

Separacja galwaniczna – wybrane aspekty ATEX

Artykuł systematyzuje podstawowe informacje dotyczące separacji galwanicznej, opisuje przyczyny jej stosowania oraz sposoby realizacji. W artykule poruszone zostały wybrane zagadnienia związane z separacją galwaniczną w iskrobezpiecznych urządzeniach i systemach automatyki. Opisano wymagane normą PN-EN 60079-11 środki zapewniające iskrobezpieczeństwo poszczególnych rozwiązań separacji galwanicznej oraz wpływ stosowania tych środków na właściwości funkcjonalne układów separacji. Przedstawione zostały możliwości ograniczenia wartości parametrów układów separacji wynikające ze stosowania środków zapewniających iskrobezpieczeństwo [2].

słowa kluczowe: iskrobezpieczeństwo, automatyka, separacja galwaniczna

1. WSTĘP

Separacja galwaniczna stanowi izolację uniemożliwiającą bezpośredni przepływ prądu elektrycznego pomiędzy co najmniej dwoma blokami systemu. W zależności od zastosowania separacja galwaniczna może dotyczyć:

- przekazywania (przesyłu) energii (separacja zasilania),
- przekazywania (przesyłu) informacji (separacja komunikacji analogowej albo cyfrowej).

Przekazywanie informacji również odbywa się za pośrednictwem przesyłu energii, która w tym przypadku jednak powinna być minimalna, wystarczająca do tego celu.

Aby było możliwe przekazywanie energii lub informacji bez bezpośredniego przepływu prądu elektrycznego pomiędzy blokami systemu, wykorzystywane mogą być różne rodzaje sprzężenia (działające w oparciu o różne zjawiska fizyczne), w szczególności: pojemnościowe (napięcie – pole elektryczne), indukcyjne (prąd – pole magnetyczne), elektromagnetyczne (pole elektromagnetyczne), optyczne (zjawiska fotoelektryczne, elektroluminescencyjne), elektromechaniczne.

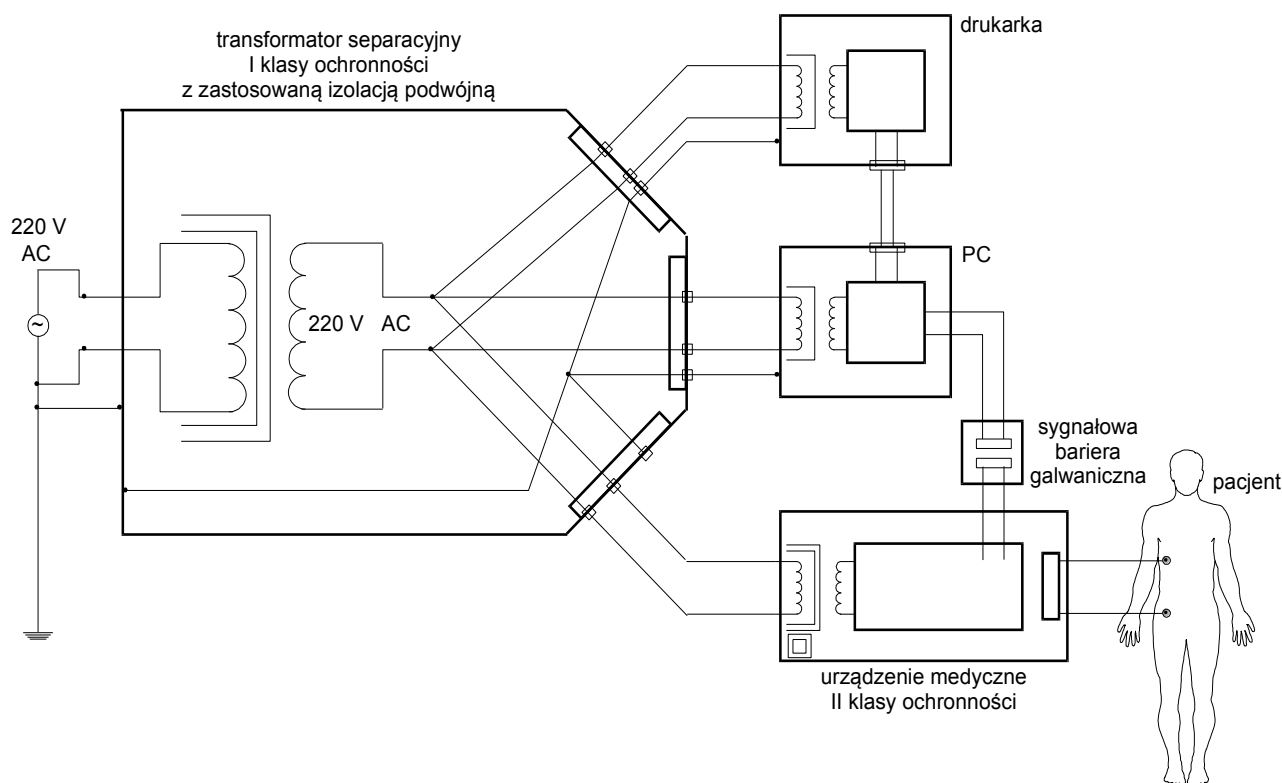
Znaczne zróżnicowanie poszczególnych, licznych aspektów związanych z wykorzystywanymi zjawiskami

