnym punkcie tego toru.

Zapłon mieszaniny gazowej przy powstaniu komutacji awaryjnej w obwodzie przesyłowym towarzyszy szereg procesów, z których podstawowymi są:

- powstawanie wyładowania elektrycznego,
- przebieg wyładowania elektrycznego i wyzwolenie energii elektrycznej,
- kształtowanie jądra zapalenia w mieszance wybuchowej,

Bilans energii traconej przy wyładowaniu elektrycznym można w przypadku ogólnym wyrazić za pomocą wzoru

$$W_B = W_Z + W_K + W_T \quad (1)$$

gdzie: W_B - minimalna energia zapłonu mieszaniny wybuchowej, W_Z - bezwzględna wartość energii zapłonu, która powinna być dostarczona do punktu wyładowania elektrycznego dla zapłonu mieszaniny wybuchowej, W_K - energia tracona na nagrzewanie kontaktów, W_T - energia zużyta na inne straty ciepłne.

Dla uniknięcia zapłonu mieszaniny wybuchowej moc przetworzownika energii elektrycznej (punkt wyładowania) P_C nie powinna przekroczyć wartości dla spełnienia nierówności

$$\int_0^{\tau_w} P_C(t) dt < W_Z \quad (2)$$

Górna granica całkowania τ_w określa maksymalny czas trwania wyładowania elektrycznego, dla którego temperatura objętości jednostkowej nie zdąży osiągnąć wartości T_z .

Obecnie dla zmniejszenia τ_w najczęściej jest stosowane zabezpieczenie zwierające zaciski wejściowe źródła zasilania (tzw. boczniki ochronne wg normy [8]) przy przekroczeniu wartości progowej prądu w obwodzie chronionym. Wykorzystanie takiego zabezpieczenia wymaga spełnienia wymagań normy [8] polegających na ograniczeniu wartości energii przepływającej przez układ ochronny w stanie przejściowym.

Określimy wymaganą szybkość działania takiego układu ochronnego z następujących rozważań. Biorąc pod uwagę najbardziej niekorzystny, pod względem możliwości zapłonu mieszaniny wybuchowej, przypadek założmy, że rezystancja kanału wyładowania jest równa rezystancji wewnętrznej źródła zasilania, tj. $R_k = R_i$. Energia tracona w kanale wyładowania jest równa $W_k = U_{we}^2 \cdot t / 4R_i$. W celu uniemożliwienia zapłonu mieszaniny wybuchowej powinna być spełniona nierówność $W_k < W_Z$. Zatem układ zabezpieczający musi gwarantować odcięcie dopływu prądu od chwili powstania komutacji awaryjnej w czasie mniejszym od $\tau_g = W_Z \cdot 4R_i / U_{we}^2$.

3. Wpływ parametrów toru przesyłowego na iskrobezpieczeństwo obwodu zdalnego zasilania

Bezpieczeństwo przeciwwybuchowe dla wykonania iskrobezpiecznego uzyskuje się przez:

- ograniczenie mocy elektrycznej wprowadzonej do strefy zagrożonej poprzez ograniczenie napięcia lub prądu wprowadzonych do tej strefy,
- ograniczenie indukcyjności i pojemności wewnętrznej źródła kontaktującego ze strefą zagrożenia,
- ograniczenie wartości energii elektrycznej magazynowanej w elementach elektrycznych podłączanych w strefie zagrożenia do obwodu iskrobezpiecznego.

Wartość energii elektrycznej zgromadzonej w torze przesyłowym w stopniu znaczącym determinują o zdolności zapalającej obwodu zdalnego zasilania w układzie: zasilacz iskrobezpieczny - tor przesyłowy - odbiornik zasilania. Skomplikowana zależność między parametrami toru przesyłowego a jego zdolnością zapalającą powoduje, że otrzymanie ogólnego wzoru analitycznego, służącego do określenia wpływu tych parametrów na zdolność zapalającą, jest bardzo trudne. W związku z tym, w literaturze oraz w różnych materiałach normatywnych brakuje konkretnych zaleceń dotyczących wyboru najgorszego, pod względem iskro-

bezpieczeństwa, stanu awaryjnego obwodu zdalnego zasilania z wykorzystaniem toru przesyłowego.

