

OPIS WYBRANYCH ZAGADNIĘĆ ZWIĄZANYCH Z ZAGROŻENIAMI PODCZAS EKSPLOATACJI SIECI Z IZOLOWANYM PUNKTEM NEUTRALNYM

DESCRIPTION OF SELECTED HAZARDOUS ISSUES DURING OPERATING THE POWER GRID WITH THE INSULATED NEUTRAL POINT

Tomasz Nowak

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81-87, 81–225 Gdynia, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, e-mail: t.nowak@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: Artykuł dotyczy analizy parametrów występujących w sieciach okrętowych trójfazowych z izolowanym punktem neutralnym. Przedstawia zagrożenia porażeniowe występujące podczas eksploatacji sieci elektroenergetycznej typu IT powszechnie stosowanych na statkach morskich.

Słowa kluczowe: sieć elektroenergetyczna typu IT, pomieszczenia, materiały, inne czynniki.

Abstract: The article considers the analysis of parameters occurring in three-phase marine grid networks with an insulated neutral point. It presents the electric shock hazards occurring during the operation of the IT power grid network commonly used on sea-going ships.

Keywords: IT, TT power grid, rooms, materials, other factors.

1. WSTĘP

Powszechność stosowania na statkach elektroenergetycznych układów sieciowych typu IT generuje potrzebę ciągłego monitorowania stanu technicznego takiego rozwiązania. Ponadto system IT wymaga bacznej uwagi personelu technicznego przede wszystkim w zakresie możliwości wystąpienia zagrożeń porażeniowych, wynikających z eksploatacji takiego typu sieci.

Nonszalancja, brak ostrożności, brak wiedzy na temat zagrożeń porażeniowych, wynikających z eksploatacji sieci z izolowanym punktem neutralnym, może skutkować poważnymi wypadkami.

2. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA NIEBEZPIECZEŃSTWO PORAŻEŃ PRĄDEM NA STATKU

Praca przy urządzeniach elektrycznych wymaga znacznie większej uwagi niż przy innych urządzeniach znajdujących się na statku. W pobliżu urządzeń znajdujących się pod napięciem nie ujawniają się najczęściej oznaki, które ostrzegałyby obsługujących o grożącym niebezpieczeństwie. Ciągłe oddziaływanie specyficznych czynników środowiska morskiego na zmysły człowieka (np. temperatura, hałas, drgania, zasolenie, wilgotność, niespodziewane przechyły statku) zmusza obsługę do stałej uwagi i kontroli swych poczynań, co w szczególności dotyczy elektryka okrętowego. Jednocześnie te czynniki powodują znaczny wzrost niebezpieczeństwa porażeniowego.

Wypadki porażenia prądem elektrycznym na statku można podzielić ze względu na aspekt czynnika je wywołującego, a ten może być – ludzki lub natury technologicznej.

Do grupy pierwszej można zaliczyć wypadki spowodowane przez nieostrożność, lekceważenie obowiązujących przepisów, roztargnienie, omyłki, brak odpowiedniej kontroli urządzeń zabezpieczających, złą organizację pracy, brak nadzoru, źle zrozumiane polecenie, niedbałe wykonanie pracy, nieumiejętność lub nieznajomość instrukcji, czasami nieszczęśliwy zbieg okoliczności.

Druga grupa obejmuje wypadki z powodu np. złej jakości materiałów użytych do budowy urządzeń elektrycznych, braku odpowiedniej klasy narzędzi i sprzętu ochronnego, złego doboru technicznego maszyn i aparatów elektrycznych, błędów montażowych podczas produkcji itp. [Siadaczka 1985].

3. POMIESZCZENIA, MATERIAŁY ELEKTROIZOLACYJNE

Pomieszczenia na statku, w których znajdują się urządzenia elektryczne, można podzielić w zależności od warunków otoczenia w nich panujących, jak również możliwości dostępu członków załogi – nieograniczonego, względnie ograniczonego tylko dla elektryków okrętowych lub upoważnionego personelu (pomieszczenia zamknięte ruchu elektrycznego). Szczegółowe przepisy dotyczące podziału pomieszczeń zamkniętego ruchu elektrycznego znajdują się w rozdziale 2 przepisów PRS, część VIII [PRS 2017].

Prawidłowa i bezpieczna eksploatacja elektrycznych urządzeń okrętowych wymaga zapoznania się z odpowiednimi przepisami i konsekwentnego ich przestrzegania. Przepisy zalecają stosowanie siatek, barier, ekranów, tablic ostrzegawczych itp. Omawiają zagadnienia wpływu temperatury i wilgotności na żywotność urządzeń elektrycznych. Wszystkie te zagadnienia mają uczulić obsługę i uniemożliwić powstanie wypadku. Przykładem mogą być zagadnienia dotyczące

pomieszczeń wilgotnych, gdzie występują większe zagrożenia porażeniowe na skutek zmniejszenia rezystancji przejścia do ciała człowieka oraz trudności w utrzymaniu wymaganej rezystancji izolacji sieci elektroenergetycznej. W tego rodzaju strefach występują szkodliwe oddziaływania środowiskowe szczególnie destrukcyjne w strukturach izolacyjnych podczas postępu urządzeń. W związku z tym dużego znaczenia nabiera w użytkowaniu sieci elektrycznej z izolowanym punktem neutralnym ciągła niezawodna kontrola stanu izolacji sieci.