fizycznymi w bezpośredni sposób rzutuje na odmienne właściwości różnych sposobów separacji, które je wykorzystują, a tym samym – na parametry możliwe do uzyskania. Z tego powodu poszczególne sposoby sprzężenia znalazły stosowanie tam, gdzie możliwe było wykorzystanie ich elementów o charakterze zalet przy akceptowalnym wpływie elementów o charakterze wad. Do przekazywania informacji wykorzystywane są wszystkie wyżej wymienione rodzaje sprzężeń, natomiast do przekazywania energii – głównie sprzężenie indukcyjne, ponieważ pozwala ono uzyskiwać wysoką sprawność energetyczną.

2. POWODY STOSOWANIA SEPARACJI

Można wyróżnić kilka wzajemnie niewykluczających się powodów stosowania separacji galwanicznej:

1. **Względny bezpieczeństwa użytkownika.** W tym przypadku separacja ma na celu zapewnienie bezpieczeństwa przeciwporażeniowego, przykładowo wymóg taki dotyczy aparatury biomedycznej, gdzie stosowanie separacji 4 kV jest wymagane normą IEC 60601-1. Na rys. 1. przedstawiono przykład systemu medycznego z zastosowanymi urządzeniami komputerowymi i z pełną możliwą separacją w systemie.



Rys. 1. Przykład medycznego systemu z zastosowanymi urządzeniami komputerowymi i z pełną możliwą separacją w systemie [1]