Załóżmy, że różnica potencjałów pomiędzy przewodami na wejściu toru jest równa U_{we} .

W stanie ustalonym prąd w torze I_t jest równy

$$I_t = \frac{U_{we}}{R_{j_1} + R_{j_2} + \dots + R_{j_n} + R_o} = \frac{U_{we}}{R_j l + R_o} \quad (3)$$

gdzie l - długość toru przesyłowego.

Wykorzystując rozważania zawarte w [10], energię pola elektrycznego W_E zgromadzoną w torze przesyłowym o długości l można określić jako

$$W_E = \frac{C_j l}{2} \int_0^l (U_{we} - I_t R_j x)^2 dx = \frac{C_j U_{we}^2 l}{2} \left[1 - \frac{R_j l}{R_j l + R_o} + \frac{R_j^2 l^2}{3(R_j l + R_o)^2} \right] \quad (4)$$

Energia W_E jest maksymalna przy $R_o = \infty$, $W_{E_{max}} = C_j U_{we}^2 l / 2$.

Z kolei wartość energii pola magnetycznego W_M , zgromadzonej w torze przesyłowym, wyraża się za pomocą wzoru

$$W_M = \frac{L_j l}{2} \left(\frac{U_{we}}{R_j l + R_o} \right)^2 \quad (5)$$

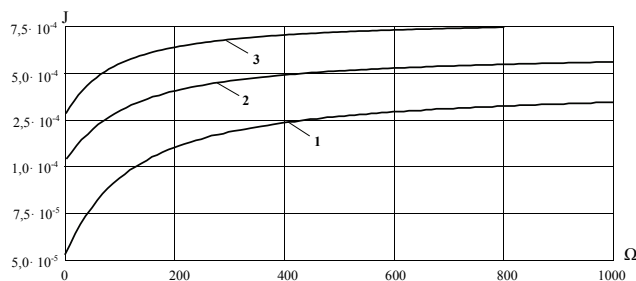
Energia W_M jest maksymalna przy $R_o = 0$, $W_{M_{max}} = L_j U_{we}^2 / 2R_j^2$.

Energia pola elektromagnetycznego W_{EM} zgromadzona w torze przesyłowym jest równa $W_{EM} = W_M + W_E$.

Przykładowo, wyniki obliczeń energii elektromagnetycznej zgromadzonej w torze symetrycznym dla typowego górniczego kabla telekomunikacyjnego typu YTKG o średnicy żył roboczych $d = 0,8$ mm i parametrach jednostkowych $R_j = 70$ Ω /km, $L_j = 0,7 \cdot 10^{-3}$ H/km, $C_j = 50 \cdot 10^{-9}$ F/km, o długości $l = 10$ km dla różnych obciążeń rezystancyjnych są ilustrowane krzywymi przedstawionymi na rys. 1.

Jak wiadomo, wartość bezwzględna energii zapłonu mieszaniny metanowo-powietrznej jest równa 0,28 mJ [1], a mieszaniny wodorowo-powietrznej - 0,019 mJ. Zatem, w warunkach rzeczywistych przy organizacji zdalnego zasilania terminali elektronicznych w kopalni na odległość do 10 km, przy ograniczonej wartości napięcia zdalnego zasilania 60 V prądu stałego - ze względu na bezpieczeństwo porażeniowe [3] - energia elektromagnetyczna zgromadzona w torze typowego górniczego kabla telekomunikacyjnego nie jest wystarczająca do zapalenia mieszaniny metanowo-powietrznej. Z kolei w dużej liczbie przypadków wartość energii jest dostateczna dla zapalenia mieszaniny wodorowo-powietrznej.

