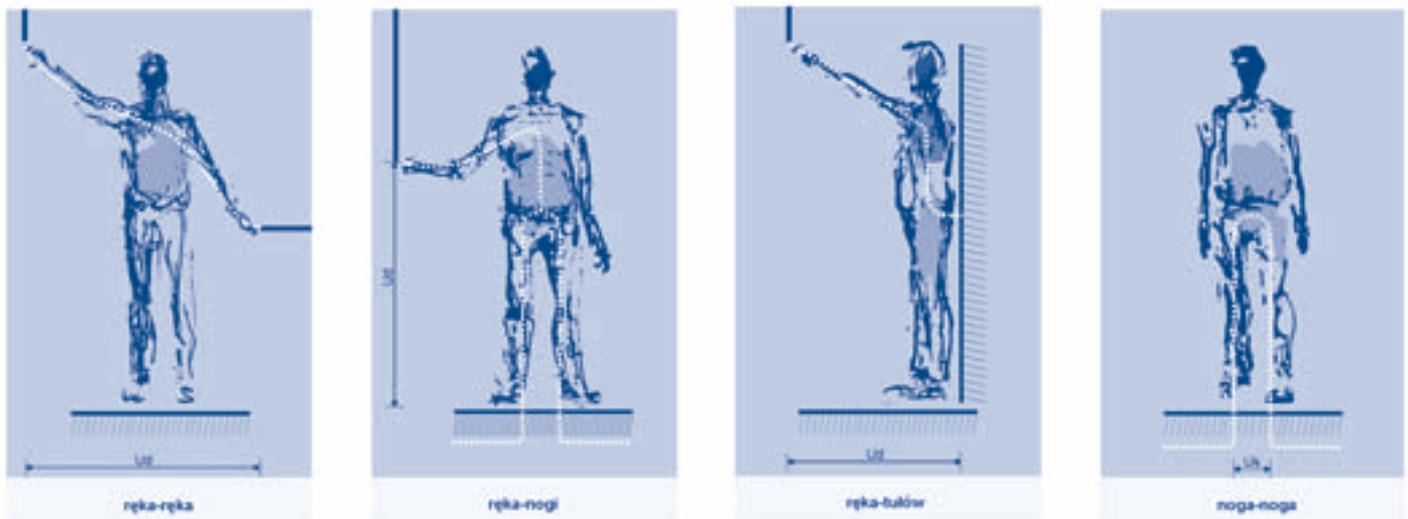


ZAPOBIEGANIE PORAŻENIOM ELEKTRYCZNYM

mgr inż. HUBERT KARSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy

Połączenia ochronne w maszynach (1)



Rys. 1. Przepływ prądu rażeniowego przez ciało człowieka



Maszyny i urządzenia stosowane w przemyśle zasilane są w znakomitej większości energią elektryczną. Ich funkcja, budowa i sposób działania determinują przetwarzanie tej energii na inne rodzaje, najczęściej na energię mechaniczną niezbędną do poruszania całych maszyn bądź ich podzespołów. Stosowanie energii elektrycznej wiąże się nierozłącznie z poważnym zagrożeniem, często niestety lekceważonym, jakim jest możliwość porażenia prądem, ze wszystkimi tego skutkami, do zejścia śmiertelnego włącznie.

Celem niniejszego artykułu jest dostarczenie osobom odpowiedzialnym za techniczne utrzymanie parku maszynowego i pracownikom służb bhp ogólnych informacji dotyczących ochrony przeciwporażeniowej oraz zwrócenie ich uwagi na istotny element budowy maszyn i urządzeń, jakim są *połączenia ochronne*. Zagadnienie starano się ująć w możliwie

najprostszy sposób, nie wnikając w głębszą jego analizę, co umożliwi zapoznanie się z nim szerokiemu gronu Czytelników.

Rozważania dotyczą przemysłowych maszyn i urządzeń niskonapięciowych (o napięciu znamionowym do 1000 V prądu przemiennego i 1500 V prądu stałego), jako najliczniej występujących w praktyce i dostępnych zazwyczaj dla ogółu pracowników.

Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym

O porażeniu mówimy wówczas, gdy przez ciało człowieka przepływa prąd rażeniowy mogący wywołać skutki patofizjologiczne. Stan taki zachodzi wtedy, gdy człowiek dotyka jednocześnie przynajmniej dwóch punktów znajdujących się pod różnymi potencjałami elektrycznymi – zamyka on wówczas swoim ciałem obwód, umożliwiając przepływ takiego prądu.

W zależności od części ciała, które stykają się z przewodzącymi elementami, wyróżniamy napięcie dotykowe (przy przepływie prądu rażeniowego na drodze: ręka-ręka, ręka-noga lub ręka-tułów) i napięcie krokowe (pojawiające się między stopami opartymi na podłożu) – rys. 1.

Ponieważ skutki porażenia dla organizmu ludzkiego z reguły są ciężkie (zaburzenia oddychania i pracy serca, poparzenia wewnętrzne i zewnętrzne, trwała degeneracja tkanek), a mogą też prowadzić do śmierci – koniecznością staje się ograniczenie ryzyka porażenia człowieka do akceptowanego poziomu minimalnego. Osiągalne jest to przede wszystkim przez zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych, zgodnych z przepisami i normami.

Najprostszym sposobem byłoby stosowanie bardzo niskich napięć znamionowych, nie wyższych niż wartość napięcia dotykowego bezpiecznego (oznaczanego prą-

U_f), które może z założenia utrzymywać się długotrwale na dotykanych przez człowieka przedmiotach – bez narażania go na skutki patofizjologiczne. Jednakże zastosowanie w praktyce tak niskich napięć, nie przekraczających 50 V prądu przemienne (a w niekorzystnych warunkach rażeniowych także niższych wartości), oznaczających stosunkowo niewielką moc odbiornika, mogło znaleźć w technice ograniczone zastosowanie, a ponadto obwarowane jest licznymi obostrzeniami [1].

Zastosowanie więc napięć wyższych niż bezpieczne w maszynach i urządzeniach związane jest z obowiązkiem przedsięwzięcia w nich jednocześnie środków ochrony przeciwporażeniowej podstawowej i dodatkowej [2], [3].

Ochrona podstawowa, zwana również **ochroną przed dotykiem bezpośrednim**, uniemożliwia człowiekowi dotknięcie do jakichkolwiek części czynnych, czyli takich, które są przewodzące i z założenia mogą znajdować się pod napięciem podczas normalnej pracy maszyny lub innego urządzenia.

Przykładowo, częściami czynnymi są szyny prądowe rozdzielnic, żyły fazowe przewodów i kabli, elementy stykowe gniazd wtykowych i wtyków, uzwojenia silników oraz inne elementy torów prądowych.

Podstawowym środkiem ochrony jest tu odpowiednio wykonana i trwała izolacja części czynnych, której usunięcie możliwe jest tylko przez jej zniszczenie. Równie istotnym środkiem są obudowy, kryjące w swym wnętrzu części pod napięciem, a wykonane tak, iż uniemożliwiają dostęp do tych części osobom postronnym i chronią zarazem wbudowane aparaty przed niekorzystnymi wpływami środowiskowymi [4].

W niektórych sytuacjach możliwe jest także utrudnienie dostępu do części pod napięciem przez umieszczenie ich poza zasięgiem ręki lub zainstalowanie odpowiedniej przesłony lub bariery [5].

Ochrona dodatkowa, zwana także **ochroną przed dotykiem pośrednim**, zapobiega porażeniu wskutek dotknięcia przez człowieka części przewodzącej do-

stępnej, bądź części przewodzącej obcej (lub obydwu ich razem) w chwili, gdy ta niespodziewanie znajdzie się pod napięciem, mogącym pojawić się na niej np. wskutek awarii ochrony podstawowej [6].

Części przewodzące dostępne (lub odkryte). Są to metalowe elementy i przedmioty związane z wyposażeniem elektrycznym maszyny (czy urządzenia), jak też z instalacją służącą do jej zasilania, które mogą być dotykane przez człowieka, a które ani nie stanowią części czynnych, ani też nie służą do przewodzenia prądu w warunkach normalnej pracy, jednakże mogą znaleźć się pod napięciem w warunkach zakłócenia.

Częściami przewodzącymi dostępnymi są wszelkiego rodzaju szafy zawierające aparaturę zasilającą i sterowniczą, korpusy silników elektrycznych, obudowy czujników itp. Jako przykład można tu przytoczyć spotykaną często sytuację, gdzie na korpusie maszyny dobudowana jest typowa obudowa w kształcie zamkniętej stalowej skrzynki, chroniąca umieszczone w niej aparaty, które stanowią elementy obwodów elektrycznych maszyny. Jaka jest możliwość wystąpienia uszkodzenia środka ochrony podstawowej znajdującego się wewnątrz skrzynki? Może to być np. przetarcie lub wykruszenie się izolacji znajdujących się w niej części czynnych. Innym niebezpieczeństwem może też być poluznienie się zacisków służących do łączenia żył przewodów – uwolniona końcówka opada wówczas na przewodzące części, połączone galwanicznie z tą szafką. W takich sytuacjach cała obudowa może niespodziewanie znaleźć się pod napięciem względem ziemi, równym co do wartości nawet napięciu fazowemu zasilania.

Części przewodzące obce. Są to metalowe elementy i przedmioty, które z założenia nie stanowią wyposażenia elektrycznego maszyny (czy urządzenia), jak też które nie są częściami instalacji służącej do jej zasilania. Mogą one być dotknięte przez człowieka i mogą znaleźć się pod określonym potencjałem, np. potencjałem ziemi.

Przykładowo można wymienić tu części maszyny nie mające związku z jej

wyposażeniem elektrycznym (np. korpus maszyny, który nie stanowi obudowy dla elementów składowych obwodu elektrycznego), jak też wszelkie łączące się z nią lub przebiegające w jej pobliżu metalowe rurociągi, przenośniki, ogrodzenia, konstrukcje wsporcze itp. Zazwyczaj części te stykają się z ziemią lub z uziemionymi masami i dlatego przyjmują potencjał ziemi. Jednakże może zaistnieć sytuacja, w której części przewodzące obce mogą znaleźć się pod napięciem niebezpiecznym dla człowieka w stosunku do innych części o tym samym charakterze lub nawet do ziemi. Może to mieć miejsce w różnorodnych stanach awarii (np. przy wspomnianym zetknięciu z częściami czynnymi wskutek uszkodzenia ich izolacji, podczas przepływu prądu zwarciowego doziemnego) lub podczas wystąpienia pobliskiego wyładowania atmosferycznego.

Działanie środków ochrony przed dotykiem pośrednim

Jednym z najskuteczniejszych środków ochrony jest zastosowanie urządzenia o tzw. II klasy ochronności [6]. Oznacza to zaopatrzenie go w izolacyjną obudowę (bądź w podwójną lub wzmocnioną izolację) tak, by ewentualne uszkodzenie izolacji roboczej nie odsłoniło części czynnych. Rozwiązanie to jest powszechnie znane z licznych urządzeń gospodarstwa domowego, techniki biurowej i elektronarzędzi. Jednakże pomimo prostoty budowy i łatwości przyłączenia takiego odbiornika do zasilania, ten środek ochrony znalazł dość ograniczone zastosowanie w przemyśle, podobnie jak i inne środki przydatne do specyficznych zastosowań, jak np. separacja elektryczna czy izolowanie stanowiska. Niewątpliwie przyczyną tego jest złożoność budowy maszyn przemysłowych i trudne warunki środowiskowe, w jakich są one eksploatowane.

Przed wszystkim należy jednak stwierdzić, że istniejący stan rzeczy ma swoje podłoże w stosowanym najczęściej w instalacjach zasilających środku ochrony, jakim tradycyjnie jest *samoczynne*

wylączenie zasilania. Ze względu na jego znaczne rozpowszechnienie w kraju, można nazwać go najszerzej stosowanym środkiem ochrony, zarówno w niskonapięciowych instalacjach stosowanych w przemyśle, obiektach użyteczności publicznej, jak i w budynkach mieszkalnych.