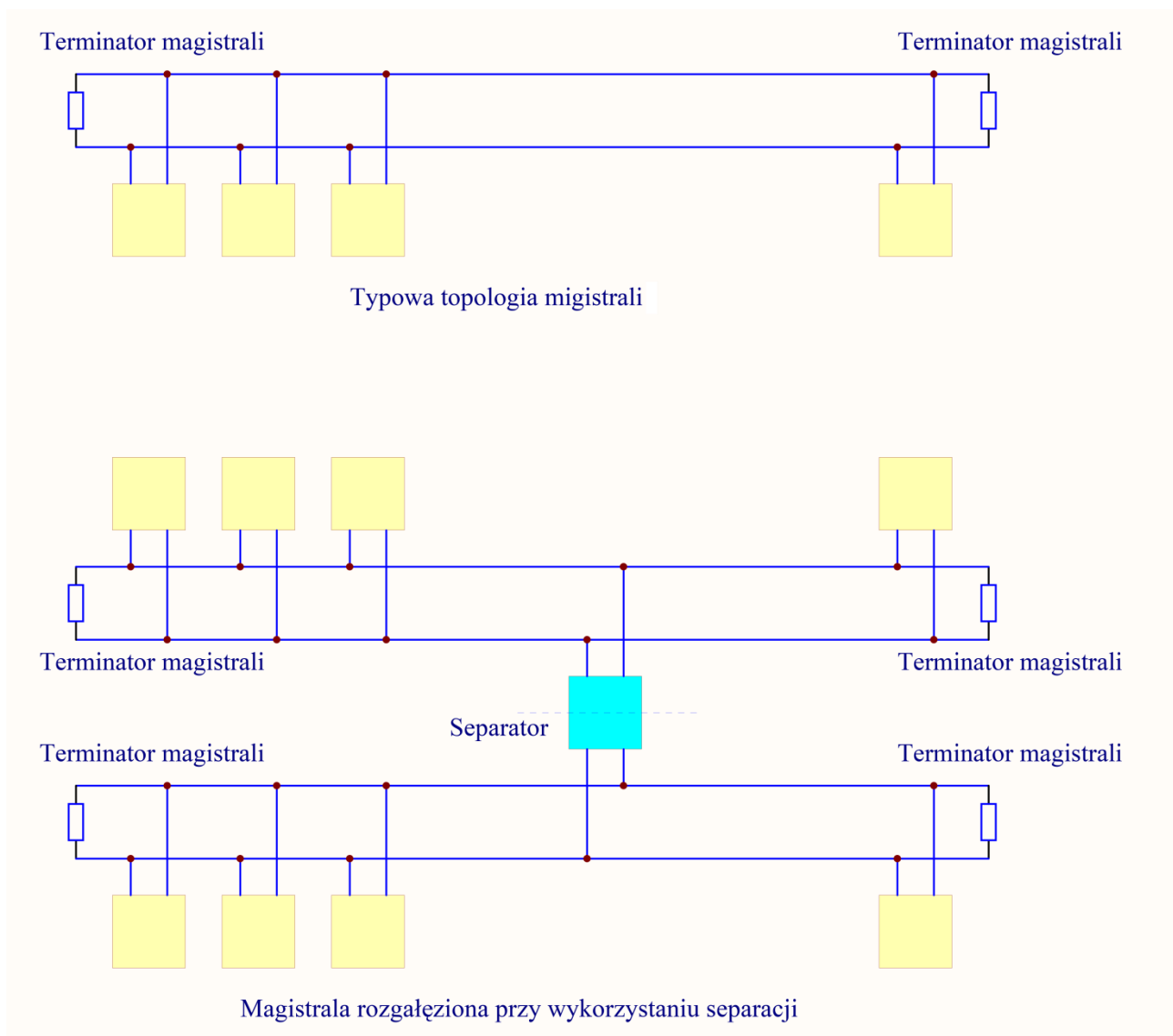
2. **Zabezpieczenie urządzeń przed uszkodzeniem** – separacja jest stosowana, aby zapobiec potencjalnym uszkodzeniom urządzeń, zwłaszcza w rozproszonych systemach i przy obiektach dużej mocy.
3. **Względy kompatybilności elektromagnetycznej** – ograniczenie propagowania się zaburzeń elektromagnetycznych, stosowane zarówno w połączeniach pomiędzy urządzeniami wchodzącymi w skład systemu, jak też w obrębie pojedynczych urządzeń [3]. W środowiskach charakteryzujących się występowaniem silnych zaburzeń elektromagnetycznych często wykorzystywana jest niepodatna na nie komunikacja światłowodowa, zarówno na dłuższych odległościach, jak również do separacji lokalnej.
4. **Względy bezpieczeństwa przeciwybuchowego** – energia wyjściowa iskrobezpiecznych źródeł zasilania musi być odpowiednio ograniczona dla zapewnienia bezpieczeństwa przeciwybuchowego. Dopuszczalna pojemność i indukcyjność obciążenia źródła iskrobezpiecznego maleją ze wzrostem jego maksymalnego napięcia i prądu wyjściowego. W rozbudowanych i rozległych systemach automatyki implikuje to konieczność dzielenia ich na osobne obwody iskrobezpieczne zasilane z oddzielnych źródeł, co z kolei narzuca konieczność

stosowania separacji celem umożliwienia komunikacji pomiędzy tymi obwodami, jak również po spełnieniu odpowiednich wymagań – pomiędzy obwodami iskrobezpiecznymi a nieiskrobezpiecznymi. Wymagania dotyczące iskrobezpieczeństwa zawarte są w normie PN-EN 60079-11:2012 [4]. Ponadto w przypadku realizacji transmisji światłowodowej w strefie zagrożonej wybuchem konieczne jest spełnienie wymagań normy PN-EN 60079-28:2010 [5].

5. **Układy pomiarowe i testowe.** W urządzeniach pomiarowych i testowych wielkości elektrycznych stosowana jest separacja zasilania (w przypadku zasilania sieciowego) lub separacja wejścia/wejść i wyjścia/wyjść pomiarowych, co oprócz względów wymienionych w pozostałych punktach znacząco zwiększa możliwości konfiguracji układu pomiarowego/testowego. Separacja pozwala na dołączanie wejść i wyjść urządzeń pomiarowych i testowych do dowolnych potencjałów i przyjmowanie różnych potencjałów odniesienia, upraszczając wykonywanie pomiarów i testów lub nawet czyniąc je możliwymi do wykonania w stosunku do sytuacji, gdyby nie było takiej możliwości. Dobrym przykładem są w tym przypadku oscyloskopy posiadające osobną separację galwaniczną każdego wejścia.

6. **Możliwość łączenia magistral.** W celu zminimalizowania zniekształceń sygnału przesyłanego linią długą należy zapewnić jednorodność impedancji na całej jej długości oraz dopasowanie impedancji na jej zakończeniach, co narzuca konieczność łączenia wszystkich urządzeń do wspólnej magistrali na jak najkrótszych odgałęzieniach. W zależności od przestrzennego rozmieszczenia elementów łączonych magistralą narzuconego specyfiką obiektu, rozległości tego obiektu oraz możliwości realizacji połączeń może to powodować niedogodności związane z jej prowadzeniem. Zastosowanie separacji pozwala

przesyłać sygnał pomiędzy dwiema osobnymi pod względem elektrycznym magistralami w dowolnym ich miejscu. Liczba takich „rozgałęzień” możliwych do zastosowania w jednym systemie jest jednak ograniczona i zależy głównie od zależności czasowych, a przede wszystkim od dopuszczalnych opóźnień. Jest to uwarunkowane zastosowanym standardem transmisji, wykorzystywanymi protokołami i szybkością przesyłania danych. Na rys. 2. przedstawiono przykład typowej topologii magistrali oraz magistrali rozgałęzionej przy wykorzystaniu separacji.



Rys. 2. Przykłady topologii magistrali bez separacji i rozgałęzionej z separacją

7. **Realizacja zasilania i/lub komunikacji pomiędzy blokami znajdującymi się na obiektach poruszających się względem siebie.** Rozwiązanie to jest wykorzystywane zwłaszcza w tych przypadkach, w których nie jest możliwe zastosowa-

nie ruchomych, giętkich połączeń przewodowych, na przykład w komunikacji pomiędzy blokami wykonującymi nieograniczony w czasie ruch obrotowy względem siebie. W zależności od rozwiązania przesyłanie energii i/lub informacji mo-

że mieć miejsce w każdym lub tylko w określonych położeniach obiektów ruchomych względem siebie. Stosowane są w tym celu różne rodzaje sprzężenia.

3. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z SEPARACJĄ GALWANICZNĄ W URZĄDZENIACH I SYSTEMACH ISKROBEZPIECZNYCH

Separacja stosowana w celu zapewnienia bezpieczeństwa przeciwwybuchowego w urządzeniach iskrobezpiecznych musi spełniać ściśle określone wymagania. Dotyczą one tylko tej separacji, od której zależy iskrobezpieczeństwo, natomiast separacja stosowana w innym celu, np. dla zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej, nie musi ich spełniać. Separacja stosowana ze względów iskrobezpieczeństwa może wpływać korzystnie również na własności związane z kompatybilnością elektromagnetyczną, eliminując tym samym konieczność stosowania dodatkowej separacji.

Wymagania dotyczące separacji decydującej o iskrobezpieczeństwie zostały ściśle określone w normie PN-EN 60079-11:2012 [4]. Nieuszkodzalność, w rozumieniu normy, elementy separujące zgodne z jej wymaganiami rozpatrywane są jako niepodlegające uszkodzeniu powodującemu zwarcie poprzez nieuszkodzalną, w rozumieniu normy, separację. W odniesieniu do elementów występują istotne różnice wymagań przy separacji oddzielającej różne obwody iskrobezpieczne a separacji oddzielającej obwód iskrobezpieczny od nieiskrobezpiecznego. Określone są one w punkcie 8.9, a w szczególności:

- dla elementów separujących obwód iskrobezpieczny od nieiskrobezpiecznego – punkt 8.9.2,
- dla elementów separujących różne obwody iskrobezpieczne – punkt 8.9.3.

3.1. Elementy separujące obwód iskrobezpieczny od nieiskrobezpiecznego

Realizacja separacji zgodnej z wymaganiami normy PN-EN 60079-11:2012 implikuje konieczność zapewnienia warunków, w których nie będą przekroczone parametry elementów separujących, co wymaga zastosowania elementów ograniczających napięcie, prąd i moc. Stosowanie w tym celu w liniach sygnałowych szeregowych rezystorów i równoległych diod Zenera wprowadzających nieraz znaczną pojemność pasożytniczą może powodować duże zniekształcenia przesyłanych sygnałów, ograniczając tym samym szybkość transmisji.

Pojemność diod Zenera w danym typoszeregu diod zależy od napięcia nominalnego diody oraz od napięcia wstecznego, jakim jest ona spolaryzowana, i spada wraz ze wzrostem tych napięć. Przebieg charakterystyki oraz wartości pojemności i napięć różnią się w zależności od typu diody. Producenci diod Zenera rzadko zamieszczają w kartach katalogowych ich pełne charakterystyki pojemnościowe, nieraz ograniczając się tylko do wskazania pojemności każdej diody w typoszeregu przy określonych warunkach, a w licznych przypadkach nie podają nawet tego parametru. Jest to spowodowane tym, że pojemność nie jest istotnym parametrem diod Zenera, który byłby przydatny w większości ich zastosowań. Na niekorzyść wpływa również fakt, że jako ograniczniki napięcia wykorzystywane są zwykle diody Zenera o niskim napięciu nominalnym, a więc o dużej pojemności, oraz konieczność stosowania dwóch równoległych diod po stronie iskrobezpiecznej.

Pojemność pojedynczej diody Zenera w zależności od wyżej opisanych czynników zmienia się w szerokim zakresie, przykładowo dla diod serii BZM55 o napięciach nominalnych rzędu 5 V pojemność wynosi 175 pF i szybko spada wraz z napięciem do około 20 pF dla diody o napięciu nominalnym 20 V (przy napięciu polaryzacji 2 V) [3]. Dla diod serii 1SMB59 pojemność przy napięciu polaryzacji $V_z/2$ zmienia się w zakresie od 700 pF dla V_z około 4 V do 40 pF przy V_z około 90 V. W przypadku często stosowanej diody 1N5338B (napięcie nominalne 5,1 V) pojemność zmienia się w zakresie od 4000 pF przy napięciu polaryzacji 0,1 V do 2000 pF przy napięciu polaryzacji 3 V. Tak duże pojemności wraz z rezystancjami szeregowymi o wartościach od kilkuset Ω do kilku $k\Omega$ i większych tworzą filtry dolno-przepustowe RC, utrudniając, a nawet uniemożliwiając realizację separacji szybkich interfejsów.

Jednym z rozwiązań pozwalającym uniknąć stosowania diod Zenera równolegle w liniach komunikacyjnych jest zaprojektowanie topologii urządzeń i systemu w taki sposób, aby ograniczniki napięcia w postaci diod Zenera na odpowiednie napięcie znajdowały się tylko w liniach zasilających wszystkie obwody, do których dołączone są elementy oddzielające. Taka topologia układu wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Innym rozwiązaniem jest narzucenie iskrobezpiecznych parametrów wejściowych urządzenia tak, aby miały odpowiednio niskie wartości, zapewniając w ten sposób nieuszkodzalność elementu separującego, co jednak może poważnie ograniczyć zakres zastosowań takiego urządzenia, a ponadto parametry wejściowe mogą być narzucone koniecznością współpracy z innym urządzeniem. Nie w każdym przypadku możliwe jest wykorzystanie któregoś

z powyższych rozwiązań. Znacznie łatwiej jest zaprojektować dane urządzenie współbieżnie wraz z innymi urządzeniami, z którymi będzie ono współpracować, kosztem zawężenia możliwości jego innych zastosowań.

3.2. Przekazniki

Chociaż zakres zastosowań przekazników uległ ograniczeniu na rzecz elementów półprzewodnikowych, to w niektórych przypadkach nadal pozostają one niezastąpione i są wykorzystywane, między innymi ze względu na możliwość zapewnienia separacji. Warto zwrócić uwagę również na przekazniki bistabilne, w których wyeliminowano jedną z najistotniejszych wad przekazników, jaką jest duże zapotrzebowanie (ciągły pobór mocy) na energię dostarczaną do cewki. W przekaznikach bistabilnych energia dostarczana jest tylko podczas przełączania, natomiast w stanie statycznym cewka nie pobiera energii, a przy zaniku zasilania stan przekaznika pozostaje niezmienny. Przekazniki bistabilne mogą mieć osobne cewki do załączania/wyłączania albo pojedyncze, wymagające dla załączenia/wyłączenia impulsów o przeciwnych polaryzacjach. W obu przypadkach cewki przekazników bistabilnych wymagają bardziej skomplikowanych układów sterowania, co uwydatnia się szczególnie wraz ze wzrostem liczby przekazników.

Wykazanie zgodności przekazników z normą wyłączenie w oparciu o ich karty katalogowe niekiedy bywa utrudnione ze względu na niedostateczną zazwyczaj ilość danych dotyczących ich konstrukcji mechanicznej oraz zwykle złożonych odstępów wewnętrznych. Spośród wymaganych parametrów w kartach katalogowych określone są przeważnie tylko parametry styków (dopuszczalne napięcia i prądy) oraz parametry cewki. W urządzeniach iskrobezpiecznych częste zastosowanie znajdują przekazniki polskiej produkcji Relpol ze względu na szczegółową dokumentację oraz odpowiednie odstępy izolacyjne.

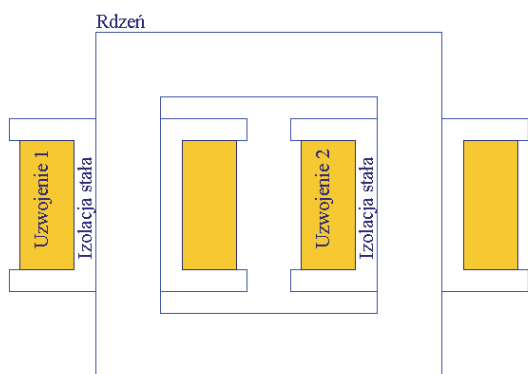
3.3. Transformatory

Wymagania normy dotyczące konstrukcji transformatorów sieciowych mają wpływ na ich parametry eksploatacyjne. Rozmieszczenie uzwojeń na rdzeniu magnetycznym ma wpływ na parametry elektryczne transformatorów, między innymi na indukcyjności wzajemne uzwojeń, gdyż są one uzależnione od wzajemnego sprzężenia indukcyjnego pomiędzy uzwojeniem pierwotnym a wtórnym (i). Pod względem użytkowym sprzężenie to powinno być jak największe (jak najmniejsza indukcyjność rozproszenia

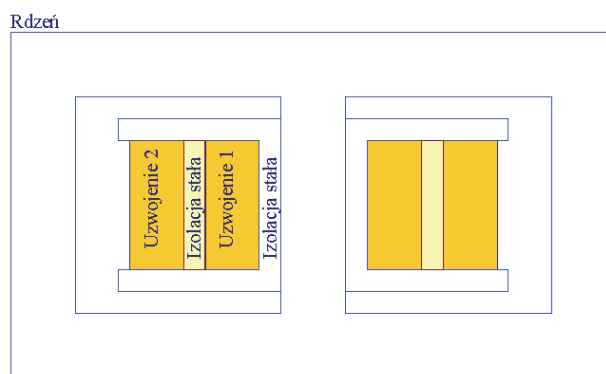
i strumień magnetyczny rozproszenia). W przypadku transformatorów zapewniających separację zgodną z normą PN-EN 60079-11 możliwości konstrukcji są częściowo ograniczone. Norma dopuszcza alternatywne rozwiązania rozmieszczenia uzwojeń, przy czym zarówno w przypadku uzwojeń umieszczonych na jednej kolumnie rdzenia obok siebie z zachowaniem odstępów izolacyjnych, jak i w przypadku umieszczenia ich na osobnych kolumnach (konstrukcja typu 1.), a także w przypadku oddzielenia uzwojeń nawiniętych jedno na drugim odpowiednią izolacją stałą albo ekranem odpowiedniej grubości (konstrukcja typu 2.) następuje zmniejszenie sprzężenia pomiędzy uzwojeniami. We wszystkich powyższych przypadkach należy zapewnić odpowiednio duże wzajemne odległości pomiędzy uzwojeniami oraz odległość pomiędzy uzwojeniami a rdzeniem ze względu na wymaganą odpowiednią izolację pomiędzy nimi albo ekran pomiędzy uzwojeniami.

Ponadto zastosowanie naprzemiennych sekcji uzwojeń krążkowych, pierwotnego i wtórnego, na jednej kolumnie jest utrudnione z powodu konieczności zapewnienia spełniającej wymagania izolacji pomiędzy wszystkimi sąsiadującymi sekcjami, co przekłada się na duży udział materiału izolacji w objętości i długości karkasu. Ograniczenia te mogą utrudnić również uzyskanie wymaganej symetrii uzwojeń.

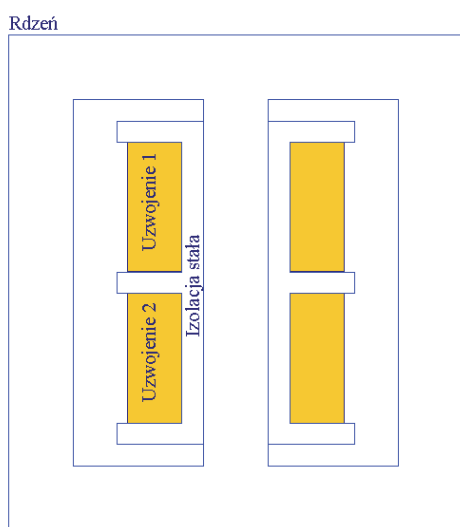
Strumienie rozproszenia poszczególnych uzwojeń indukują w nich siły elektromotoryczne, które można odwzorować jako spadki napięcia na reaktancjach rozproszenia. Indukcyjność rozproszenia powinna być możliwie mała, ponieważ wraz ze wzrostem obciążenia transformatora powoduje spadek napięcia na uzwojeniu wtórnym. Nominalne napięcie wyjściowe uzyskiwane jest przy danym obciążeniu, dla jakiego zaprojektowano transformator, natomiast przy mniejszych obciążeniach i w stanie jałowym napięcie wyjściowe jest wyższe, co przekłada się na niższą sprawność układu zasilania w przypadku zastosowania liniowego stabilizatora za transformatorem i prostownikiem. Korzystnym wpływem dużych wartości indukcyjności rozproszenia jest natomiast ograniczenie prądów zwarcia oraz możliwość skonstruowania transformatorów bezwarunkowo odpornych na zwarcie. Dodatkową zaletą konstrukcji typu 2. w wersji z uziemionym ekranem pomiędzy uzwojeniami jest znaczące zmniejszenie sprzężenia pojemnościowego pomiędzy nimi, a w efekcie – poprawa tłumienia zaburzeń elektromagnetycznych, jakie mogłyby się tą drogą propagować. Na rys. 3. przedstawiono warianty realizacji nieuszkodzalnego transformatora, zapewniającego separację pomiędzy stroną pierwotną a wtórną.



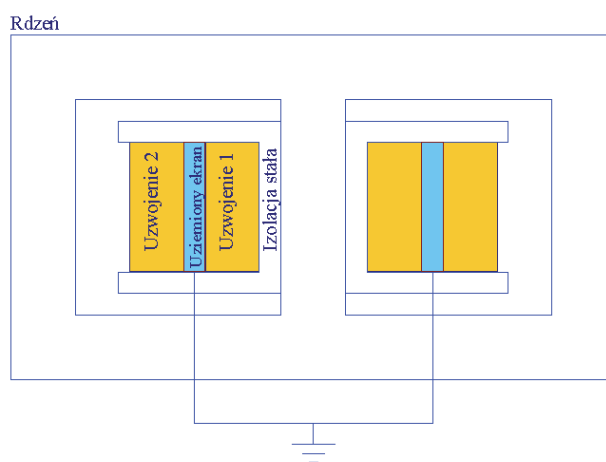
Transformator z oddzielnymi uzwojeniami na różnych kolumnach rdzenia



Transformator z uzwojeniami nawiniętymi jedno na drugim oddzielnymi izolacją stałą