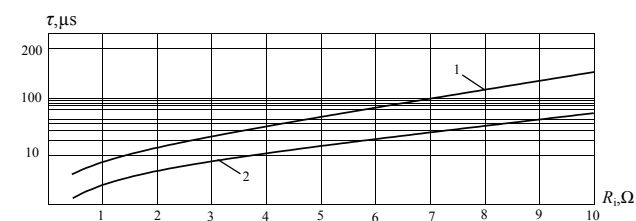
Zauważmy, że dla obwodów indukcyjnych grupy I minimalny prąd zapalający dla indukcyjności skupionej $L = 0,7 \cdot 10^{-3}$ H wynosi około 0,3A (przy napięciu źródła $U_z = 60$ V), a dopuszczalna pojemność C_{dop} przy napięciu $U_z = 60$ V przekracza 30 μ F (dla obwodu pojemnościowego $C + 40\Omega$, rys. 2 normy [8]). Z tego wynika, że pojemność i indukcyjność jednostkowa toru przesyłowego telekomunikacyjnego kabla górniczego o średnicy żył $\varnothing = 0,8$ mm nie są decydującymi czynnikami iskrobezpieczeństwa dla obwodów elektrycznych grupy I, a tor przesyłowy takiego kabla nie może być rozpatrywany jako odrębne źródło zapalenia mieszaniny metanowo-powietrznej występującej w kopalniach węgla kamiennego. Wpływ parametrów pierwotnych toru przesyłowego na warunki wyładowania elektrycznego należy uwzględnić w połączeniu z oddziaływaniem źródła zdalnego zasilania i odbiornika energii zasilania.



Rys. 2. Wartości energii elektromagnetycznej zgromadzonej w torze symetrycznym o parametrach jednostkowych: $R_j = 70$ Ω /km, $C_j = 50 \cdot 10^{-9}$ F/km, $L_j = 0,7 \cdot 10^{-3}$ H/km; 1 - dla $U_{we} = 24$ V, 2 - dla $U_{we} = 48$ V, 3 - dla $U_{we} = 60$ V

Fig. 2. Amount of the electromagnetic energy stored in the symmetric path of unit parameters: $R_j = 70$ Ω /km, $C_j = 50 \cdot 10^{-9}$ F/km, $L_j = 0,7 \cdot 10^{-3}$ H/km; 1 - for $U_{we} = 24$ V, 2 - for $U_{we} = 48$ V, 3 - for $U_{we} = 60$ V

Tor przesyłowy, jako ogniwo opóźniające, narzuca pewne ograniczenia w stosunku do wyboru wartości U_{we} oraz rezystancji wewnętrznej źródła zdalnego zasilania R_i . Na rys. 3 przedstawiono krzywe ilustrujące zależność czasu od rezystancji wewnętrznej centralnego źródła zasilania, w ciągu którego układ ochronny z nieliniową charakterystyką wyjściową (na przykład typu "foldback" [3]) powinien dokonać wyprzedzającego odcięcia dopływu prądu do obciążenia, począwszy od chwili powstania komutacji awaryjnej.



Rys. 3. Czas wyprzedzającego odcięcia dopływu prądu do obciążenia w zależności od rezystancji wewnętrznej źródła zasilania. 1- dla $U_{we} = 12$ V; 2- dla $U_{we} = 24$ V

Fig. 3. Time of the pre-cut of the load current depending on the internal resistance of power supply. 1- for $U_{we} = 12$ V; 2- for $U_{we} = 24$ V

Zatem, przy organizacji zdalnego zasilania odbiorników energii elektrycznej, ulokowanych w strefie zagrożonej wybuchem, znaczna część energii elektrycznej jest tracona na rezystancji żył roboczych toru macierzystego. Zmniejszenie tych strat jest możliwą drogą stosowania toru przewodowego z żyłami roboczymi o większym przekroju. Jednak ta droga skutkuje zwiększeniem strat na rezystorze ograniczającym włączanym na wyjściu źródła zasilania dla zapewnienia iskrobezpieczeństwa jego obwodu wyjściowego.

4. Stosowanie toru współosiowego dla przesyłania energii elektrycznej w sposób iskrobezpieczny

Indukcyjność jednostkowa miedzianego jednorodnego toru symetrycznego może być przedstawiona sumą [4]

$$L_j = x(L_{jz} + L_{jw}) \quad (6)$$

gdzie: x - współczynnik wydłużenia żył roboczych toru symetrycznego wskutek skręcania (zwykle $1,01 < x < 1,2$), L_{jz} i L_{jw} - odpowiednio indukcyjność jednostkowa związana z polem magnetycznym występującym na zewnątrz i wewnątrz i żył roboczych toru.