Ujmując problem historycznie, stwierdza się, że już w początkach żywiolowej elektryfikacji zaobserwowano wypadki porażenia prądem elektrycznym. Jedną z ich częściej występujących przyczyn było uszkodzenie izolacji roboczej, stanowiącej praktycznie jedyny środek ochrony przeciwporażeniowej. Używając dzisiejszego słownictwa powiedzielibyśmy, że stosowano wówczas urządzenia o klasie ochronności 0, czyli wyposażone jedynie w ochronę przed dotykiem bezpośrednim. Zaobserwowano też, że skutki wypadków są tym cięższe, im bardziej wilgotny naskórek miał uszkodzony w chwili porażenia oraz im więcej uziemionych mas metalowych było w zasięgu jego ręki.

Uziemienie ochronne

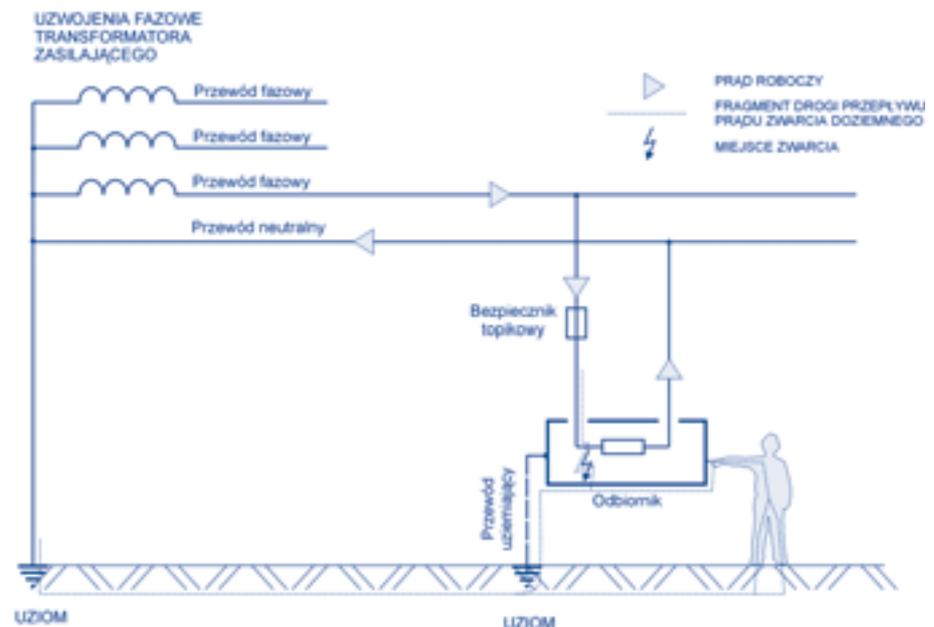
„Uziemienie ochronne” (dziś zwane *układem połączeń TT*), wprowadzone w konsekwencji opisanych wydarzeń do eksploataowanych wówczas urządzeń, było wykorzystywane w początkach stosowania środków ochrony przed dotykiem pośrednim. Istota zagadnienia polegała na celowym połączeniu *przewodem uziemiającym* (współcześnie oznaczanym *PE*) metalowego korpusu chronionego urządzenia z uziomem (wykonanym w tym celu lub doraźnie wykorzystywanym, np. w formie rur wodociągowych), zastosowanego w przestrzeniach o zwiększonym zagrożeniu porażeniowym, czyli wilgotnych lub wyposażonych w metalowe masy (np. łazienki, pralnie, warsztaty itp.). Takie urządzenia nazwalibyśmy dziś wykonanymi w I klasie ochronności, tzn. oprócz izolacji podstawowej jako środka ochrony przed dotykiem bezpośrednim, w ich konstrukcji zastosowano również środek ochrony przed dotykiem pośrednim – rys. 2.

Działanie takiego rozwiązania jest dwójakie:

– dzięki istnieniu przewodu uziemiającego, łączącego korpus maszyny czy obudowę urządzenia z jednej strony (czyli *część przewodzącą dostępną*) z uziomem i uziemionym przewodzącym podłożem czy elementami konstrukcyjnymi i rurociągami z drugiej strony (czyli *częściami przewodzącymi obcymi*) wyrównują się potencjały elektryczne między tak połączonymi przedmiotami; ma to szczególne znaczenie w chwili zaistnienia przebicia izolacji i wynikającego stąd przepływu prądu zwarcia doziemnego, gdyż nie

uzwojenie transformatora-przewód fazowy zasilania-odbiornik-przewód powrotny (neutralny)-uzwojenie transformatora.

Zgodnie z prawem Ohma, wartość prądu zwarcia jest większa od wartości prądu roboczego, jaki płynąłby w nieszkodzonym obwodzie. Jeżeli obwód ten wyposażymy w urządzenie wykrywające wzrost prądu ponad określoną wartość, np. w powszechnie znany *bezpiecznik topikowy*, to przy odpowiednim dobraniu wkładki bezpiecznikowej osiągniemy stopień się elementu topikowego wewnątrz



Rys. 2. Układ połączeń TT (dawniej „uziemienie ochronne”)

powoduje powstania niebezpiecznej dla dotykającego człowieka różnicy napięć;
– wypadkowa impedancja (oporność) powstałej w ten sposób pętli zwarcia, obejmującej w uproszczeniu:

uzwojenie transformatora (jako źródło zasilania)-przewód fazowy zasilania-miejsce zwarcia-przewód uziemiający-uziom-ziemię-uziom punktu gwiazdowego transformatora-uzwojenie transformatora,

jest z reguły mniejsza, niż wypadkowa impedancja dotychczasowego obwodu sprzed wystąpienia uszkodzenia, obejmującego w uproszczeniu:

tej wkładki wskutek przepływu prądu zwarcia, a więc stan zwarcia doziemnego w obwodzie zostanie samoczynnie wyłączony, co, w dużym uproszczeniu, jest celem stosowania takiego zabezpieczenia w opisanym układzie połączeń.

Poprawne funkcjonowanie uziemienia ochronnego opiera się na zapewnieniu ciągłości obwodu będącego pętlą zwarcia i na utrzymywaniu odpowiednio niskiej wartości jej impedancji wypadkowej. O ile w dawniej obowiązujących przepisach było wymagane takie prowa-

dzenie przewodów uziemiających, aby możliwe było wizualne kontrolowanie ich ciągłości, o tyle sprawdzenie rezystancji uziemienia, zwłaszcza gdy jako uziomy wykorzystywane były często przypadkowe metalowe przedmioty znajdujące się w ziemi lub pograżane w niej w sposób nieprofesjonalny, jest możliwe tylko poprzez dokonanie pomiaru.

Wobec wzrastających mocy znamionowych maszyn, system uziemienia ochronnego, oparty na często niedoskonałych uziomach, stopniowo przestawał spełniać pokładane w nim nadzieje. Spo-

czas potrzebny do zadziałania wkładek bezpiecznikowych, oznaczający utrzymywanie się niedopuszczalnego napięcia na obudowach urządzeń), bądź całkowity brak takiego zadziałania wskutek przepływu prądu zwarcia o niedostatecznej wartości. Zmniejszanie rezystancji uziomów wymagałoby nieracjonalnych nakładów, a inne sposoby obniżania impedancji pętli zwarcia w takim układzie byłyby technicznie nieuzasadnione, co nie stanowiło jednak podstaw do całkowitego wyeliminowania tego układu, współcześnie spotykanego w praktyce.

wodzące chronionych obiektów przyłącza się do niego stosując *przewód zerujący*. Uzyskuje się w ten sposób następującą drogę przepływu prądu zwarciego:

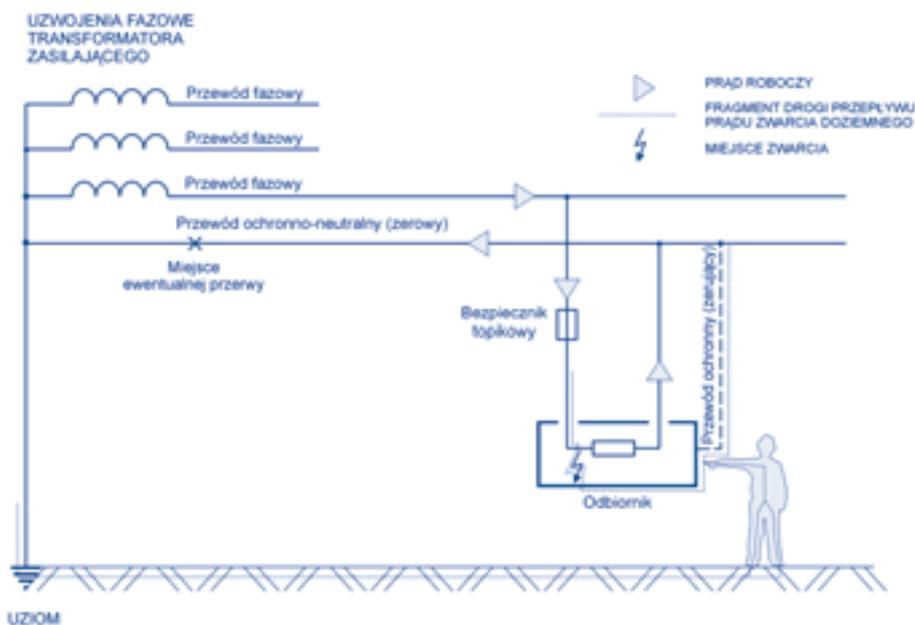
uzwojenie transformatora-przewód fazowy zasilania-odbiornik-przewód zerujący-przewód zerowy (ochronno-neutralny)-uzwojenie transformatora.

Charakteryzuje się ona zdecydowanie niższą wartością wypadkowej impedancji obwodu zwarciego, niż w poprzednim przypadku, co ułatwia szybkie zadziałanie zabezpieczeń nadmiarowo-prądowych, a ponadto mniej zależy od niepewnych w eksploatacji uziomów, rozproszonych w pobliżu chronionych urządzeń.

Obowiązujące dawniej przepisy dopuszczały połączenie przewodu zerującego z zerowym w ułożonej na stałe części instalacji, co oznaczało, że w sznurze służącym do przyłączania maszyny do gniazda wtykowego przewody te musiały być rozdzielone.

Wprowadzanie takiego środka ochrony wiązało się z koniecznością bezwzględnego zlikwidowania wszelkich urządzeń włączonych w przewody zerujące i zerowe, a mogących przerwać obwód, jak np. bezpieczników topikowych, pozostających często w instalacjach wykorzystujących wcześniej uziemienie ochronne, czy różnego rodzaju łączników. Nietrudno zauważyć, że przerwanie tych przewodów powoduje natychmiast pojawienie się pełnego napięcia fazowego (czyli 220 V względem ziemi) na obudowach wszystkich chronionych urządzeń, nawet w pełni sprawnych, przyłączonych za miejscem takiej przerwy. Poza tym uniemożliwia wyrównanie ich potencjału w stosunku do ziemi (np. poprzez uziom w stacji transformatorowej). Istnienie potencjalnego zagrożenia porażeniem w tej sytuacji stało u źródeł wprowadzenia bardzo licznych obostrzeń w budowie i eksploatacji urządzeń, ale przede wszystkim wymagało nie mniej kłopotliwej zmiany świadomości u wykonawców instalacji i konserwatorów urządzeń.

Obecnie można stwierdzić, że taki środek ochrony występuje w zdecydowanej większości instalacji elektroenergetycznych wykonywanych kilka, kilkanaście



Rys. 3. Układ połączeń TN-C (dawniej „zerowanie”)

wodowane to było coraz większymi wartościami prądów znamionowych stosowanych zabezpieczeń nadmiarowoprądowych (rzędu kilkudziesięciu lub kilkuset amperów) i oznaczało również konieczność wymuszenia przepływu proporcjonalnie większych prądów zwarciegich, niezbędnych do zadziałania ich elementów topikowych (setki amperów lub więcej), co przy istniejących wypadkowych impedancjach pętli zwarcia stawało się nieosiągalne. Powodowało to nieskuteczność środka ochrony przeciwporażeniowej, rozumianej jako niedostatecznie szybkie wyłączenie zwarcia (czyli zbyt długi

Zerowanie

Znaczną poprawę funkcjonowania samoczynnego wyłączenia zasilania osiągnięto poprzez zastosowanie tego środka ochrony w układzie zwanym tradycyjnie „zerowaniem” (dziś nazywanego *układem połączeń TN-C*), w miejsce poprzednio wymienionego uziemienia ochronnego – rys. 3.

Jak wynika z nazwy tego układu, wykorzystuje się w nim *przewód zerowy* (zwany obecnie *ochronno-neutralnym PEN*) do zamknięcia przezeń pętli ewentualnego zwarcia. Dostępne części prze-

lat temu (a nawet więcej), praktycznie we wszystkich rodzajach obiektów budowlanych i z pewnością służyć będzie jeszcze do momentu wykonywania najbliższego remontu.

Rozwiązania współczesne

Kolejną zmianą ewolucyjną było wprowadzenie tzw. nowoczesnej wersji zerowania, czyli zapewnienia odpowiednio szybkiego samoczynnego wyłączenia zasilania uszkodzonego elementu w układzie połączeń, w którym obwód prądu zwarcia doziemnego zamykałby się przez specjalnie zastosowane przewody ochronne. Układ taki (oznaczany *TN-S*) praktycznie wymagany jest w obecnie oddawanych do użytku obiektach lub też poddawanych modernizacji [8], [9] (rys. 4).

Jego istotą jest rozdzielenie funkcji przewodu ochronno-neutralnego (PEN) na dwa osobne przewody: ochronny (oznaczany PE) i neutralny (oznaczany N). Pozwala to uniknąć zagrożenia porażeniem w chwili wystąpienia przerwy w przewodzie PEN, co stanowiło ewidentną wadę omówionego systemu TN-C. Oznacza to, że w układzie TN-S przerwa w przewodzie neutralnym N uniemożliwia wprowadzenie normalnego działania urządzenia, jednakże nie zakłóca funkcjonowania ochrony przed dotykiem pośrednim, gdyż przewód ochronny PE wciąż pełni swą rolę, co jest niewątpliwą zaletą tego rozwiązania, kompensującą nawet niedogodności i nakłady związane z przebudową mającą na celu dostosowanie tradycyjnego „zerowania” do warunków stawianych nowym instalacjom.

Warto zauważyć, że opisane udoskonalenie dotyczy zasadniczo instalacji elektroenergetycznej, czyli znajdującej się wewnątrz obiektu lub z nim bezpośrednio związanej. W wersji 3-fazowej zawiera ona teraz 5 przewodów: fazowe (L1, L2 i L3), neutralny (N) i ochronny (PE). Natomiast dotychczasowe źródło zasilania, będące siecią elektroenergetyczną doprowadzającą energię z zewnątrz lub będące własną stacją transformatorową obiektu, pracuje nadal w układzie 4-przewodowym (L1, L2, L3 i PEN), skąd wynika oznaczenie odmiany takiego układu: *TN-C-S*.