Transformator z oddzielnymi uzwojeniami na jednej kolumnie rdzenia



Transformator z uzwojeniami nawiniętymi jedno na drugim oddzielnymi uziemionym ekranem

Rys. 3. Warianty realizacji nieuszkodzonego transformatora

3.4. Transformatory inne niż sieciowe

Wymagania normy, dotyczące konstrukcji transformatorów innych niż sieciowe, mają wpływ na ich parametry, podobnie jak w przypadku transformatorów sieciowych. W większym stopniu dotyczy to transformatorów, które powinny charakteryzować się możliwie wysoką sprawnością, przeznaczonych do pracy w układach zasilających np. przetwornic separujących. Sprawność w mniejszym stopniu jest istotna w przypadku transformatorów separacji transmisji. Konieczność zapewnienia odstępów izolacyjnych ogranicza możliwości nawijania ich wieloma blisko umieszczonymi uzwojeniami równocześnie, co zapewniłoby dobre sprzężenie pomiędzy uzwojeniami oraz możliwość uzyskania dokładniejszej symetrii.

3.5. Kondensatory blokujące

Zgodnie z wymaganiami normy (punkt 8.6.1) nieuszkodzalny zestaw kondensatorów blokujących powinien składać się z dwóch szeregowo połączonych kondensatorów. Powinny to być wysoce niezawodne kondensatory z dielektrykiem stałym. Wykluczone jest stosowanie w tym celu kondensatorów elektrolitycznych i tantalowych.

Izolacja kondensatora musi spełniać wymagania dla wytrzymałości elektrycznej.

W przypadku spełnienia wymagań dla elementów oddzielających galwanicznie (punkt 8.9) uznaje się, że układ zapewnienia nieuszkodzone oddzielenie galwaniczne dla prądu stałego.

3.6. Kondensatory filtrujące

Kondensatory filtrujące podłączone pomiędzy obudową urządzenia i obwodem iskrobezpiecznym wymagają wykazania zgodności z punktem 6.3.13 oraz spełnienia wymagań takich samych jak dla kondensatorów blokujących z punktu 8.6.1, jeśli ich uszkodzenie omija elementy, od których zależy iskrobezpieczeństwo. W praktyce spełnienie tych wymagań realizowane jest poprzez zastosowanie szeregowo połączonych dwóch kondensatorów ceramicznych wysokonapięciowych, które mają zastosowanie przeważnie dla zapewnienia kompatybilności elektromagnetycznej obwodu.

4. PODSUMOWANIE

Separacja obwodów stosowana jest z różnych przyczyn oraz przy wykorzystaniu różnych rozwiązań. W zastosowaniach iskrobezpiecznych konieczność spełnienia wymagań norm niejednokrotnie ogranicza stosowalność dostępnych rozwiązań lub możliwe do

uzyskania parametry funkcjonalne w stosunku do typowych, nieiskrobezpiecznych aplikacji.

Wymagania te dotyczą tylko separacji zapewniających iskrobezpieczeństwo. Szczególne trudności sprawia separacja szybkich cyfrowych interfejsów komunikacyjnych ze względu na ich wąski zakres tolerancji parametrów sygnałów elektrycznych, w jakim należy się zmieścić, aby zachować zgodność ze standardem.

Literatura

1. Latos S., Gacek A.: *Podstawy bezpieczeństwa elektrycznego w technice medycznej*, Instytut Techniki i Aparatury Medycznej, Zabrze 2000.
2. McMillan A.: *Electrical Installations in Hazardous Areas*, Butterworth-Heinemann 1998, ISBN 7506 3768 4.
3. Molenda T., Chmielarz S.: *Iskrobezpieczeństwo a kompatybilność elektromagnetyczna – wybrane zagadnienia*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2012, nr 8 (498).
4. PN-EN 60079-11:2012. *Atmosfery wybuchowe – Cz. 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i"*, ISBN: 978-83-266-9046-4, data zatwierdzenia: 2012-02-27, data publikacji: 2012-03-05.
5. PN-EN 60079-28:2010. *Atmosfery wybuchowe – Cz. 28: Zabezpieczenie urządzeń oraz systemów transmisji wykorzystujących promieniowanie optyczne*, ISBN: 978-83-266-6574-5, data zatwierdzenia: 2010-11-21, data publikacji: 2010-12-09.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.