W zapisie praktycznym

$$L_j = 0,1 X \left[4 \ln \left(\frac{2a}{d} - 1 \right) + \mu_w Q(z_o) \right] \frac{\text{mH}}{\text{km}} \quad (7)$$

gdzie: a – odległość między osiami żył roboczych, d – średnica żył roboczych, μ_w – przenikalność względna materiału żył roboczych (dla miedzi $\mu_w = 1$), $Q(z_o)$ – funkcja pomocnicza zależna od wielkości z_o , która z kolei zależy od częstotliwości f i średnicy żył roboczych jako $z_o = k \cdot 10^{-3} \sqrt{f}$ (dla średnic d żył roboczych toru symetrycznego od 0,4 mm do 2 mm $k \approx 10,6$).

Pojemność jednostkowa jednorodnego toru symetrycznego w postaci praktycznej wyraża się jako

$$C_j = x \frac{\varepsilon_w}{36 \ln \left[\frac{a}{d} + \sqrt{\left(\frac{a}{d} \right)^2 - 1} \right]} 10^3 \frac{\text{nF}}{\text{km}} \quad (8)$$

gdzie ε_w – przenikalność elektryczna względna izolacji żył roboczych.

Indukcyjność L_j miedzianego toru współosiowego z jednolitym centralnym przewodem w postaci praktycznej można wyrazić jako

$$L_j = \left[2 \ln \frac{D}{d} + \frac{133,3}{\sqrt{f}} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \right] \cdot 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}} \quad (9)$$

gdzie: D – wewnętrzna średnica opłotu, d – średnicą centralnego przewodu.

Dla optymalnego stosunku średnic $D/d = 3,6$ w postaci uproszczonej L_j wyraża się za pomocą wzoru [4]

$$L_j \approx 0,256 + \frac{61,3}{D \sqrt{f}} \frac{\text{mH}}{\text{km}} \quad (10)$$

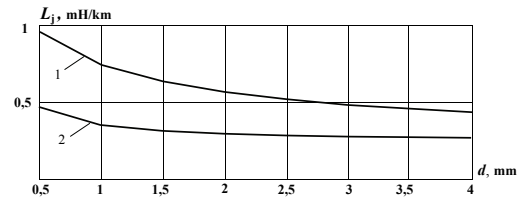
Z kolei pojemność jednostkowa miedzianego toru współosiowego w formie uproszczonej wyraża się za pomocą wzoru

$$C_j \approx 43,4 \varepsilon_w \frac{\text{nF}}{\text{km}} \quad (11)$$

Na rys. 4 są przedstawione wykresy charakteryzujące zależność L_j od średnicy żył roboczych toru symetrycznego oraz toru współosiowego dla optymalnego stosunku średnic ($D/d = 3,6$), polietylenowej izolacji żył ($\varepsilon_w = 2,3$) i częstotliwości $f = 50$ kHz.

Zauważmy, że w zakresie typowych średnic ($1 \div 3$ mm) i grubości izolacji ($\Delta = 0,8$ mm) żył roboczych telekomunikacyjnych i sygnalizacyjnych kabli górniczych indukcyjność jednostkowa toru symetrycznego jest około dwóch razy większa w odniesieniu do toru współosiowego przy optymalnym stosunku średnic toru współosiowego $D/d = 3,6$. Natomiast pojemność jednostkowa jest mniejsza.

Zauważmy, że w zakresie typowych średnic ($1 \div 3$ mm) i grubości izolacji ($\Delta = 0,8$ mm) żył roboczych telekomunikacyjnych i sygnalizacyjnych kabli górniczych indukcyjność jednostkowa toru symetrycznego jest około dwóch razy większa w odniesieniu do toru współosiowego przy optymalnym stosunku średnic toru współosiowego $D/d = 3,6$. Natomiast pojemność jednostkowa jest mniejsza.