Na statku dobór maszyn i urządzeń, sposób wykonania instalacji elektrycznych, jakość zastosowanych materiałów są w znacznej mierze uwarunkowane środowiskiem morskim. Duża część maszyn, urządzeń jest wykonana specjalnie z uwzględnieniem warunków okrętowych. Musi im odpowiadać jakość materiałów zastosowanych do budowy. Kryteria doboru wszelkich urządzeń elektrycznych są dla statku objęte szczególnymi przepisami instytucji klasyfikacyjnych. Wszystkie te obostrzenia techniczno-eksploatacyjne służą podniesieniu bezpieczeństwa porażeniowego obsługi urządzeń oraz niezawodności ich pracy. Z tych też względów ważną sprawą staje się zagadnienie jakości oraz doboru izolacji urządzeń oraz instalacji okrętowych [PRS 2017].

Rezystancja izolacji przewodów i kabli w sieci okrętowej osiąga zazwyczaj określoną wartość rzędu $M\Omega$, zależną od struktury fizykochemicznej, przyłożonego napięcia próby i temperatury. Z tego względu pomiędzy izolowanymi przewodami o różnych potencjałach poprzez rezystancję ich izolacji płyną prądy upływnościowe. Prądy te rozłożone wzdłuż długich odcinków sieci nie są szkodliwe dla izolacji. Jednak zgrupowane w niewielu punktach mogą spowodować nagrzanie izolacji i być przyczyną pożaru, a także stworzyć dodatkowe zagrożenie porażeniowe.

Przepisy PRS zalecają stosowanie na statkach materiałów izolacyjnych co najmniej klasy E. Materiały te powinny mieć odpowiednią wytrzymałość mechaniczną i elektryczną oraz być odporne na prądy pełzające, a także na wilgoć i pary oleju.

W warunkach okrętowych, gdzie wszelkie awarie usuwa się na bieżąco (dla zachowania ciągłości ruchu statku), konieczne jest, aby wszystkie urządzenia i materiały zapasowe były uzupełniane na bieżąco zgodnie z logiką utrzymywania określonego zapasu, wyznaczanego na podstawie wzorów, opartych na wybranych wskaźnikach zawodnościowych zależnych od konstrukcji urządzeń i współczynników środowiskowych [Majewski 2000].

4. KWALIFIKACJE I ORGANIZACJA PRACY NA STATKU, SPRZĘT

Czynnik kwalifikacji i organizacji pracy jest jednym z tych, który w sposób decydujący wpływa na bezpieczeństwo porażeniowe podczas wykonywania prac przy urządzeniach elektrycznych i często jest niedoceniany. Wydaje się, iż obecny

tryb zdobywania dyplomów morskich i wymagana praktyka pozwalają mieć nadzieję na uzyskiwanie wystarczających kwalifikacji zawodowych. Jednakże nie zwalnia to z przestrzegania przez odpowiednie służby określonych przepisów.

Organizację pracy elektryka okrętowego ustalają całe zbiory przepisów, dotyczące sprawnego i bezpiecznego eksploataowania urządzeń elektrycznych. Na statku można znaleźć szereg instrukcji, czy to czynnościowych czy stanowiskowych, określających zakres zależności służbowych, odpowiedzialności, podziały obowiązków sposoby eksploatacji urządzeń, przepisy bezpieczeństwa pracy itp. Stosowanie się do poleceń zawartych w tych materiałach prowadzi do znacznego ograniczenia możliwości porażenia prądem elektrycznym.

Rodzaj pracy wykonywanej przez elektryka okrętowego znacząco wpływa na jego samopoczucie psychofizyczne. Wykonywanie prac na statku, związanych np. z dużą monotonią zajęć (przykładem tu może być codzienny obchód statku związany ze sprawdzeniem stanu oświetlenia, czy też praca w tablicach rozdzielczych z wielką liczbą kabli, zacisków i innej aparatury), znacznie obniża spostrzegawczość, czujność oraz uwagę. Nieobojętna w tej kwestii jest też pozycja ciała, w jakiej przychodzi elektrykowi pracować. Na statku zdarzają się prace wymagające nieraz niemal akrobatycznej pozycji. Powodują one szybsze zmęczenie i znużenie człowieka, wpływając tym samym na zwiększenie niebezpieczeństwa wypadku.

Wykonywanie prac elektrycznych na statku wiąże się z określonymi warunkami otoczenia, do których należą m.in. obecność innych członków załogi, prace na wysokości czy też te wykonywane w szczególnych warunkach środowiskowych. Wskazane jest, by prace szczególnie niebezpiecznie, prowadzone w złożonych warunkach porażeniowych (np. przy GTR, w chłodniach, przy kabestanach itp.), były asekurowane przez drugą osobę.

Podczas wykonywania prac elektrycy okrętowi powinni posługiwać się właściwymi narzędziami oraz odpowiednim do rodzajów pracy sprzętem ochronnym. W celu spełnienia tego wymogu statki wyposaża się w zestawy specjalnych narzędzi i przyrządów, koniecznych do demontażu i montażu urządzeń elektrycznych w warunkach eksploatacji. W praktyce w sieciach niskonapięciowych elektrycy na statku dysponują dobrym zestawem narzędzi i sprzętu pomiarowego. Jeśli jest on dobrze użytkowany, konserwowany, pozwala skutecznie ograniczyć występowanie porażenia. Elektryk i wyznaczone przez niego osoby ponoszą odpowiedzialność za właściwą gospodarkę sprzętem ochronnym, szczególnie za prawidłowe przechowywanie i ewidencjonowanie, dokonywanie prób kontrolnych we właściwym czasie, niezwłoczne usuwanie sprzętu uszkodzonego i uzupełnienie zapasu.

W zależności od przeznaczenia sprzęt ochronny dzieli się na następujące grupy:

- sprzęt izolujący zasadniczy i dodatkowy (drażki, kleszcze, uchwyty izolacyjne, rękawice dielektryczne, narzędzia izolowane, kalosze izolacyjne, chodniki gumowe, hełmy ochronne);

- sprzęt wskazujący obecność napięcia lub prądu;
- sprzęt zabezpieczający i pomocniczy (okulary przeciwodpryskowe, maski przeciwgazowe, pasy bezpieczeństwa, kaski ochronne, ochronniki słuchu, ogrodzenia, barierki, liny, płyty izolacyjne, siatki ochronne, tablice ostrzegawcze).

5. INNE CZYNNIKI

Złożoność środowiska okrętowego, którą można rozpatrywać jako komponent oddziaływań na człowieka wszystkich podzespołów statku, pogody, morza czy wreszcie innych członków załogi, powoduje, że niemożliwe staje się omówienie wszystkich rzeczywistych czynników, zwiększających zagrożenie porażenia prądem elektrycznym. Można do nich zaliczyć m.in. elektryczność statyczną, oddziaływanie pól elektromagnetycznych na organizm człowieka czy występowanie w życiu człowieka różnych okresów aktywności, tzw. biorytmów.

Elektryczność statyczna jest w chwili obecnej czynnikiem środowiskowym o niekorzystnym, nawet szkodliwym wpływie na organizm ludzki. Z badań doświadczalnych i obserwacji procesów eksploatacyjnych wynika, że najczęściej występującym zjawiskiem powstawania ładunków jest elektryzacja przy tarcia wzajemnie przemieszczających się zetkniętych powierzchni. Do czynności wykonywanych przez załogę, w których wyniku występuje intensyfikacja procesu elektryzacji, należy zaliczyć każde tarcie wykonywane na materiałach elektryzacyjnych, tj. chodzenie w obuwiu z podeszwami z materiałów nieprzewodzących po wykładzinach, chodnikach, wycieranie podłóg i wykładzin ściennych tkaninami z materiałów syntetycznych itp. Skala odczuwalności wyładowań elektrostatycznych jest zróżnicowana w zależności od indywidualnych cech i odporności psychicznej człowieka. Małe natężenie prądu i krótki czas trwania wyładowania nie są przyczyną zmian fizjologicznych w organizmie. Impulsy elektrostatyczne mają jednak zdecydowanie niekorzystny wpływ na układ nerwowy człowieka.

Pola elektromagnetyczne o dużych częstotliwościach i odpowiednio wysokiej indukcji są szkodliwe dla zdrowia człowieka. Badania nad działaniem zmiennych pól elektromagnetycznych o częstotliwościach sieciowych jeszcze trwają. Tym niemniej zaobserwowano, że ekspozycja tych pól na organizm ludzki przez czasy rzędu kilku godzin i więcej powoduje zmiany krótkotrwałej pamięci oraz zdolności do wykonywania prostych czynności przy operacjach arytmetycznych. Jasny więc w tym momencie wydaje się wniosek, że zwiększenie zagrożenia porażeniowego dla ludzi pracujących długotrwale przy obciążonych szynach GTR jest faktem i trzeba je brać pod uwagę przy projektowaniu konstrukcji sieci okrętowej.

Literatura, zajmująca się bezpieczeństwem i higieną pracy, wskazuje na coraz większy udział czynnika biologicznego, a nie tylko techniczno-organizacyjnego, w zespole zdarzeń prowadzących do wypadków. Współczesne nauki przyrodnicze

starają się taki stan rzeczy wytłumaczyć zjawiskami, nazwanymi rytмами biologicznymi. Procesy biologiczne i czynności fizjologiczne organizmu człowieka podlegają cyklicznym wahaniom i występują z dużą regularnością. Przejścia między fazami biologicznymi człowieka stanowią okres szczególnie niekorzystny dla organizmu i przyjęto go nazywać krytycznym. Rośnie wówczas prawdopodobieństwo spowodowania wypadku przez pracownika.

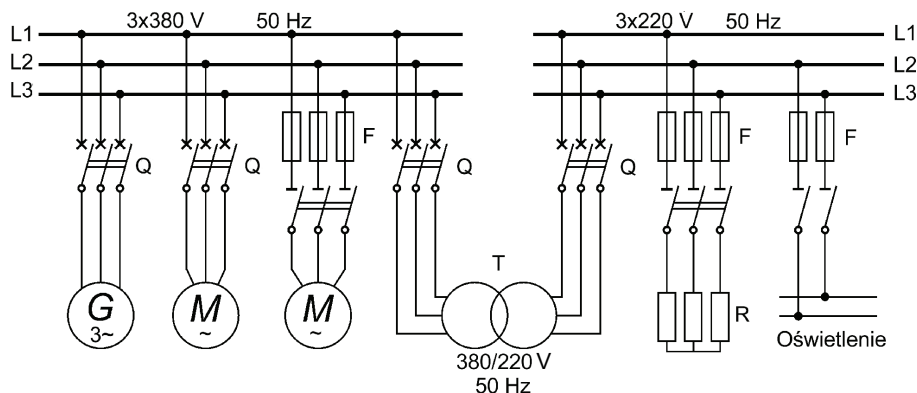
6. NIEBEZPIECZEŃSTWO PORAŻENIA W SIECI TRÓJFAZOWEJ PRĄDU PRZEMIENNEGO Z IZOLOWANYM PUNKTEM NEUTRALNYM

Brak pełnego rozeznania warunków wystąpienia napięć niebezpiecznych na częściach systemu elektroenergetycznego w okresie eksploatacji jest niejednokrotnie okolicznością sprzyjającą dla powstania wypadków porażenia prądem elektrycznym. Dotychczasowe oceny stanu zagrożenia porażeniem elektrycznym zwykle uzależniały niebezpieczeństwo od szeregu statycznych parametrów, takich jak napięcie, rezystancja izolacji itp. Ten tradycyjny sposób przedstawiania zagrożeń, logicznie związany z parametrami obiektu, nie uwzględnia w pełni wpływu zmian tych parametrów w okresie eksploatacji. Nikt rozsądny nie będzie poważnie traktował stwierdzenia, że minimalne obniżenie rezystancji izolacji poniżej rezystancji, zalecanej obowiązującymi przepisami, powoduje natychmiastowy, gwałtowny wzrost zagrożenia porażeniowego prądem elektrycznym. Można zawsze mieć wątpliwości, czy spełnienie wymagań wynikających z przepisów daje gwarancję pełnego bezpieczeństwa.

Sieć trójfazowa trójprzewodowa prądu przemiennego z izolowanym punktem neutralnym IT (rys. 1) jest obecnie najczęściej spotykaną okrętową siecią elektroenergetyczną. Pozwala ona wykorzystać zalety tej struktury sieciowej, a w szczególności umożliwia:

- długotrwałą pracę awaryjną z doziemieniem jednej fazy;
- ograniczenie prądów rażenia, wynikających z jednofazowego uszkodzenia izolacji;
- zmniejszenie możliwości zagrożenia pożarowego i wybuchów przy uszkodzeniu izolacji jednej fazy.

Wymienione wyżej zalety mogą być wykorzystywane jednak tylko wtedy, jeżeli doziemienie jednej fazy będzie trwać stosunkowo krótko. Długotrwała praca awaryjna z doziemieniem stwarza bowiem ostrzejsze warunki napięciowe dla pracujących urządzeń i jeśli te przekroczą określony dla urządzeń dopuszczalny normami poziom, to mogą wystąpić wielkoprądowe zwarcia dwufazowe. Poza tym w czasie występowania zwarc z kadłubem mogą powstać miejscowo znaczne przepięcia między kadłubem a przewodami wszystkich faz.



Rys. 1. Struktura okrętowej sieci prądu przemiennego typu IT

Fig. 1. Structure of an AC marine of IT grid network

Sieć trójfazowa IT posiada ponadto wiele wad, do których należą:

- brak wybiórczego wykrywania zwarć z kadłubem;
- prąd zwarcia niejednoczesnego, tzn. taki, który zaczyna się od zwarcia dwufazowego, a dopiero po pewnym czasie przechodzi w zwarcie trójfazowe i może być większy od prądów zwarć jednoczesnych;
- dla rozległych sieci okrętowych występują znaczne pojemności przewodów fazowych względem kadłuba statku, powodujące zjawisko tzw. uziemienia punktu neutralnego, co jest przyczyną utraty jednej z największych zalet, tj. ograniczania prądów rażenia [Musiał 2012].

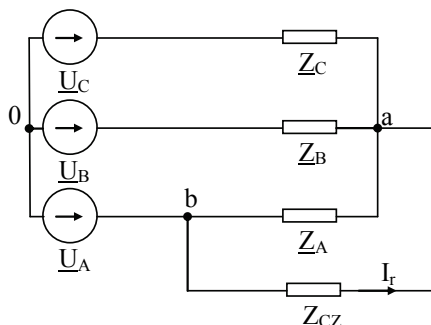
W praktyce eksploatacji urządzeń elektrycznych na statku z siecią trójfazową prądu przemiennego typu IT do najczęściej występujących przypadków porażen można zaliczyć:

- przypadek pierwszy – zetknięcie się ciała ludzkiego z przewodem jednej fazy przy dobrym stanie izolacji pozostałych faz (rys. 2), zależność napięcia rażenia przyjmuje postać (1);

$$U_r = U_f \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_i(R_i + 6R_{cz})}{9R_{cz}^2(1 + \omega^2 C^2 R_i^2)}}} \quad (1)$$

gdzie:

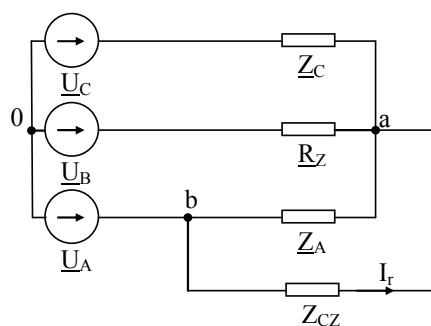
- U_f – napięcie fazowe,
- R_i – rezystancja fazowa izolacji względem kadłuba,
- R_{cz} – zastępcza rezystancja ciała człowieka,
- C – pojemność sieci,
- ω – pulsacja.



Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu rażenia przy dotknięciu jednej fazy w sieci trójfazowej izolowanej

Fig. 2. Diagram of electric shock circuit by touch of one phase in 3-phase insulated network

- przypadek drugi – zetknięcie się ciała ludzkiego z przewodem jednej fazy przy awaryjnym doziemieniu jednej z pozostałych (rys. 3).



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu rażenia przy dotknięciu jednej fazy w sieci trójfazowej izolowanej, przy awaryjnym doziemieniu innej fazy

Fig. 3. Diagram of electric shock circuit by touch of one phase in 3-phase insulated network, under emergency electrical grounding of another phase

W fazie, w której nastąpiło przebicie izolacji i zwarcie metaliczne fazy do kadłuba, ewentualnie do jakiegokolwiek uziomionego elementu, zostają wyłączone z układu impedancje izolacji, jak i celowo włączonych urządzeń. Pozostaje w obwodzie jedynie impedancja uziomu i impedancja drogi prądowej w kadłubie. Mają one charakter wybitnie rezystancyjny. Przy założonym uproszczeniu, że $R_Z \ll Z$ zależność na napięcie rażenia przyjmuje postać:

$$U_r = \frac{\sqrt{3}U_f}{R_Z + R_{cz}} \cdot R_{cz} \quad (2)$$

gdzie R_Z – sumaryczna rezystancja uziomu.