Innym ważnym usprawnieniem, zdającym do zaadaptowania w układzie TN-S, a podnoszącym ogólny poziom bezpieczeństwa użytkownika energii elektrycznej jest zastosowanie zabezpieczeń różnicowoprądowych. Reagują one na upływ prądu do ziemi, który wykrywają poprzez ciągłe porównywanie wartości prądów w przewodach roboczych (L i N) – wykrycie nierównowagi w obwodzie oznacza więc zwarcie doziemne. Ich wysoka czułość sprawia, że dla wywołania odłączenia zasilania wystarczy pojawienie się zdecydowanie niższego, niż w omawianych wyżej układach, prądu zwarcia doziemnego (np. rzędu tylko kilkudziesięciu miliamperów), powracającego przez

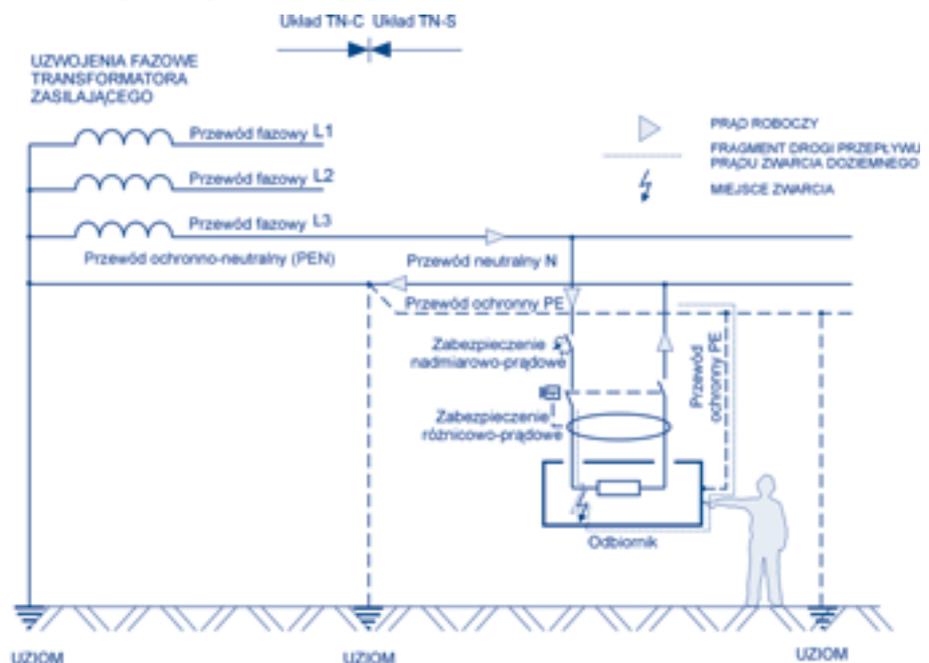
[2] PN-EN 60204-1+AC:1997 *Bezpieczeństwo maszyn. Wyposażenie elektryczne maszyn. Wymagania ogólne*

[3] PN-IEC 60364-4-47:1999 *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona zapewniająca bezpieczeństwo. Zastosowanie środków ochrony zapewniających bezpieczeństwo. Postanowienia ogólne. Środki ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym*

[4] PN-92/E-08106 *Stopnie ochrony zapewniane przez obudowy (Kod IP)*

[5] PN-IEC 364-4-481:1994 *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona zapewniająca bezpieczeństwo. Dobór środków ochrony w zależności od wpływów zewnętrznych. Wybór środków ochrony przeciwporażeniowej w zależności od wpływów zewnętrznych*

[6] PN-E-05032:1994 *Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym. Wspólne aspekty*



Rys. 4. Układ połączeń TN-C-S

przewód ochronny PE przyłączony do obudowy chronionej maszyny lub urządzenia.

Wspomnieć również należy o istnieniu układu połączeń IT, w którym środki ochrony przed dotykiem pośrednim zbliżone są do znanych z układu TT.

PIŚMIENNICTWO

[1] PN-IEC 60364-4-41:2000 *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przeciwporażeniowa*

instalacji i urządzeń

[7] PN-92/E-05031 *Klasyfikacja urządzeń elektrycznych i elektronicznych z punktu widzenia ochrony przed porażeniem prądem elektrycznym*

[8] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – *Prawo budowlane* (tekst jednolity DzU nr 106 z 2000 r., poz. 1126)

[9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki Przemysłowej i Budownictwa z dnia 14 grudnia 1994 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (tekst jednolity DzU nr 15 z 1999 r., poz. 140; zm. nr 44, poz. 434)