Rys. 4. Indukcyjność jednostkowa w zależności od średnicy żył roboczych dla toru symetrycznego i toru współosiowego przy optymalnym stosunku średnic $D/d = 3,6$; $f = 50$ kHz; 1- dla toru symetrycznego, 2- dla toru współosiowego

Fig. 4. Unit inductance vs. the diameter of wires for symmetrical path and coaxial cable at the optimal diameter ratio $D/d = 3.6$ $f = 50$ kHz, 1 – for symmetrical path, 2 – for coaxial cable

Dla wartości granicznej napięcia zasilania $U_{we} = 60$ V dopuszczalna sumaryczna pojemność w obwodzie iskrobezpiecznego wynosi około $C_0 = 3$ mF (dla obwodu pojemnościowego $C + 5,6 \Omega$ rys. 2 normy [8] oraz współczynnika bezpieczeństwa $k = 1,5$). Wartość energii elektrycznej zgromadzonej w takiej pojemności wynosi $W_E = CU^2/2 = 5,4$ mJ, w ten czas jak maksymalna wartość energii elektrycznej zgromadzonej w torze współosiowym o długości $l = 10$ km w trybie $R_0 = \infty$ wynosi $W_E = 0,153$ mJ (dla $C_j = 85$ nF/km i $U_{we} = 60$ V).

Zatem, przy organizacji zdalnego iskrobezpiecznego zasilania prądem stałym z wykorzystaniem toru przesyłowego czynnikiem decydującym, pod względem iskrobezpieczeństwa, zostaje sumaryczna wartość indukcyjności tego toru, wartość której z kolei określa dopuszczalną wartość natężenia prądu w torze przesyłowym i tym samym wartość iskrobezpiecznej mocy dostarczonej na odległość.

Z powyższego wynika, że zmniejszenie strat energii elektrycznej na rezystancji toru przesyłowego drogą stosowania żył roboczych o większym przekroju ma ograniczone zastosowanie. Przy zapewnieniu iskrobezpieczeństwa obwodu zdalnego zasilania za pomocą liniowych układów ochronnych zwiększenie przekroju żył roboczych pogarsza, wymagany przez normę [8], stosunek indukcyjności obciążenia do rezystancji obciążenia jakie mogą być przyłączone do źródła zasilania z liniową charakterystyką wyjściową, tzn. z rezystorem ograniczającym. Spełnienie tego warunku wymaga zwiększenia rezystora ograniczającego, co z kolei skutkuje zmniejszeniem wartości iskrobezpiecznej mocy przesyłanej na odległość. Wymagania odnośnie stosunku indukcyjności obciążenia do rezystancji obciążenia nie dotyczą obwodów iskrobezpiecznych zasilanych ze źródła z nieliniową charakterystyką wyjściową. W tym przypadku osiąga się zwiększenia iskrobezpiecznej mocy elektrycznej przesyłanej na odległość, jednak indukcyjność toru przesyłowego zostaje istotną przyczyną ograniczającą możliwość zwiększenia natężenia prądu w tym torze i iskrobezpiecznej mocy zdalnego zasilania.

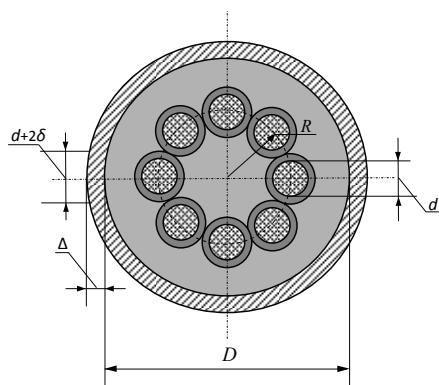
W torze współosiowym zwiększenie dopuszczalnej wartości natężenia prądu może być zrealizowane za pomocą wykorzystania przewodu centralnego wykonanego jako skrętka z kilku cienkich przewodów odizolowanych od siebie elektrycznie (przewód typu lica). Pozwala to zmniejszyć indukcyjność wewnętrzną toru współosiowego i tym samym możliwość zwiększenia iskrobezpiecznej wartości natężenia prądu w obwodzie zdalnego zasilania. Przykładowy przekrój takiego toru współosiowego przedstawiono na rys. 5.

