



Bezpieczeństwo elektryczne urządzeń (1)

100-procentowe zabezpieczenie projektowanego przez siebie urządzenia przed wszystkimi zagrożeniami, które mogą wystąpić w czasie jego eksploatacji, raczej nie jest możliwe. Jednak jako świadomi konstruktorzy powinniśmy zredukować wpływ pewnych typowych zagrożeń, dbając o bezpieczeństwo urządzenia oraz jego użytkownika.

Tematyka zagadnień związanych z zabezpieczeniem urządzeń jest bardzo obszerna. W praktyce zabezpiecza się nie tylko linie zasilające i interfejsowe, ale również obwody wewnętrzne przed zjawiskami, które mogą wystąpić w trakcie eksploatacji.

W pierwszej części artykułu skupię się na zabezpieczeniach przed zjawiskami w skali „makro” obwodów zasilających. W kolejnej omówię praktyczne przykłady zabezpieczeń linii interfejsowych – a może szerzej – wejścia/wyjścia urządzenia. Są one narażone przede wszystkim na wyładowania ESD oraz kontakt ze zbyt wysokim napięciem o trudnej do przewidzenia polaryzacji.

Pytanie o ochronę systemów elektrycznych nurtuje wszystkich projektantów. O ile w urządzeniu elektronicznym jedynym kontrargumentem przed jego stosowaniem jest szczupłość miejsca, ponieważ np. koszt diod krzemowych załączonych na liniach I/O zwykle jest pomijalnie mały, o tyle w urządzeniach energetycznych trzeba już ponieść nierzadko niemałe koszty. Niemniej jednak, projektant wspólnie z inwestorem, muszą znaleźć kompromis pomiędzy kosztami, a niezbędną, zapewnianą przez system ochroną użytkowników i urządzeń. Do tego typu rozwiązań należą np. zabezpieczenia przed przepięciami zakładane na linie telekomunikacyjne po stronie użytkownika lub na przyłącza wewnętrznych, lokalnych sieci komputerowych. Użytkownicy w dobre wierze często zdają się na operatorów, a operatorzy zabezpieczają tylko

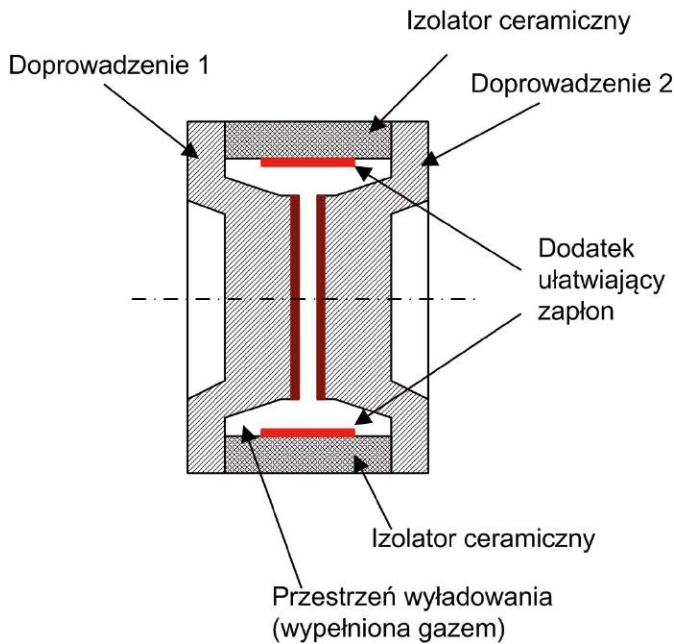
swoje urządzenia i nawet nie informują abonentów, że ci powinni postąpić w ten sam sposób.

Iskiernik – zabezpieczenie przed przepięciem

Na **rysunku 1** pokazano schemat budowy gazowego zabezpieczenia przed przepięciem. Czasami, w materiałach różnych firm nazywane są one odgromnikami, jednak to określenie raczej nie pasuje do delikatnych urządzeń elektronicznych i kojarzy się z energetyką. W przypadku ogranicznika stosowanego w elektronice bardziej właściwym określeniem jest iskiernik.

Iskiernik można porównać do kondensatora o bardzo małej pojemności, którego rezystancja podczas pracy może zmieniać się od kilku GΩ do poniżej 1 Ω, podczas wyładowania łukowego. Po ustąpieniu przepięcia, iskiernik powraca do stanu roboczego, chyba że przekroczono parametry termiczne i zadziałało zabezpieczenie przed przegrzaniem. Będzie o tym mowa dalej. W związku z taką zasadą działania można przyjąć, że do momentu osiągnięcia napięcia zapłonu przez iskiernik nie płynie żaden prąd. Po zapłonie, napięcie spada do poziomu napięcia świecenia (zależnie od typu, zwykle 70...200 V przy prądzie 0,01...1,5 A). Przy dalszym wzroście prądu iskiernik wchodzi w tryb wyładowania łukowego. W tym trybie napięcie ograniczane jest do wartości ok. 10...35 V i w szerokim zakresie nie zależy ono od płynącego prądu. Przy zmniejszaniu się napięcia na iskierniku, następuje sytuacja odwrotna. Prąd płynący przez iskiernik maleje aż spada poniżej pewnego minimum niezbędnego dla podtrzymania wyładowania łukowego. W konsekwencji wyładowanie to kończy się. Przy dalszym zmniejszaniu się napięcia i prądu płynących przez iskiernik, poniżej progu napięcia zapłonu, warunki pracy iskiernika stabilizują się, a ten osiąga rezystancję rzędu kilku GΩ i jest gotowy do następnego cyklu zadziałania.

W zależności od napięcia roboczego i przenoszonych mocy, iskierniki wykonywane są w różny sposób. Te na mniejsze napięcia, stosowane



Rysunek 1. Schemat budowy iskiernika

w elektronice i automatyce, mają obudowy hermetyczne, w których zamknięte są elektrody umieszczone w otoczeniu argonu lub neonu. Hermetyczna obudowa standaryzuje warunki pracy i umożliwia wykonywanie iskierników o powtarzalnych parametrach, dlatego bardzo ważna jest jakość wykonania i szczelność obudowy. Typowo przerwa pomiędzy elektrodami jest mniejsza od 1 mm. Bardzo ważny jest materiał, z którego wykonane są elektrody. Ma on kluczowy wpływ na trwałość zabezpieczenia, które czasami musi funkcjonować przy wielokrotnych uderzeniach napięć.

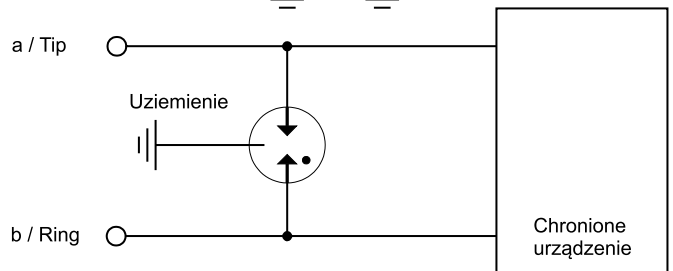
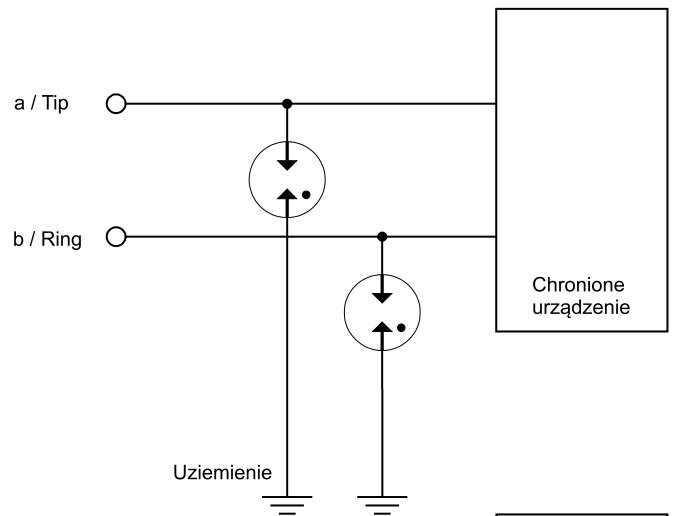
Napięcie zapłonu ustalane jest przez odstęp pomiędzy elektrodami, rodzaj i ciśnienie gazu wewnątrz iskiernika oraz stopień jego wstępnej jonizacji. Podawane jest ono jako wartość napięcia stałego, przy którym zachodzi zapłon. Warto pamiętać o tym, że na jonizację gazu niezbędną aby przez iskiernik popłynął prąd potrzebny jest pewien czas.

Jako wariant opisanego wyżej rozwiązania, produkowane są również zabezpieczenia, w których jeśli nie ustępuje przeciążenie, to elektrody wewnętrznie zwierane są na stałe. Może się tak zdarzyć, gdy zabezpieczana linia zostanie zwarta z przewodem zasilającym. W takim przypadku duży prąd płynący przez iskiernik ze źródła zasilania, rozgrzeje go do bardzo wysokiej temperatury. Zachodzi wówczas obawa o przepalenie iskiernika na skutek przegrzania, a w konsekwencji również uszkodzenie chronionego urządzenia, ponieważ pojawi się na nim napięcie zasilające.

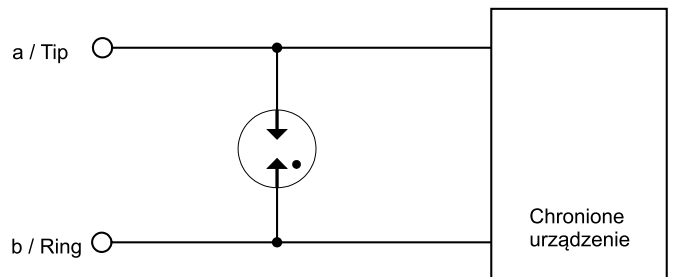
Wewnątrz iskiernika z zabezpieczeniem termicznym umieszczany jest element z tworzywa sztucznego, które mięknie i topi się w określonej, zależnej od materiałów, z których zbudowane jest zabezpieczenie, temperaturze. Element ten utrzymuje w stałej odległości elektrody wykonane z materiałów sprężystych i gdy stopi się, to te dociskane są do siebie przez siły sprężystości. Oczywiście taki iskiernik będzie wymagał wymiany, jednak pomimo tego spełni swoją rolę chroniąc obwód przed przepięciem.

Stosowanie iskierników nie jest trudne. Najczęściej wykonywane są one jako elementy 2- lub 3-końcówkowe, które włącza się pomiędzy zabezpieczaną linię, a przewód ochronny lub połączoną z nim masę urządzenia (**rysunek 2**). Można je również włączyć pomiędzy doprowadzenia chronionego urządzenia (**rysunek 3**). Na **rysunku 4** pokazano różne, standardowe konfiguracje iskierników stosowane do ochrony obwodów w telekomunikacji i w sieciach komputerowych. Zabezpieczenia 3-końcówkowe wymagają zastosowania tylko iskiernika (lub iskierników), podczas gdy zabezpieczenia 5-końcówkowe wymagają również użycia dodatkowych elementów ograniczających prąd, jak na przykład termistor PTC.

Zabezpieczenia 3-końcówkowe włączane są pomiędzy przewody a/b i uziemienie. W tej konfiguracji przepięcia zwierane są do ziemi. Stosowane są iskierniki zarówno 2- jak i 3-końcówkowe. Jako wariant używane są również iskierniki z dodatkową ochroną przed przegrzaniem,



Rysunek 2. Sposób włączenia iskiernika pomiędzy chronioną linią a masę/przewód PE

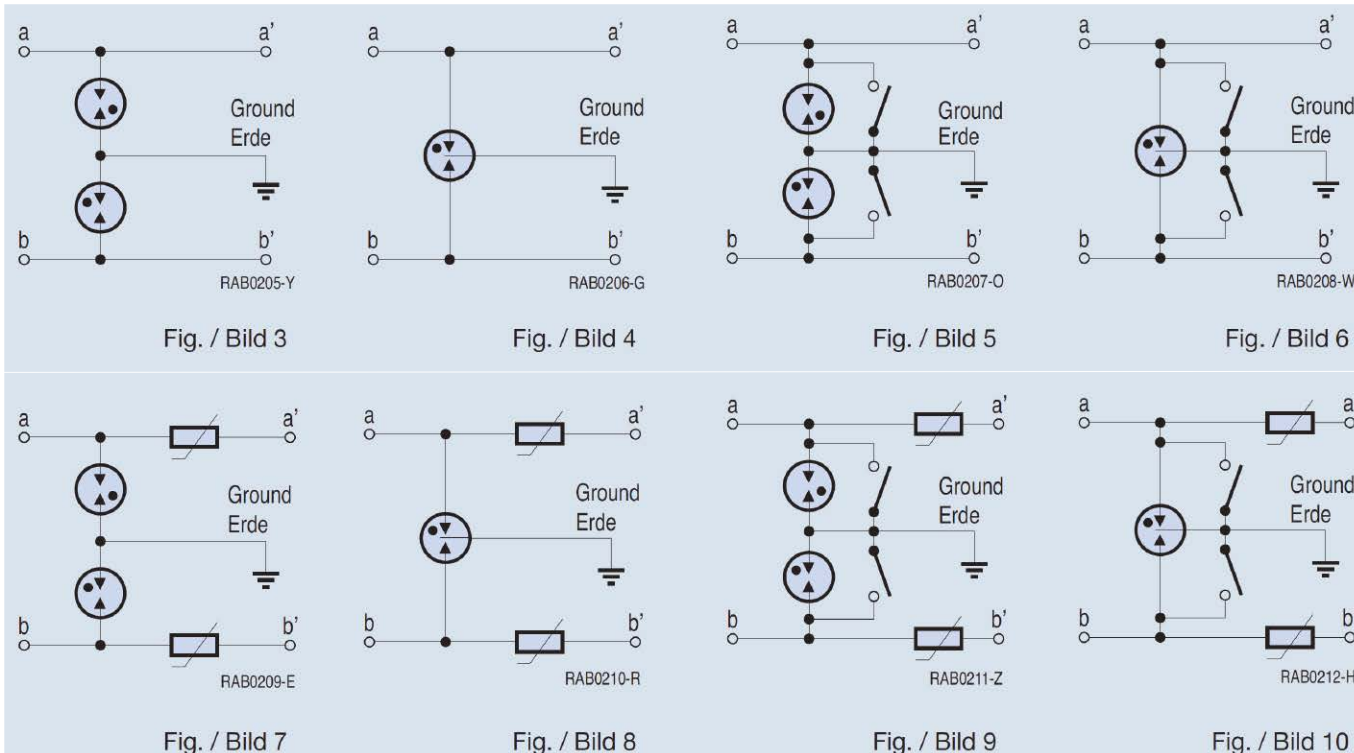


Rysunek 3. Iskiernik włączony pomiędzy chronione linie

co pokazano na schematach w formie równoległe podłączonego styku oznaczonego literą „t”.

Zabezpieczenia 5-końcówkowe, oprócz iskierników, zawierają dodatkowe elementy ograniczające prąd. Jak wspomniano wcześniej, zwykle jest to termistor PTC, którego rezystancja wzrasta wraz z temperaturą. Element ten włączany jest w obwodzie szeregowo, więc wzrost rezystancji powoduje ograniczenie płynącego prądu. Teoretycznie, praca iskiernika przy prądzie przemiennym powinna przebiegać zgodnie z opisaną wcześniej charakterystyką – spadek napięcia powinien powodować spadek prądu, a ten wyłączenie iskiernika choćby w momencie przejścia napięcia przez 0. Jeśli jednak impedancja wewnętrzna źródła jest bardzo mała, to może się okazać niewystarczająca do wyłączenia iskiernika pracującego w trybie wyładowania łukowego i mającego rezystancję poniżej 1 Ω. W takiej sytuacji, należy rozważyć podniesienie rezystancji źródła choćby za pomocą rezystora szeregowego. Inaczej iskiernik rozgrzeje się i jeśli nie będzie miał zabezpieczenia przed przegrzaniem, to może uszkodzić sąsiadujące z nim elementy, przepalić się i dopuścić uszkodzenie chronionego obwodu elektrycznego.

Przy ochronie osprzętu telekomunikacyjnego zwykle iskierniki pracują przy zasilaniu napięciem stałym. W tych warunkach, po ustąpieniu przepięcia, iskiernik musi mieć możliwość wyłączenia się przy normalnych, nominalnych warunkach pracy. Pamiętajmy, że napięcie zapłonu jest wyższe od napięcia wyładowania łukowego. Zwykle iskierniki stosowane do zabezpieczenia linii telekomunikacyjnych świetnie radzą sobie



Rysunek 4. Standardowe konfiguracje iskierników (źródło: materiały firmy Epcos)

z warunkami pracy, a to ze względu na ograniczoną wydajność prądową nadajników linii. W innych przypadkach, należy indywidualnie sprawdzić, czy ten rodzaj zabezpieczenia spełni swoją rolę w konkretnych warunkach pracy. Jako wyjątek od tej reguły można uznać sytuacje, w których nominalne napięcie pracy jest niższe od napięcia wyładowania łukowego iskiernika (10...35 V, zależnie od typu).

Zabezpieczając wrażliwy sprzęt elektroniczny warto pamiętać o tym, że element zabezpieczający musi oferować maksymalny poziom bezpieczeństwa. Inaczej jego stosowanie nie ma większego sensu i jest niepotrzebnym poniesionym wydatkiem. Dlatego też należy stosować produkty sprawdzone, pochodzące od producentów, którzy są w stanie zapewnić zachowanie zarówno norm jakościowych, jak i bezpieczeństwa. Warto jest dodać, że zabezpieczenie nierówne jest zabezpieczeniu i czasami warto posilkować się gotowymi rozwiązaniami (modułami) przeznaczonymi do określonych aplikacji. Czasami te bowiem wyposażane są w szereg różnych elementów, których mają różne zadania, a dobrane są w taki sposób, aby optymalnie realizować funkcję zabezpieczenia.

Termistor NTC – zabezpieczenie przed przetężeniem

Przetężenia występują wtedy, gdy do zasilania jest dołączane duże obciążenie pojemnościowe. Może to być na przykład blok zasilaczy impulsowych, silnik elektryczny, transformator lub po prostu długi kabel połączeniowy. Nadmierny prąd mający charakter impulsowy i płynący w momencie dołączenia obciążenia może uszkodzić komponenty elektryczne lub elektroniczne takie, jak styki przekaźnika, elementy półprzewodnikowe (np. diody prostownicze, tranzystory przełączające) lub wręcz całe obwody. W najlepszym przypadku przetężenie skończy się uszkodzeniem bezpiecznika, ale i taka usterka, mimo iż łatwa do usunięcia, to jednak może być dosyć kłopotliwa w lokalizacji i naprawie. Tego typu uszkodzenia mogą być powodowane również w inny, bardziej „tradycyjny” sposób. Typowo budowane są na przykład zasilacze lub wzmacniacze małej częstotliwości, używające kondensatorów elektrolitycznych o bardzo dużych pojemnościach. I dlatego jako jedną z najprostszych i najtańszych metod zabezpieczenia przed przetężeniami firma EPCOS zaleca stosowanie specjalnych, produkowanych przez nią termistorów NTC pracujących służących do ograniczenia prądu.

Rezystancja termistora o negatywnym współczynniku temperatury (NTC) zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Zakres zmian rezystancji zależy od parametrów termistora i może wahać się od kilkudziesięciu Ω do kilku k Ω . Termistory NTC przeznaczone

do zabezpieczania obwodów są produkowane w postaci spieków różnych tlenków metali, które wymieszane są z masą plastyczną wiążącą je w całość. Czasami używa się również domieszek innych proszków. Podczas produkcji mieszanina formowana jest pod dużym ciśnieniem w kształt krążka. Po obu jego stronach наносzona jest pasta srebrna. Do niej lutowane są doprowadzenia a następnie cały krążek pokrywany jest lakierem. Taka technologia wykonania zapewnia dużą powtarzalność parametrów i odporność na przetężenia.

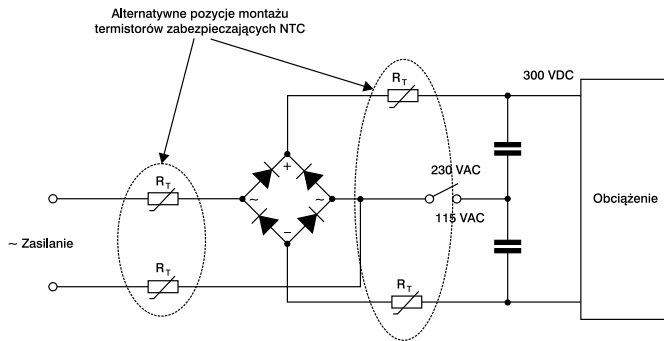
W temperaturze pokojowej termistor NTC ma relatywnie dużą rezystancję, która absorbuje impuls prądu po załączeniu zasilania. Duży prąd powoduje stratę mocy na rezystancji i rozgrzanie się termistora, a w następstwie spadek jego rezystancji do bardzo niskiej wartości. Dalej, na skutek przepływu prądu znamionowego na termistorze wydziela się pewna moc, która skutkuje jego rozgrzaniem. Dzięki temu rezystancja termistora staje się pomijalnie mała i nie wpływa na parametry elektryczne obwodu. Jest to znaczna przewaga tego typu rozwiązania nad stosowanymi rezystorami stałymi, które są źródłem stałej, dużej straty mocy. Stosowanie rezystorów stałych to tak naprawdę ciągle poszukiwanie kompromisu pomiędzy stratą mocy o zabezpieczeniem obwodu.

Termistor zabezpieczający NTC może być używany w zasilaczach impulsowych zarówno po stronie pierwotnej (napięcia AC), jak i wtórnej (napięcia DC). Przykładowe podłączenie termistorów w obwodach zasilacza pokazano na **rysunku 5**. Jak łatwo się domyślić, wymagany jest przepływ pewnego prądu minimalnego koniecznego do stabilizacji wartości rezystancji. W przypadku obwodów AC bierze się pod uwagę wartość natężenia prądu skutecznego.

Ważne jest, że po odłączeniu obciążenia termistor NTC musi mieć możliwość ochłodzenia się do temperatury pokojowej. Konstruktor stosując tego typu zabezpieczenie powinien mieć na uwadze to, że jeśli nie zapewni warunków do utraty temperatury, to zabezpieczenie nie zadziała przy następnym podłączeniu obciążenia. Firma EPCOS podaje, że w normalnych warunkach, jeśli nie będzie wymuszonego chłodzenia termistora, to powrót do stanu początkowego zajmie od 30 sekund do około dwóch minut, zależnie od rozmiarów fizycznych, materiału konstrukcyjnego i temperatury początkowej. W niektórych obwodach takich, jak zasilacze impulsowe, czas chłodzenia nie jest aż tak ważny, ponieważ zazwyczaj pełne rozładowanie pojemności trwa znacznie dłużej, niż czas potrzebny na schłodzenie się termistora.

Określa się kilka ważnych kryteriów doboru zabezpieczenia NTC dla aplikacji:

- Rezystancję nominalną (R_{25}) w temperaturze pokojowej.



Rysunek 5. Alternatywne sposoby włączenia termistorów zabezpieczających NTC

- Maksymalny dopuszczalny prąd ciągły w nominalnych warunkach pracy; dla prądu przemiennego będzie to maksymalny prąd skuteczny.
- Maksymalną dołączaną wartość pojemności C_T .

Rezystancja nominalna jest miarą spadku prądu płynącego w obwodzie (od załączenia obciążenia do ustalenia się warunków pracy). Nie jest ona zależna od wymiarów mechanicznych krążka. W praktyce oznacza to, że produkowane przez firmę EPCOS krążki o różnych średnicach mogą posiadać tę samą rezystancję i wybierając termistor do aplikacji należy kierować się nie tyle jego parametrami mechanicznymi, ile elektrycznymi. Z drugiej strony wymiary mechaniczne są związane ze zdolnością termistora do absorpcji energii. Jako ogólną zasadę dla termistorów produkowanych przez EPCOS można przyjąć, że dla tych samych wartości rezystancji, im większa jest średnica dysku, tym większy prąd ciągły może on przewodzić i tym większa jest odporność na udar prądowy w momencie załączenia. W nominalnych warunkach pracy, po ustaleniu się obwodu, maksymalny dopuszczalny dla danego termistora NTC prąd ciągły nie może być w żadnych warunkach przekroczony. Inaczej komponent zostanie po prostu uszkodzony.

Pojemność C_T reprezentuje parametr zdolności termistora do absorpcji impulsu energii i służy do określenia wartości i czasu trwania impulsu prądowego nie powodującego uszkodzenia ogranicznika prądu. Dokładne ustalenie wartości pojemności C_T pozwala na optymalny dobór termistora zabezpieczającego NTC, co ma znaczenie głównie konstrukcyjne pozwalając oszacować miejsce niezbędne dla poprawnej instalacji i pracy zabezpieczenia.

Efektywną rezystancję termistora NTC przy prądzie ciągłym, nie powodującym jego uszkodzenia (mniejszym lub równym I_{MAX}), dla temperatury otoczenia równej 25 °C, można szacować zgodnie z zależnością: $R_{NTC} = k \times I^a [\Omega]$. Prąd I powinien zawierać się w granicach: $0,3 \times I_{MAX} < I \leq I_{MAX}$. Parametry k oraz a podawane są przez firmę EPCOS w danych katalogowych termistora. Jako ogólną zasadę dla termistorów produkowanych przez EPCOS można przyjąć, że wartość prądu ciągłego w aplikacji nie powinna być mniejsza niż 30% wartości prądu maksymalnego, oraz oczywiście nie może przekraczać maksymalnego, dozwolonego prądu.

Dla ograniczenia przetężenia, termistor NTC musi być włączony szeregowo z zasilaniem chronionego obwodu. Może pracować zarówno w obwodach prądu przemiennego, jak i stałego. Można je też łączyć szeregowo dla zwiększenia odporności na podwyższone napięcie, zgodnie z zasadami połączenia szeregowego rezystancji. Łącząc je trzeba pamiętać, że zabezpieczenie będzie na tyle skuteczne, na ile odporny jest termistor o najmniejszym napięciu roboczym. Z reguły powinno się łączyć termistory tego samego typu.

TERMISTORÓW NTC, NAWET TEGO SAMEGO TYPU, NIE POWINNO SIĘ ŁĄCZYĆ RÓWNOLEGLE! PRZY POŁĄCZENIU RÓWNOLEGŁYM, PRZEZ TERMISTOR O NAJMNIEJSZEJ REZYSTANCJI PRZEPIĘNY PRĄD O NAJWIĘKSZEJ WARTOŚCI, KTÓRY MOŻE SPOWODOWAĆ JEGO USZKODZENIE. MOŻE SIĘ TAK ZDARZYĆ NIE TYLKO ZE WZGLĘDU NA RÓŻNE PARAMETRY, ALE RÓWNIEŻ ZE WZGLĘDU NA TOLERANCJĘ WYKONANIA ELEMENTÓW I RÓŻNICE W ICH CHARAKTERYSTYKACH TEMPERATUROWO-PRĄDOWYCH.

Konstruując układ elektroniczny należy pamiętać, że termistory zabezpieczające NTC rozgrzewają się w trakcie pracy, to jest podczas

przewodzenia nominalnego prądu ciągłego. Straty mocy są znacznie mniejsze, niż w przypadku stosowania rezystorów stałych, jednak pewna ilość ciepła wymagana jest ze względu na zasadę funkcjonowania zabezpieczenia. Parametry termistorów produkcji EPCOS podawane są przy temperaturze od 0 do 65°C. Wyjątkiem są termistory z serii S237, dla których parametry określone są w temperaturze od 0 do 25°C. W praktyce temperatura termistora może przekraczać 40°C i przez to zarówno płytka drukowana jak i elementy otaczające go mogą się rozgrzewać. Z tego powodu raczej nie należy umieszczać termistora w bliskim sąsiedztwie elementów wrażliwych na temperaturę takich, jak elementy półprzewodnikowe i kondensatory elektrolityczne. Trzeba mieć również na uwadze wspomniany wcześniej czas konieczny na ochłodzenie się termistora i powrót rezystancji do stanu początkowego. Z drugiej strony nie wolno również umieszczać termistora blisko elementów rozgrzewających się w trakcie pracy, ponieważ prawdopodobnie przy ponownym załączeniu zasilania urządzenia, zabezpieczenie po prostu nie zadziała.

Mimo, iż przez cały czas mówimy tu o termistorach, to nie wolno tracić podstawowej idei ich zastosowania. Opiswane wyżej termistory służą do zabezpieczenia obwodu i jego elementów. W związku z tym ważne jest, aby miały powtarzalne parametry i wytwarzane były w sposób gwarantujący poprawne zadziałanie zabezpieczenia wówczas, gdy jest potrzebne.

Bezpiecznik – uniwersalne, typowe zabezpieczenie

Bezpieczniki są stosowane chyba od momentu wynalezienia generatorów energii elektrycznej. Ogromny ich wybór można znaleźć w naszym otoczeniu: automatyczne (odtwarzalne), topikowe (jednorazowe), półprzewodnikowe (resetowalne i jednorazowe), szybkie, zwłoczne, SMD, THT, na szynę i wiele innych. Dla nas, elektroników, chyba najbardziej interesujące są bezpieczniki topikowe, do montażu powierzchniowego i przewlekane lub do umieszczenia w gnieździe. Bezpieczniki są przeznaczone do kontrolowania i wyłączania prądów przetężeniowych w sposób trwały. To znaczy, naprawa rozłączonego obwodu wymaga wymiany bezpiecznika na sprawny.

Budowa bezpiecznika topikowego nie zmieniła się od wielu lat. Składa się on z obudowy ceramicznej lub szklanej oraz dwóch styków, pomiędzy którymi jest włączony drut topikowy. Od właściwości tego topika zależą parametry bezpiecznika. W razie zwarcia topik wyparowuje w całości lub w części w ciągu kilku milisekund chroniąc obwód przed uszkodzeniem. Bezpieczniki mogą mieć zwłoczną charakterystyką działania (T), tzn. przy dziesięciokrotnym prądzie znamionowym czas zadziałania wynosi od 10 do 100 ms, co czyni je odpornymi na prądy udarowe załączania po pierwotnej stronie transformatora. Z drugiej strony, w wypadku przeciążeń działają one stosunkowo szybko – prądy dwukrotnie większe od prądu znamionowego wyłączają już po około jednej minucie.

Myszę, że do stosowania bezpieczników topikowych nie trzeba przekonywać żadnego konstruktora. Taki element zajmuje trochę miejsca na płytce drukowanej, ale nie kosztuje wiele i może uchronić urządzenie przed poważnym uszkodzeniem. Warto dodać, że chroni nie tylko urządzenie, ale i użytkownika. W celu ustrzeżenia się zapłonu lub wybuchu, warto jest stosować z bateriami Li-Po oraz Li-Ion tym bardziej, że w handlu są dostępne miniaturowe bezpieczniki topikowe SMD. Można o nich przeczytać również w tym wydaniu EP, w artykule firmy SIBA, uznanego producenta bezpieczników.

Pomimo prostoty budowy, stosowanie bezpieczników nie jest trywialne. Źle dobrany bezpiecznik nie zadziała, mimo iż intuicyjnie będzie się nam wydawało, że powinien... Zachęcam do sięgnięcia do archiwum Elektroniki Praktycznej, dostępnym na stronie <http://www.ep.com.pl>, do „Notatnika praktyka” z numerów 4/95, 7..9/95. W tych wydaniach osoby chcące poszerzyć swoją wiedzę, znajdą kompendium wiedzy na temat zasad aplikacji bezpieczników topikowych i półprzewodnikowych.

Jacek Bogusz, EP