Z porównania obu najczęściej występujących przypadków porażeniowych można wyciągnąć następujące wnioski:

- w przypadku pierwszym znaczącą rolę odgrywa stan impedancji izolacji, gdy w drugim wpływ impedancji jest znikomy;
- napięcie dotykowe, pod którym znajdzie się człowiek, dotykając jednej z faz, w przypadku drugim jest napięciem międzyfazowym, co stwarza znacznie większe zagrożenie porażeniowe, gdyż w obwodzie rażenia znika wpływ impedancji izolacji na prąd rażenia;
- warunki rażenia w przypadku drugim stają się warunkami rażenia panującymi w układach z uziemionymi punktami neutralnymi;
- ograniczenie prądu rażenia w przypadku drugim jest możliwe tylko za pomocą urządzeń ograniczających czas rażenia, podczas gdy w pierwszym dbanie o dobry stan izolacji i jak najmniejszą pojemność sieci prowadzi do ograniczenia prądu.

Ze względu na wyżej wymienione czynniki wpływające na bezpieczeństwo porażenia w sieci trójfazowej prądu przemiennego z izolowanym punktem neutralnym na statku konieczne jest niedopuszczanie do długotrwałej pracy układu energoelektrycznego z doziemieniem jednofazowym. Nieodzownym elementem ochrony staje się kontrola stanu izolacji z sygnalizacją akustyczną i świetlną obniżenia się poziomu rezystancji izolacji. Zabezpiecza ona także przed możliwością powstawania zwarć podwójnych, o ile pojedyncze zwarcia będą dostatecznie szybko likwidowane [PN-E-05009-41:1992; PN-HD 60364-4-41:2009].

7. POJEMNOŚĆ SIECI KABLOWEJ NA STATKU

Każdą linię elektryczną można opisać parametrami, które są rozłożone w sposób ciągły na całej jej długości. Parametry wzdłużne stanowią rezystancja R i indukcyjność L , a poprzeczne – pojemność C , konduktancja G . Linię elektryczną można rozpatrywać jako złożoną z pewnej liczby odcinków o długości jednostkowej Δx , dlatego często rezystancję, indukcyjność, pojemność linii określa się wartościami przypadającymi na jednostkę długości linii.

Wypadkowa pojemność sieci kablowej na statku jest sumą tzw. pojemności rozłożonych i pojemności skupionych. O wartości pojemności rozłożonej decydują pojemności wszelkich linii energetycznych, natomiast pojemności skupione wynikają ze stosowania filtrów przeciwzakłóceńowych.

Na statkach o dużej rozległości, długości linii kablowej i znacznej liczbie stosowanych kondensatorów wypadkowa pojemność sieci elektroenergetycznej względem kadłuba dochodzi do dziesiątków mikrofaradów.

Pojemność sieci okrętowej jest zmienna w czasie i wynika z charakterystyki pracy obiektu. Oprócz wymienionych już czynników na wartość pojemności

wpływają ponadto m.in.: rodzaj izolacji sieci i urządzeń, wilgotność, liczba jednocześnie włączonych odbiorników, rodzaj odbiorników, konstrukcja kabli, pora roku, liczba kabli będących pod napięciem, pora dnia, reżim pracy statku.

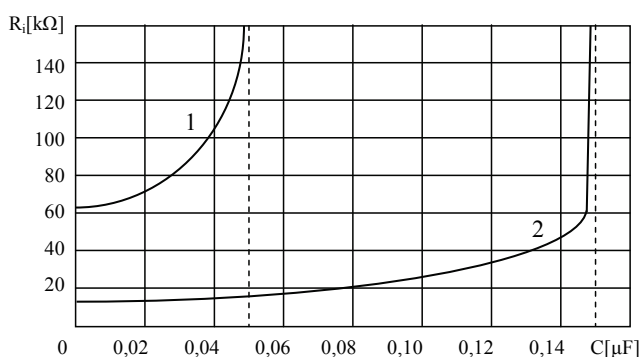
Rozkład pojemności przypadających na każdą z faz sieci trójfazowej izolowanej nie jest równomierny. Asymetria wynika ze schematu zasilania odbiorników i ich rodzaju, tym samym powstaje asymetria napięć rażenia między fazą a kadłubem, co zwiększa zagrożenie porażeniowe nawet dla małych pojemności sieci.

Analiza wpływu pojemności na bezpieczeństwo porażeniowe ludzi poprzez obliczenie prądu rażeniowego na podstawie wzoru (1), przeprowadzona dla typowego przypadku porażenia (dotknięcie części czynnej jednej fazy), wykazała, że prąd płynący przez człowieka w układzie z izolowanym punktem neutralnym zależy od wartości napięcia fazowego U_F , rezystancji człowieka R_{cz} , rezystancji izolacji każdej fazy do ziemi R_i oraz pojemności każdej z faz do ziemi C .

Dla pojemności fazowej sieci przekraczającej wartości $0,5 \mu\text{F}$, prądy rażenia człowieka przekraczają granice samouwolnienia (około 10 mA) dla zastępczej rezystancji człowieka przyjętej w granicach $1\text{--}5 \text{ k}\Omega$ [Siadaczka 1985].

Prąd rażenia jest do pewnej określonej wartości pojemności zależny od rezystancji izolacji. Wartość tę przyjęto nazywać pojemnością krytyczną C_{kryt} i wynosi ona około $0,14 \mu\text{F}$. Charakterystyczne jest to, że dla $C < C_{kryt}$ zwiększanie rezystancji izolacji powoduje obniżenie prądu rażenia. Dla $C > C_{kryt}$ zwiększenie rezystancji izolacji nie obniża prądu rażenia. Minimalną wartość prądu rażenia otrzymuje się dla $C = 0$ i wynosi:

$$I_{rmin} = \frac{3U_f}{\sqrt{9R_{cz}^2 + R_i(R_i + 6R_{cz})}} \quad (3)$$



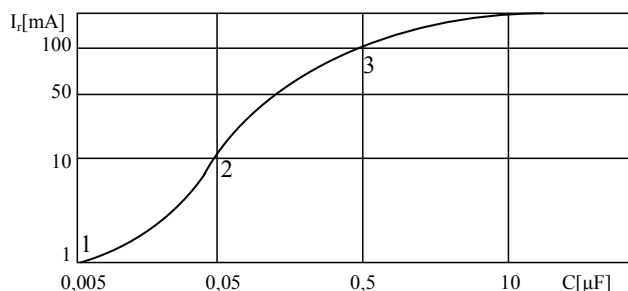
Rys. 4. Zależność rezystancji izolacji od pojemności fazowej sieci przy stałym I_r . Krzywa 1 $I_r = 10 \text{ mA}$, krzywa 2 $I_r = 30 \text{ mA}$

Fig. 4. Dependence of the insulation resistance on the phase capacitance of the grid network at constant I_r . Curve 1 $I_r = 10 \text{ mA}$, curve 2 $I_r = 30 \text{ mA}$

Trzeba zauważyć, że dla krzywej 1 (rys. 4) przy pojemności fazowej sieci $C > 0,005 \mu\text{F}$ prąd przepływający przez ciało człowieka nie będzie się zmieniał pomimo zmian rezystancji izolacji. Analogiczna sytuacja występuje dla krzywej 2. Wyżej przedstawione przebiegi narysowano, opierając się na przekształconym wyrażeniu (1), którego postać użyta do obliczeń wygląda następująco:

$$R_i = \frac{3R_{cz} \left(\sqrt{1 + a(a - 9aR_{cz}^2 \omega^2 C^2)} - 1 \right)}{1 - 9aR_{cz}^2 \omega^2 C^2} \quad (4)$$

gdzie $a = \left(\frac{U_f}{R_{cz} I_r} \right)^2 - 1$



Rys. 5. Zależność prądu rażenia przepływającego przez człowieka od pojemności sieci przy $R_i = 500 \text{ k}\Omega$; 1 – granica prądów nieodczuwalnych, 2 – granica prądów samouwolnienia, 3 – granica prądów fibrylacyjnych

Fig. 5. Dependence of electric shock current on the grid network capacity at $R_i = 500 \text{ k}\Omega$; 1 – limit of imperceptible current, 2 – limit of self-release current, 3 – limit of fibrillation current

Przyjmując graniczny prąd samouwolnienia człowieka porażonego na poziomie 10 mA przy założeniu średniej pojemności fazowej sieci IT rzędu $0,2 \mu\text{F}/\text{km}$, długość sieci bezpiecznej może maksymalnie wynosić 250 m. Ponadto z powyższych rozważań prawdziwe jest stwierdzenie, iż rozpoczynając od wartości pojemności fazowej sieci $C_{kryt.}$, wzrost rezystancji izolacji układu trójfazowego z izolowanym punktem neutralnym nie może być jedynym środkiem zapewniającym bezpieczeństwo człowieka. Jest to bardzo ważny wniosek, z praktyki bowiem wiadomo, że najczęściej zwraca się szczególną uwagę na poprawny stan izolacji sieci elektrycznej na statku, twierdząc, że wystarczy to do bezpiecznej obsługi urządzeń. Niestety, jest to tylko jeden z warunków takiej obsługi [PN-HD 60364-1:2010].

8. ZJAWISKA TOWARZYSZĄCE PRZEPLYWOWI PRĄDÓW UPŁYWNOSCIOWYCH MIĘDZY SIECIĄ A KADŁUBEM

Zjawiska, które mają miejsce w momencie powstania dużych prądów upływnościowych do kadłuba, wpływają na ogólne bezpieczeństwo jednostki i ludzi na niej się znajdujących. W związku z tym celowe wydaje się przedstawienie tego zagadnienia, mimo że nie jest ono bezpośrednio związane z bezpieczeństwem porażeniowym ludzi na statku.

Problem bezpieczeństwa pożarowego pojawia się w momencie zdania sobie sprawy, że przy zwarciach jednofazowych w sieci izolowanej może powstać łuk elektryczny. Na powstanie łuku elektrycznego podczas przepływu prądu zwarciowego doziemienia wpływa wiele czynników, z których najważniejsze są: czas przepływu prądu, cechy fizykochemiczne otoczenia oraz wielkość wyzwolonej energii cieplnej.

W normalnie spotykanych układach izolowanych prąd doziemienia jednofazowego może się wahać w granicach 0,1–1 A, co prawie całkowicie eliminuje możliwość przerwania takiego łuku (prądu) przez standardowe zabezpieczenia topikowe i nadprądowe. Stwierdzenie takiego doziemienia, szczególnie wtedy, gdy na statku stosowane są układy automatycznej kontroli stanu izolacji, nie przedstawia trudności. Pojawiają się one wtedy, gdy przychodzi elektrykowi zlokalizować doziemienie. Poszukiwania miejsca zwarcia trwają niekiedy dość długo i w tym momencie znaczącą rolę w ocenie zagrożenia pożarowego zaczyna grać czas. Energia cieplna wyzwolona podczas przepływu nawet małego prądu, ale w długim czasie, najczęściej znacznie przekracza energię zapłonu większości ciał stałych i może być decydującym czynnikiem w powstaniu pożaru.

Na statkach, na których pojemność fazowa izolacji osiąga duże wartości (rzędu dziesiątków μF), sytuacja ta jeszcze bardziej się komplikuje [Musiał 2012].

Przy założeniu, że prądy płynące do kadłuba poprzez rezystancję izolacji R_i są niewielkie, można obliczyć wartość prądów upływnościowych w zależności tylko od pojemności sieci:

- w stanie normalnej pracy układu energetycznego dla jednej fazy prąd ten wyniesie:

$$I_c = \frac{U_f}{X_C} = U_f 2\pi f C \quad (5)$$

- w stanie doziemienia układu energetycznego poprzez jedną fazę:

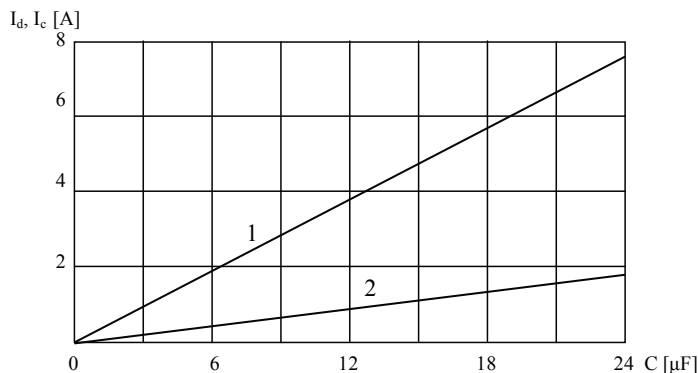
$$I_d = \frac{\sqrt{3}U_f}{X_C} = \sqrt{3}U_f 2\pi f C \quad (6)$$

gdzie:

- X_C – reaktancja pojemnościowa jednej fazy,
- I_c – prąd upływnościowy jednej fazy w stanie normalnej pracy,
- I_d – prąd zwarcia doziemnego jednofazowego,
- C – pojemność fazowa izolacji.

Podstawiając do wzorów (5), (6) wartości napięcia dla sieci 380 V, tj. $U_f = 220$ V i typowe pojemności C z przedziału $0,5 < C < 20$ μF , przy $f = 50$ Hz, otrzymano wykresy wartości prądów I_C , I_d w funkcji pojemności (rys. 6).

Z wykresu widać, że prądy I_C i I_d są proporcjonalne do pojemności C . Dla pojemności $C = 20$ μF odczytany prąd zwarcia doziemnego jednofazowego osiąga wartość około 6 A. Jeszcze większe wartości prądów uzyskuje się dla wyższych pojemności.



Rys. 6. Wartość prądu doziemienia od jednej fazy I_d (linia 1) oraz prądu upływnościowego fazowego I_c (linia 2) w zależności od pojemności

Fig. 6. Value of grounding current to one phase I_d (line 1) and electric phase leakage current I_c (line 2) in dependence on capacity

Wartość energii cieplnej, która wydzieliliby się podczas palenia łuku, w tych warunkach staje się już naprawdę niebezpieczna. Stosowanymi obecnie skutecznymi środkami ochrony przed pożarem, spowodowanym prądami upływnościowymi, są systematyczna (ciągła) kontrola stanu izolacji i odpowiednie materiały izolacyjne odporne na działanie temperatury [PN-HD 60364-4-41:2009; PN-HD 60364-4-43:2012; PN-HD 60364-4-444:2012].

9. BEZPIECZEŃSTWO PORAŻENIOWE W UKŁADZIE IT – WNIOSKI

Analiza parametrów, występujących w sieciach statkowych trójfazowych z izolowanym punktem neutralnym, pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków dotyczących bezpieczeństwa porażeniowego ludzi:

- na nowoczesnych statkach o rozległej i uzbrojonej elektronicznie sieci elektrycznej istnieją duże pojemności względem kadłuba, których wartości są w większości przypadków wyższe od tzw. pojemności krytycznej;

- duże pojemności fazowe względem kadłuba są przyczyną istnienia pojemnościowych prądów rażenia przy dotyku przez człowieka przewodu jednej z faz;
- na statkach, na których wartości pojemności fazowej są większe od krytycznej, dobry stan izolacji (wysoka wartość rezystancji izolacji) i środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej i dodatkowej nie są w stanie zapewnić odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa porażeniowego;
- przyczyną istnienia tak dużych pojemności są w chwili obecnej powszechnie stosowane układy energoelektroniczne, mające charakter pojemności skupionych;
- pojemności fazowe sieci oświetleniowej są znacznie większe od pojemności innych sieci;
- w sieciach izolowanych na większości statków istnieje asymetria pojemności fazowych, która, zwiększając fazowe napięcie dotyku, pogarsza bezpieczeństwo porażeniowe;
- na statkach z siecią izolowaną, przy dobrym stanie izolacji i pojemności fazowej mniejszej od wartości krytycznej, środki ochrony przeciwporażeniowej podstawowej i dodatkowej, określone w przepisach towarzystw klasyfikacyjnych, są wystarczającym zabezpieczeniem przed porażeniem.

Reasumując, należy stwierdzić, że sieć okrętowa trójfazowa z izolowanym punktem neutralnym pomimo wysokiego poziomu rezystancji izolacji nie zawsze jest w stanie zapewnić odpowiedni poziom bezpieczeństwa porażeniowego, bez zastosowania odpowiednich środków.

Z tego powodu można się zastanawiać nad problemem wprowadzenia na jednostki układów sieci elektroenergetycznych uziemionych, dopuszczonych przepisami towarzystw klasyfikacyjnych, jednakże takie posunięcie należałoby odpowiednio przeanalizować.

Ograniczając się do podstawowych problemów eksploatacyjnych, kryteria wyboru typu sieci można przedstawić następująco:

- zachowanie maksymalnych warunków bezpieczeństwa;
- zachowanie maksymalnych pewności ruchu;
- ograniczenie do minimum kosztów inwestycyjnych.

To prawda, że zarówno w sieci izolowanej, jak i uziemionej należy spodziewać się prądów rażenia o wartościach niebezpiecznych dla życia. W tym momencie zastanowić się jednak trzeba nad sposobami zmniejszenia tych prądów w każdej z tych sieci. W sieci izolowanej można to zrobić, praktycznie stosując jakikolwiek ze sposobów kompensacji pojemności sieci (statycznej, dynamicznej) za pomocą dławików o zmiennej indukcyjności oraz wyłączników przeciwporażeniowych (w praktycznym rozwiązaniu wyłączników różnicowo-prądowych).

W sieci uziemionej ten sposób jest oczywiście niewykonalny. W obu zaś systemach sieci można próbować stosować urządzenia ograniczające czas porażenia

(włączniki przeciwporażeniowe). Już z tych dwóch przykładów widać, że wachlarz środków ochrony przeciwporażeniowej jest nieco szerszy dla sieci izolowanej (włączając w to tradycyjne środki ochrony podstawowej i dodatkowej).

Omawiając kryterium pewności ruchowej, można przyjąć założenie, że uda się skonstruować układ uziemiony, który dzięki odpowiedniej liczbie obwodów rezerwowych i dobrej selektywności zabezpieczeń, będzie równoważny lub nawet lepszy pod tym względem od układu izolowanego. Są ku temu możliwości techniczne, ale trzeba zwrócić uwagę na koszty inwestycyjne. Ekonomia wykonania może okazać się stroną decydującą o tym, czy będzie opłacało się stworzyć taki układ uziemiony czy nie.

Co wynika z przedstawionych rozważań? Można dyskutować nad zagrożeniami porażeniowymi w obu układach, lecz ze względu na mniejsze koszty inwestycyjne i pewność ruchową (osiągniętą mniejszym nakładem kosztów) układ izolowany zapewnia niewątpliwie większą dyspozycyjność energetyczną na statku.

Z teorii popartej wieloletnimi badaniami, dotyczącymi czynników, mających bezpośredni wpływ na przebieg porażenia prądem elektrycznym, wynika, że dwa z nich mają największe znaczenie dla końcowego efektu porażenia. Są to natężenie prądu oraz czas jego przepływu przez ciało człowieka. Ograniczenie ich wartości do poziomów bezpiecznych dla życia ludzkiego jest podstawowym zadaniem dla wszystkich środków ochrony przed porażeniem. Zdeterminowanie jednak (przez wymienione wyżej czynniki) kierunków działania, zmierzających do skutecznego wyeliminowania prądów pojemnościowych w sieci trójfazowej jako istotnego elementu zagrożeń porażeniowych na statku, prowadzi do projektowania i konstruowania urządzeń i układów, mających za cel ograniczenie wartości prądu rażenia, wynikające z faktu istnienia pojemności fazowych sieci oraz skrócenie do minimum czasu przepływu prądu rażenia poprzez ciało człowieka.

Sprawa doboru środków ochrony przeciwporażeniowych wymaga indywidualnego podejścia do każdego nowo projektowanego systemu okrętowego ze względu na ewentualne specjalne uwarunkowania, wynikające ze specyfiki pracy systemu elektroenergetycznego.

LITERATURA

- Majewski, J., 2000, *Eksploatacja i diagnostyka elektrycznych urządzeń okrętowych*, WU WSM Gdynia.
- Mindykowski, J., 2001, *Ocena jakości energii elektrycznej w systemach okrętowych z układami przekształtnikowymi*, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk.
- Musiał, E., 2012, *Ochrona od porażen w instalacjach niskiego napięcia w świetle aktualnych przepisów i norm. Współdziałanie dwóch różnych układów, w tym TT i TN*, Pomorsko-Kujawska Izba Inżynierów Budownictwa, Bydgoszcz – Toruń – Włocławek, 26–27 listopada.
- N SEP-E-001:2003, *Sieci elektroenergetyczne niskiego napięcia. Ochrona przeciwporażeniowa*.

- PN-E-05009-41:1992, *Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona zapewniająca bezpieczeństwo. Ochrona przeciwporażeniowa.*
- PN-HD 60364-4-41:2009, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-41: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed porażeniem elektrycznym.*
- PN-HD 60364-1:2010, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część:1 Wymagania podstawowe, ustalanie ogólnych charakterystyk, definicje.*
- PN-HD 60364-4-43:2012, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-43: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed prądem przetężeniowym.*
- PN-HD 60364-4-444:2012, *Instalacje elektryczne niskiego napięcia – Część 4-444: Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa – Ochrona przed zakłóceniami napięciowymi i zaburzeniami elektromagnetycznymi.*
- PRS, 2017, *Przepisy klasyfikacji i budowy statków morskich. Instalacje elektryczne i systemy sterowania*, cz. VII, Gdańsk.
- Siadaczka, K., 1985, *Zagrożenie porażeniowe i ochrona ludzi przed porażeniem w czasie eksploatacji statku*, praca doktorska niepublikowana, WSM, Gdynia.