Indukcyjność jednostkowa L_j takiego toru współosiowego dla prądu stałego i niskich częstotliwości w postaci praktycznej można przedstawić jako [2]

$$L_j = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{D}{2R} + \frac{1}{3} \cdot \frac{2\Delta}{D} \left(1 - \frac{0,4 \cdot \Delta^2}{D^2} \right) + \frac{1}{4m} + \frac{1}{m} \ln \frac{R}{m\rho} \right] \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right] \quad (12)$$

Z kolei indukcyjność jednostkowa takiego toru dla wysokich częstotliwości można wyrazić jako

$$L_j = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{D}{2R + \rho} \right] \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right] \quad (13)$$

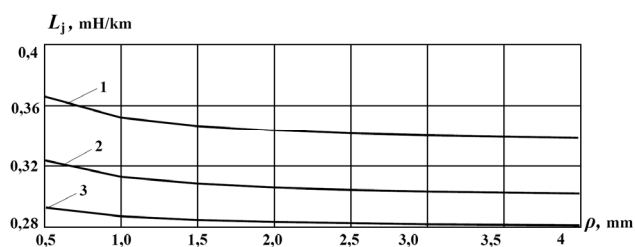


Rys. 5. Przekrój toru współosiowego z centralnym przewodem typu lica
Fig. 5. Coaxial cable profile with the core wire of type lica

We wzorach (12) i (13) przyjęte oznaczenia: μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), D - średnica wewnętrzna przewodu zewnętrznego [mm], R - promień koła na którym są umieszczone środki żył przewodu centralnego [mm], Δ - grubość ścianki przewodu zewnętrznego [mm], m - liczba żył przewodu wewnętrznego, ρ - promień pojedynczej żyły przewodu wewnętrznego ($\rho = d/2$) [mm].

Parametr R można określić jako $R = m(\rho + \delta)/\pi$. Z kolei dla optymalnego stosunku średnic przewodów toru współosiowego $D = 7,2(R + \rho + \delta)$.

Przykładowo, na rys. 6 przedstawiono wykresy zależności indukcyjności jednostkowej toru współosiowego od średnicy pojedynczych żył centralnego przewodu dla toru współosiowego obliczone dla różnej liczby żył roboczych m .



Rys. 6. Indukcyjność jednostkowa toru współosiowego w zależności od średnicy i liczby żył roboczych m przewodu centralnego dla optymalnego stosunku średnic $D/d=3,6$; $\Delta=0,5$ mm; $\delta=0,5$ mm; 1- dla $m=4$; 2- dla $m=8$ mm; 3- dla $m=16$ mm; 4- dla toru współosiowego

Fig. 6. The unit inductance of the coaxial path vs. the diameter and the number of wires "m" in the core for the optimal diameter ratio $D/d=3.6$ $\Delta=0,5$ mm; $\delta=0,5$ mm; 1-for $m=4$; 2- for $m=8$ mm; 3- for $m=16$ mm; 4- for coaxial path

W celu uproszczenia analizy porównawczej, założmy że przy organizacji zdalnego zasilania prądem stałym rezystancje toru symetrycznego i współosiowego są równe.

Rezystancję jednostkową toru symetrycznego dla prądu stałego można wyrazić wzorem [9].

$$R_{js} = 8x \frac{q}{\pi d^2} 10^3 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad (14)$$

gdzie: d i q - odpowiednio średnica i opór właściwy materiału żył roboczych (dla miedzi przy temperaturze 20°C $q = 0,0175 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$).

Rezystancja jednostkowa toru współosiowego przy prądzie stałym to suma dwóch składników $R_{jw} = R_a + R_b$ (R_a i R_b - odpowiednio rezystancja jednostkowa przewodu wewnętrznego i zewnętrznego dla prądu stałego). Dla przyjętych założeń $R_{jw} = R_{js}$. Założmy również, że przekrój przewodu wewnętrznego toru współosiowego przekroju jednej żyły toru symetrycznego są równe, tzn. $R_a = R_{js}/2$. Dla zachowania jednakowych wartości rezystancji $R_b = R_a = R_{js}/2$ i optymalnego stosunku średnic $D/d = 3,6$ grubość ścianki Δ przewodu zewnętrznego powinna wynosić $\Delta = 1,84 \cdot d - 1,8$. Zatem dla toru symetrycznego o średnicy żył roboczych $d = 2$ mm rezystancja jednostkowa według (14) wynosi $R_{js} = 11,31 \Omega/\text{km}$. Dla średnicy jednolitego przewodu wewnętrznego toru współosiowego $d = 2$ mm średnica wewnętrzna D przewodu zewnętrznego powinna wynosić $D = 3,6 \cdot d = 7,2$ mm, a grubość jego ścianki powinna wynosić $\Delta = 1,88$ mm.

Przykładowo w tablicy 1 przedstawiono wyniki obliczeń potencjalnej wartości iskrobezpiecznej P_i mocy która może być dostarczona do odbiornika energii elektrycznej o rezystancji wejściowej R_0 , ulokowanego na odległości l , dla różnych wartości napięcia na wejściu toru przesyłowego U_{we} . Obliczenia przeprowadzono dla grupy urządzeń I (górnictwo) z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa $k = 1,5$.

Należy podkreślić, że w przypadku przesyłania energii elektrycznej torem przewodowym w sposób iskrobezpieczny zasada dopasowania rezystancji wejściowych nie zawsze może być realizowana, ponieważ graniczna iskrobezpieczna wartość natężenia prądu w torze przesyłowym zależy od stosunku wartości indukcyjności i rezystancji toru i ma charakter nieliniowy [8].

Tab. 1. Potencjalna wartość iskrobezpiecznej mocy P_i przesłanej na odległość l do obciążenia R_0 obliczona dla różnych wartości U_{we} i średnic d żył roboczych toru symetrycznego i współosiowego z wykorzystaniem układów ochronnych z nieliniową charakterystyką wyjściową (grupa I, $k=1,5$)

Tab. 1. Potential amount of the intrinsically safe power P_i sent over distance l to load R_0 calculated for different U_{we} values and diameters d of the core wires of the symmetrical and coaxial path with use of safety circuits with nonlinear output characteristic (group I, $k=1,5$)

		$\Delta = 0,5; \delta = 0,5$		tor symetryczny ($x=1,02$)				tor współosiowy ($m=8$)			
				0,8	1,2	1,6	2,0	0,8	1,2	1,6	2,0
P_i, W	U_{we}	12 V	$l = 1 \text{ km}$	0.51	1.14	2.13	3.22	0.51	1.14	2.13	2.13
			$l = 2 \text{ km}$	0.26	0.63	1.11	1.62	0.26	0.63	1.11	1.11
			$l = 4 \text{ km}$	0.13	0.28	0.50	0.72	0.14	0.30	0.65	0.72
			$l = 8 \text{ km}$	0.06	0.14	0.25	0.39	0.06	0.14	0.25	0.40
		36 V	$l = 1 \text{ km}$	3.81	4.62	4.91	6.12	4.62	5.8	6.4	18.40
			$l = 2 \text{ km}$	2.32	4.42	5.43	5.84	2.32	5.12	5.75	16.75
			$l = 4 \text{ km}$	1.22	2.44	4.28	5.22	1.24	2.78	4.55	11.85
			$l = 8 \text{ km}$	0.57	1.29	3.72	4.46	0.57	1.38	4.05	9.05
		48 V	$l = 1 \text{ km}$	4.64	7.12	9.81	12.44	5.12	6.47	14.1	20.22
			$l = 2 \text{ km}$	3.67	5.42	8.41	10.96	4.07	9.16	10.4	18.24
			$l = 4 \text{ km}$	1.71	3.57	6.06	8.24	1.83	4.58	8.5	14.11
			$l = 8 \text{ km}$	1.02	2.06	3.94	5.68	1.02	2.32	4.46	10.14

5. Podsumowanie

Czynnikami decydującymi o wartości iskrobezpiecznej mocy elektrycznej dostarczonej na odległość metalowym torem przesyłowym są: rezystancja żył roboczych, sumaryczna wartość induk-

cyjności tego toru oraz czas opóźnienia wnoszonego przez tor, ponieważ czas ten z kolei określa czas reakcji układu ochronnego.

Wartość indukcyjności toru przesyłowego determinuje dopuszczalną wartość natężenia prądu w torze przesyłowym i tym samym wartość iskrobezpiecznej mocy dostarczonej na odległość.

Zwiększenie iskrobezpiecznej mocy elektrycznej dostarczonej na odległość jest możliwe drogą zwiększenia przekroju żył roboczych przy jednoczesnym zmniejszeniu indukcyjności sumarycznej toru przesyłowego. Techniczna realizacja takiego toru jest możliwa na bazie wykorzystania toru współosiowego z przewodem centralnym wykonanym jako skrętka z kilku cienkich przewodów odizolowanych od siebie elektrycznie (przewód typu lica). Pozwala to około dwóch raz zmniejszyć, w odniesieniu do toru symetrycznego, indukcyjność wewnętrzną toru współosiowego i tym samym zwiększyć iskrobezpieczną wartość natężenia prądu w obwodzie zdalnego zasilania. Zwiększenie iskrobezpiecznej mocy dostarczonej do odbiornika energii elektrycznej ułożonego na odległości jest wyraźnie w przypadku organizacji zdalnego zasilania z wykorzystaniem toru współosiowego z centralnym przewodem wykonanym w postaci skrętki z kilku cienkich żył odizolowanych od siebie elektrycznie.

6. Literatura

- [1] Frączek J.: Aparatura przeciwybuchowa w wykonaniu iskrobezpiecznym. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1995.
 [2] Kalantarov P.L., Cejtin L.A.: Rasczet inductivnostej. Energoatomizdat. Leningrad, 1986.

- [3] Miśkiewicz K., Skoropacki W.: Iskrobezpieczne zasilacze prądu stałego stan obecny, perspektywy rozwoju. Mechanizacja i Automatyza Górnictwa, vol.11/453, s. 19-24, 2008.
 [4] Nowicki W.: Podstawy teletransmisji. Tom I. Wyd. Komunikacji i Łączności. Warszawa, 1971.
 [5] Otto J., Smith M.: Feedback control systems. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, London, 1958.
 [6] Osowski J., Szabatin J.: Podstawy teorii obwodów. Tom III, Wydawnictwa WNT, Warszawa 1995.
 [7] PN-IEC 60364-4-41. Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przeciwporażeniowa.
 [8] PN-EN-60079-11. Atmosfery wybuchowe. Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i".
 [9] Piątek P.: Modelowanie linii, kabli i torów wielkopiędowych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa, 2007.
 [10] Skoropacki W.: Problemy zwielokrotnienia torów naturalnych kopalnianej sieci telekomunikacyjnej. Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, vol. 837, 1999.
 [11] Skoropacki W.: Modelowanie fizyczne toru przewodowego przy ocenie iskrobezpieczeństwa obwodów i systemów elektrycznych. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, vol. 2, s. 33-48, 2003.
 [12] Wytyczne wdrażania Dyrektywy Rady 94/9WE z 23 marca 1994 r. w sprawie jednolitego przepisów prawnych Państw Członkowskich dotyczących urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, Ministerstwo Gospodarki w Warszawie, wydanie czwarte - wrzesień 2012.

otrzymano / received: 20.05.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.01.2014

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE

www.energoelektronika.pl
 WORTAL BRANŻOWY



Regionalne Seminaria / Szkolenia dla Służb Utrzymania Ruchu

06.02.2014 - Bielsko-Biała
 13.03.2014 - Legnica
 24.04.2014 - Ełk
 22.05.2014 - Mielec
 26.06.2014 - Zamość
 02.10.2014 - Szczecin
 20.11.2014 - Włocławek
 11.12.2014 - Konin



Ilość miejsc ograniczona

Jeżeli jesteś zainteresowany uczestnictwem w Seminarium, zaprezentowaniem produktu lub nowego rozwiązania napisz do nas: marketing@energoelektronika.pl

Energoelektronika.pl tel. (+48) 22 70 35 291

Partnerzy:

