

MACIEJ KOZIERKIEWICZ\*

ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE STOSOWANIA  
KONDENSATORÓW WŁĄCZANYCH POMIĘDZY  
OBWODY ZASILANE NAPIĘCIEM SIECIOWYM  
I KAROSERIĘ TROLEJBUSU W ASPEKTCIE  
BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJITHE PROBLEM CONCERNING CAPACITORS CONNECTED  
TO CIRCUITS FED FROM OVERHEAD CONTACT SYSTEM  
AND TO VEHICLE BODY IN RESPECT TO SAFETY  
SERVICE OF TROLLEYBUSES

## Streszczenie

W artykule przedstawiono zgadnienie związane z bezpieczeństwem eksploatacji pojazdów elektrycznych z nie uszynionym nadwoziem wyposażonych w filtry pojemnościowe EMC zasilanych zarówno z sieci trakcyjnej izolowanej, jak i sieci trakcyjnej z uziemionym jednym z biegunów. W celu przeprowadzenia analizy zagrożeń opracowany został uproszczony model teoretyczny, umożliwiający określenie parametrów impulsów prądowych wyrównawczych jakie mogą przepływać przez człowieka stojącego na powierzchni drogi i dotykającego jednocześnie przewodzące części nadwozia trolejbusu oraz omówione zostały warunki w jakich może do ww. przepływów wyrównawczych dochodzić. Rozpatrzone zostały zagrożenia związane zarówno z przepływem tzw. impulsów prądowych krótkotrwałych o czasie trwania do 10 ms, jak i z przepływem impulsów prądowych o czasie trwania większym niż 10 ms.

*Słowa kluczowe: trakcja trolejbusowa, pojazd trakcyjny, pojemność kondensatorów EMC, prądy wyrównawcze, nieuszynione nadwozie*

## Abstract

The paper concerns the problem of current impulses that can flow from trolleybus circuits fed from overhead contact system (OCS) to vehicle body via EMC capacitors and through the person standing on the road level and touching simultaneously trolleybus body in some working condition of insulated or earthed OCS with typical rated voltage of 600V or 750V. The calculation shows that there is no risk of triggering ventricular fibrillation by the short time current impulses of time duration less than  $T_i = 10$  ms regardless of EMC capacitance. From the other hand the risk of triggering ventricular fibrillation by current impulses of time duration  $T_i > 10$  ms exists only in the case that entire capacitance of trolleybus circuits fed from OCS in respect to the vehicle body goes beyond the limit of  $C_w \approx 40 \mu\text{F}$  for OCS rated voltage of 750V and  $C_w \approx 75 \mu\text{F}$  for OCS rated voltage of 600V. The value of  $C_w$ , mentioned above are much higher than the capacitance of typical EMC filter used in trolleybus vehicle, so generally there is no risk of triggering ventricular fibrillation. Nevertheless, it's proposed to limit the value of  $C_w$  to the level of  $0.6 \mu\text{F}$  for rated voltage of 750V and  $0.94 \mu\text{F}$  for rated voltage of 600V that guarantee that no strong sensation or strong reaction occurs for the person standing on the road surface and touching vehicle body in the moment when discharge current flows.

*Keywords: trolleybus, traction vehicle, capacitance of the EMC capacitors, compensatory currents, unearthed vehicle body*

\* Dr inż. Maciej Kozierkiewicz, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Mieszkalnictwa, Zakład Komunikacji Miejskiej, Warszawa.

## 1. Wstęp

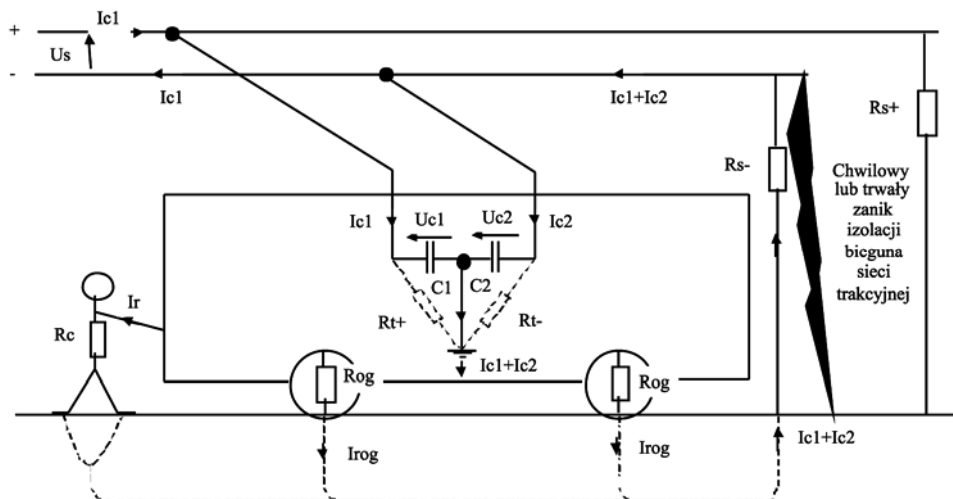
Urządzenia energoelektroniczne stosowane we współczesnych trolejbusach, podobnie jak w pojazdach szynowych trakcji elektrycznej, stanowią z reguły źródło zaburzeń elektromagnetycznych EMC emitowanych do otoczenia. W celu ograniczenia tych zaburzeń instalowane są zazwyczaj dodatkowe filtry EMC, zawierające m.in. elementy pojemnościowe włączane pomiędzy instalację zasilaną napięciem sieciowym a nadwozie pojazdu. W odróżnieniu od pojazdów szynowych, w których nadwozie jest połączone odpowiednimi przewodami ochronnymi z siecią szynową powrotną o kontrolowanym bezpiecznym potencjale względem ziemi, karoseria trolejbusu nie jest uziemiona i w związku z tym ładunek zgromadzony w elementach pojemnościowych włączonych pomiędzy obwody zasilane napięciem sieciowym a nadwozie może w pewnych określonych warunkach przepływać poprzez karoserię i opony, a zatem także przez człowieka stojącego na ziemi, który w chwili przepływu prądu wyrównawczego będzie dotykał karoserii pojazdu. W chwili obecnej brakuje jakichkolwiek wytycznych w normach kolejowych odnośnie do dopuszczalnych wartości wymienionych pojemności dla przypadku pojazdów zasilanych z sieci trakcyjnej z nieuziemionym (nieuszynionym) nadwoziem. Projekt europejskiej specyfikacji technicznej [5], określający zasady konstrukcji i eksploatacji urządzeń elektrycznych stosowanych w trolejbusach, również nie porusza tego zagadnienia. Z tego też powodu wydaje się celowe poznanie istoty poruszanego zagadnienia i dokonanie próby oceny zjawiska pod względem ewentualnych zagrożeń, o ile takie występują.

## 2. Określenie warunków, w których powstają przepływy prądów wyrównawczych z karoserii do ziemi

W trakcji trolejbusowej stosowany jest zarówno system zasilania z tzw. siecią izolowaną w obu biegunach od ziemi, jak i klasyczny system zasilania z uziemioną na podstacji szyną minusową. Warto zauważyć, że w przypadku sieci skutecznie izolowanej uszkodzenie izolacji  $R_{t+}$  lub  $R_{t-}$  instalacji sieciowej pokładowej trolejbusu nie powoduje zwykle zagrożenia porażeniem, dlatego system izolowany jest traktowany jako bezpieczniejszy i obecnie jest częściej stosowany od systemu klasycznego np. z uziemionym biegunem minusowym na podstacji ( $R_{s-} = 0$  dla systemu uziemionego). Z reguły dopuszcza się okresowe funkcjonowanie systemu izolowanego z doziemionym biegunem minusowym lub plusowym. Zasilanie trolejbusu z dobrym stanem izolacji dielektrycznej  $R_{t+}$  i  $R_{t-}$  z sieci, w którym jeden z biegunów jest trwale lub awaryjnie uziemiony nie powinno stwarzać żadnego zagrożenia, tym niemniej włączenie dodatkowych kondensatorów pomiędzy biegun plusowy i minusowy a masę karoserii pojazdu powoduje mostkowanie elementami pojemnościowymi izolacji dielektrycznej trolejbusu  $R_{t+}$  i  $R_{t-}$ . W stanach nieustalonych pracy sieci zasilającej może zatem dochodzić do przepływu prądów wyrównawczych, związanych z ładowaniem lub rozładowaniem kondensatorów zastosowanych np. w filtrach EMC. Zjawisko przepływu prądów wyrównawczych, występujące w chwili uszkodzenia izolacji bieguna sieci trakcyjnej, zostało zilustrowane na rys. 1. Przepływ prądu z karoserii do ziemi jest możliwy w następujących sytuacjach:

1. W przypadku sieci izolowanej w obu biegunach od ziemi do przepływu prądu wyrównawczego dojdzie w chwili wystąpienia uszkodzenia lub chwilowego zaniku izolacji któregoś z biegunów sieci trakcyjnej.

2. W przypadku sieci z jednym biegunem uziemionym na podstacji lub w przypadku sieci izolowanej pracującej w stanie awaryjnym, tj. w warunkach uszkodzenia izolacji jednego z biegunów, do przepływów prądów wyrównawczych będzie dochodzić w chwilach występowania zmian napięcia  $\Delta U_s$  w sieci trakcyjnej.



Rys. 1. Rysunek poglądowy przedstawiający drogę przepływu chwilowych prądów wyrównawczych, mogących występować po zaniku izolacji w biegunie minusowym sieci trakcyjnej pracującej normalnie jako sieć izolowana:  $C_1, C_2$  – pojemności instalacji zasilanej napięciem sieciowym względem karoserii;  $R_c$  – rezystancja ciała człowieka stojącego na ziemi i dotykającego ręką karoserii pojazdu;  $R_{og}$  – rezystancja ogumienia;  $R_{s+}, R_{s-}$  – rezystancje izolacji bieguna (+) i (-) sieci trakcyjnej;  $R_{t+}, R_{t-}$  – rezystancje izolacji bieguna (+) i (-) instalacji sieciowej pojazdu względem karoserii;  $U_s$  – napięcie zasilania;  $I_{C1}, I_{C2}$  – prądy ładowania lub rozładowania pojemności  $C_1$  i  $C_2$ ;  $I_R$  – krótkotrwały prąd rażenia;  $I_{rog}$  – prądy spływające przez ogumienie do ziemi

Fig. 1. Fig. 1. General circuit diagram showing the paths of the instantaneous currents flow that can occur in the case of sudden loss of the dielectric insulation in the negative pole of the insulated overhead contact system (OCS):  $C_1, C_2$  – capacitances of the trolleybus circuits fed from OCS in respect to the vehicle body,  $R_c$  – human's body resistance,  $R_{og}$  – tyre's resistance,  $R_{s+}, R_{s-}$  – resistances of the OCS poles,  $R_{t+}, R_{t-}$  – resistances of the trolleybus circuits fed from OCS in respect to the vehicle body,  $U_s$  – voltage of the OCS,  $I_{C1}, I_{C2}$  – discharge or charge currents of the  $C_1, C_2$  capacitances,  $I_R$  – current that flows via human body,  $I_{rog}$  – currents that flow via vehicle tyres

### 3. Wyznaczenie przebiegu czasowego prądów wyrównawczych na podstawie uproszczonego modelu teoretycznego

W celu obliczenia przebiegu prądu wyrównawczego zastosowano uproszczony model przedstawiony na rys. 2, przyjmując następujące założenia:

- a karoserii trolejbusu względem ziemi wynosi z reguły od 30 do 200 k $\Omega$  (wg pomiarów przeprowadzonych przez DPO Ostrava), założono, że cały prąd wyrównawczy przepływa przez człowieka,

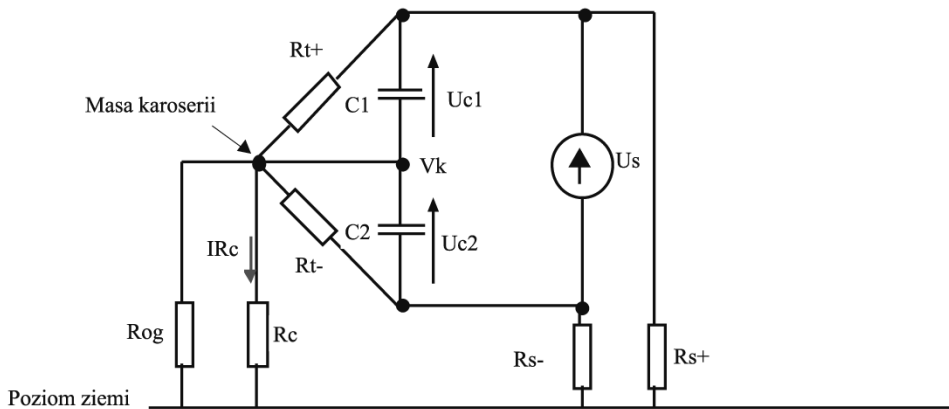
- w przypadku wystąpienia doziemienia sieci trakcyjnej izolowanej, w chwili czasowej poprzedzającej wystąpienie uszkodzenia, rezystancje izolacji biegunów (+) i (-) instalacji sieciowej trolejbusu względem karoserii są równe  $R_{t+} = R_{t-} = R_t$  i jednocześnie  $R_t \gg R_{og}$ ,
- w przypadku wystąpienia skokowej zmiany napięcia o wartość  $\Delta U_s$  w sieci trakcyjnej uziemionej, ładowanie kondensatorów  $C_1, C_2$  odbywa się impulsem prądowym Dirraca o nieskończenie krótkim czasie trwania.

Biorąc pod uwagę przedstawione założenia, schematy obwodów, na podstawie których można wyznaczyć przebiegi prądów wyrównawczych dla wymienionych w pkt. 1 obu sytuacji, upraszczają się do postaci pokazanych na rys. 3 i rys. 4. Przy założeniu, że  $R_{t+} = R_{t-} = R_t$ , potencjał  $V_k$  karoserii względem ziemi oraz napięcia  $U_{C1}$  i  $U_{C2}$  na kondensatorach  $C_1, C_2$  są dla sytemu izolowanego określone następującymi zależnościami:

$$V_k = U_s \frac{R_{s+} - R_{s-}}{2 \left( R_{s+} + R_{s-} + \frac{R_{s+} R_{s-}}{R_{og}} \right) + \frac{R_t}{R_{og}} (R_{s+} + R_{s-})} \quad (1)$$

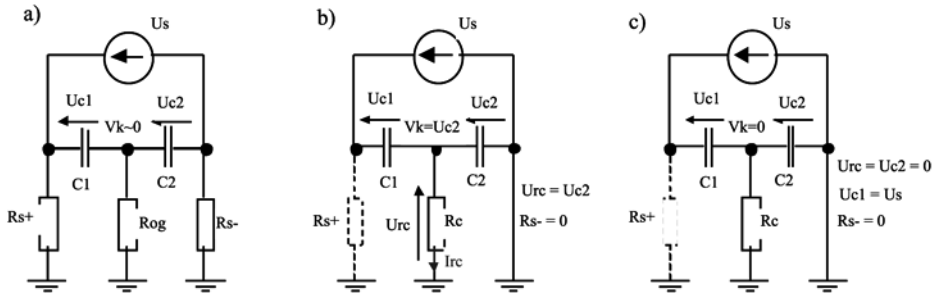
$$U_{C2} = U_s \left[ 1 - \frac{R_{s+}}{R_{s+} + R_{s-}} + \frac{R_{s+} - R_{s-}}{2 \left[ R_{og} (R_{s+} + R_{s-}) + R_{s+} R_{s-} \right] + R_t (R_{s+} + R_{s-})} \left( R_{og} + \frac{R_{s+} R_{s-}}{R_{s+} + R_{s-}} \right) \right] \quad (2)$$

$$U_{C1} = U_s - U_{C2} \quad (3)$$



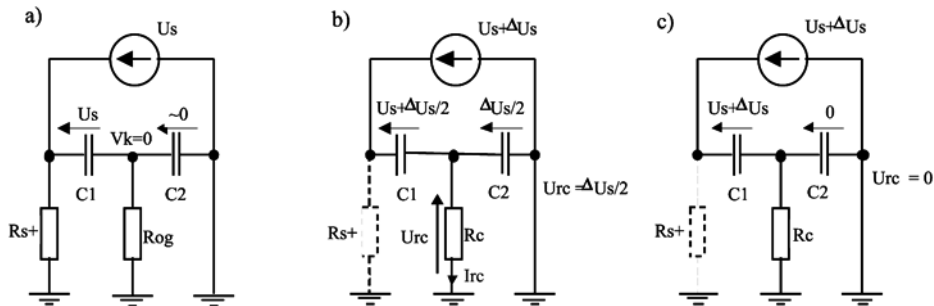
Rys. 2. Model uproszczony do wyznaczania przebiegu czasowego chwilowego prądu upływu z masy karoserii trolejbusu do ziemi

Fig. 2. Simplified circuit model for calculation of the instantaneous current flow from vehicle body to the ground



Rys. 3. Przepływ prądu wyrównawczego w chwili wystąpienia uszkodzenia izolacji bieguna sieci trakcyjnej izolowanej: a) sytuacja przed wystąpieniem uszkodzenia izolacji  $R_{s-}$  sieci trakcyjnej; b) chwila czasowa  $t = 0$ , w której dochodzi do zaniku izolacji bieguna sieci trakcyjnej  $R_{s-} = 0$ ; c) sytuacja po zaniku przepływu prądu wyrównawczego

Fig. 3. Flow of the compensatory current in the moment of dielectric insulation failure in the negative pole of the insulated OCS system: a) situation before failure; b) time moment  $t = 0$  when failure of the insulation  $R_{s-} = 0$  occurs; c) situation after decay of the compensatory current flow



Rys. 4. Przepływ prądu wyrównawczego w chwili wystąpienia skokowej zmiany napięcia  $\Delta U_s$  w sieci trakcyjnej z uziemionym biegunem minusowym: a) sytuacja przed wystąpieniem skoku napięcia; b) chwila czasowa  $t = 0$ , w której dochodzi do skokowej zmiany napięcia zasilania z poziomu  $U_s$  do poziomu  $U_s + \Delta U_s$ ; c) sytuacja po zaniku przepływu prądu wyrównawczego

Fig. 4. Flow of the compensatory current in the moment of sudden voltage change  $\Delta U_s$  in the OCS system with negative pole grounded: a) situation before voltage jump  $\Delta U_s$  in the OCS occurs; b) time moment  $t = 0$  when OCS voltage changes from the level  $U_s$  to the level  $U_s + \Delta U_s$ ; c) situation after decay of the compensatory current flow

Można wykazać na podstawie (1), że potencjał karoserii  $V_k$  względem ziemi pojazdu zasilanego z sieci izolowanej będzie dla  $R_t \gg R_{og}$  zawsze bliski zeru. Dla typowego stanu pracy sieci trakcyjnej izolowanej rezystancje izolacji sieci trakcyjnej są z reguły równe  $R_{s+}$ ,  $R_{s-}$ , co oznacza, biorąc pod uwagę zależność (2), że napięcia na kondensatorach  $C_1$  i  $C_2$  są także sobie równe i wynoszą  $U_{C1} = U_{C2} = U_s/2$ . Tym niemniej pojawienie się różnic w wartościach rezystancji  $R_{s+}$  i  $R_{s-}$  będzie powodowało tzw. pływanie potencjału biegunów sieci trakcyjnej względem ziemi. I tak np. w sytuacji, gdy  $R_{s-} \gg R_{s+}$ , kondensator  $C_2$  będzie naładowany do napięcia o wartości  $U_{C2} \approx U_s$ , co oznacza tym samym, że  $U_{C1} \approx 0$ . Jeśli z jakiejś przyczyny nastąpi trwały lub chwilowy zanik izolacji bieguna (-) sieci trakcyjnej, tj.  $R_{s-} = 0$  (rys. 3b), to na karoserii pojazdu pojawi się napięcie o wartości  $V_k = U_s/2$ , w przypadku gdy w chwili

poprzedzającej doziemienie  $R_{s+} = R_s$  lub  $V_k \approx U_s$  w sytuacji, gdy przed doziemieniem bieguna (-)  $R_{s-} \gg R_{s+}$ . W takiej sytuacji nastąpi przepływ prądu wyrównawczego do ziemi poprzez ogumienie pojazdu lub przez człowieka stojącego na ziemi, który w chwili przeładowania będzie dotykał ręką karoserii. Zakończenie przepływu prądu nastąpi po pełnym rozładowaniu kondensatora  $C_2$  ( $U_{C2} \approx 0$ ) i jednoczesnym naładowaniu kondensatora  $C_1$  do napięcia  $U_{C1} = U_s$ . Biorąc pod uwagę przyjęte założenie, że rezystancja ciała człowieka spełnia warunek  $R_c \ll R_{og}$  oraz  $C = C_1 = C_2$ , przebieg czasowy prądu wyrównawczego przepływającego przez ciało człowieka można określić na podstawie prostego równania całkowego (4), którego rozwiązanie daje poszukiwany przebieg prądu rażeniowego (5):

$$-\frac{1}{2R_c C} \int_0^t dt = \int_{\frac{U_k(0)}{R_c}}^{i_R} \frac{di_R}{i_R} \quad (4)$$

$$i_R = \frac{U_{k(0)}}{R_c} \exp\left(-\frac{t}{2R_c C}\right) \quad (5)$$

gdzie:

$U_{k(0)}$  – jest wartością napięcia na karoserii względem ziemi w chwili  $t = 0$ , w której wystąpiło doziemienie sieci trakcyjnej.

W przypadku sieci trakcyjnej z uziemionym na podstacji biegunem minusowym zjawisko powstawania przepływu prądu wyrównawczego zostało przedstawione na rys. 4. Z uwagi na to, że  $R_{s-} = 0$  i jednocześnie  $R_t \gg R_{og}(R_c)$ , na podstawie (1) łatwo zauważyć, że napięcie na kondensatorze  $C_2$  jest bliskie zeru, natomiast kondensator  $C_1$  jest naładowany do napięcia  $U_{C1} = U_s$ . W chwili wystąpienia nagłego skoku napięcia w sieci zasilającej z poziomu  $U_s$  do poziomu  $U_s + \Delta U_s$  zakłada się, że kondensatory  $C_1$  i  $C_2$  ładują się impulsem prądowym Dirraca w czasie nieskończenie krótkim, przy czym z uwagi na to, że  $C = C_1 = C_2$  dopływający ładunek elektryczny  $Q$  wywołuje identyczny przyrost-skok napięcia na obu elementach pojemnościowych o wartość  $\Delta U_s/2$ . Oznacza to, że na kondensatorze  $C_1$  pojawi się napięcie  $U_s + \Delta U_s/2$ , natomiast na kondensatorze  $C_2$  pojawi się napięcie  $\Delta U_s/2$ , które jest jednocześnie napięciem wyniesionym na karoserię  $U_{k(0)} = \Delta U_s/2$ . W przypadku, gdy w tym samym czasie karoserii będzie dotykał człowiek stojący na ziemi, wystąpi przepływ prądu doziemnego opisanego także zależnością (5). W celu wyznaczenia konkretnego przebiegu  $i_R$  należy określić poziomy napięć  $U_s$  i wartości skoków napięcia  $\Delta U_s$ , jakie mogą występować w tzw. normalnych stanach pracy w sieci trakcyjnej. Dla wstępnych wyliczeń zaproponowano przyjęcie następujących wartości napięć:

- w przypadku wystąpienia przepływu prądu wyrównawczego spowodowanego nagłym doziemieniem sieci izolowanej proponuje się przyjąć poziom napięcia zasilania  $U_s$ , uwzględniający obecność pojazdów mogących hamować odzyskowo, określony w normie [3] jako  $U_{\max 2}$ , który może występować w czasie do 5 minut,
- w przypadku wystąpienia przepływu prądu wyrównawczego spowodowanego nagłym skokiem napięcia zasilania w sieci trakcyjnej z jednym biegunem uziemionym na podstacji lub sieci izolowanej pracującej w stanie awaryjnym, tj. w warunkach pełnego uszkodzenia izolacji jednego z biegunów, proponuje się, aby maksymalny skok napięcia w sieci  $\Delta U_s$  zdefiniować jako różnicę maksymalnego  $U_{\max 2}$  i minimalnego  $U_{\min 2}$  poziomu napięcia pracy sieci trakcyjnej, które są zdefiniowane w normie [3].

#### 4. Analiza zagrożeń

Problem zagrożenia porażeniowego krótkotrwałymi impulsami jednokierunkowymi prądu o czasie trwania do 10 ms i kształcie prostokątnym, sinusoidalnym lub mającym kształt prądu towarzyszącego rozładowaniu kondensatora został poruszony w specyfikacji technicznej [2]. Według [2] próg migotania komór serca zależy od kształtu, okresu trwania i amplitudy impulsu prądowego, fazy pracy serca występującej w chwili czasowej, w której dochodzi do rozpoczęcia przepływu impulsu, drogi przepływu przez ciało ludzkie oraz od fizjologicznych cech danej osoby. Eksperymenty na dużych zwierzętach wykazały, że:

- migotanie komór serca wywołane impulsami prądowymi o krótkim czasie trwania może wydarzyć się tylko wtedy, gdy impuls prądowy jest zbieżny z tzw. fazą nadwrażliwości mięśnia sercowego w cyklu kardiologicznym pracy serca,
- określona wartość ładunku QF zawartego w impulsie lub tzw. energii fibrylacji EF impulsu prądowego jednokierunkowego o czasie trwania krótszym niż 10 ms może wywoływać migotanie komór serca.

Oprócz ładunku i tzw. energii fibrylacji impulsu, ocenę zagrożenia przeprowadza się na podstawie określenia wartości skutecznej impulsu prądowego  $I_F$ . Wartość ładunku  $Q_F$ , energii fibrylacji  $E_F$  oraz wartość skuteczną  $I_F$  impulsu prądowego o czasie trwania do 10 ms definiuje się następująco:

$$Q_F = \int_0^{T_i} i_R(t) dt \quad (6)$$

$$E_F = \int_0^{T_i} i_R(t)^2 dt \quad (7)$$

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} i_R(t)^2 dt} \quad (8)$$

gdzie:

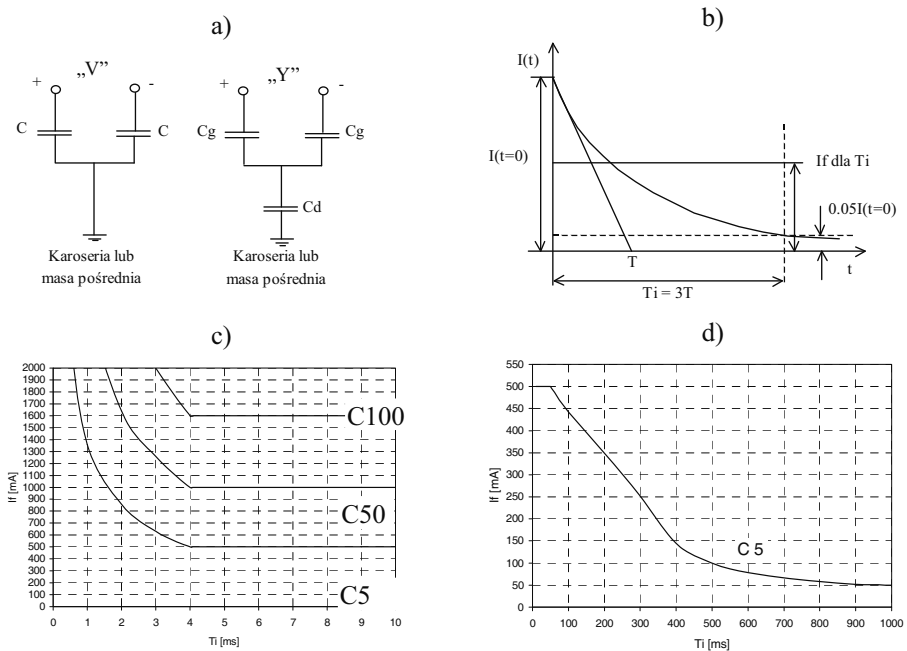
$T_i$  – jest czasem trwania impulsu prądowego zdefiniowanego w [2], przy czym dla przypadku rozładowania kondensatora czas  $T_i$  jest liczony od chwili  $t = 0$ , w której impuls startuje, do momentu, w którym wartość prądu osiąga 5% wartości początkowej impulsu, co odpowiada dokładnie trzykrotnej wartości stałej czasowej  $T$  – rozładowania kondensatora (lub układu kondensatorów).

W przypadku, gdy czas przepływu  $T_i$  impulsu prądowego (rozładowania kondensatora) przekracza 10 ms, specyfikacja [2] zaleca dokonywanie oceny zagrożenia na podstawie krzywej „wartość skuteczna prądu-czas przepływu impulsu  $T_i$ ”, która jest zbieżna z krzywą standardową określoną dla prądu przemiennego o częstotliwościach 15–100 Hz w specyfikacji [1]. W takiej sytuacji nie rozpatruje się wartości przepływającego ładunku lub tzw. energii fibrylacji, które dotyczą tylko impulsów prądowych o czasie trwania poniżej 10 ms. Biorąc pod uwagę przebieg czasowy prądu (5) oraz definicje (6), (7) i (8), w tabeli 1 podane zostały wzory umożliwiające obliczenie ładunku, energii fibrylacji oraz wartości skutecznej impulsu prądowego o czasie trwania  $T_i$ . Pojemność wypadkowa  $C_w$  układu kondensatorów, włączonych pomiędzy biegun plusowy i minusowy instalacji zasilanej napię-

ciem sieciowym a karoserię pojazdu, jest określona dla układu połączeń „V” i „Y” (rys. 5a) jako:

$$C_w = 2C \quad \text{dla "V"}, \quad C_w = \frac{2C_g C_d}{C_d + 2C_g} \quad \text{dla "Y"} \quad (9)$$

Mając na uwadze dyskusję przeprowadzoną w pkt. 2, napięcie  $U_{k(0)}$  może przyjmować następujące wartości:



Rys. 5: a) układ „V” i „Y” kondensatorów włączanych pomiędzy biegun plusowy i minusowy instalacji zasilanej napięciem sieciowym a karoserię lub masę pośrednią; b) definicja czasu  $T_i$  rozładowania kondensatora; c) wartości skuteczne krótkotrwałych impulsów prądowych w funkcji trwania czasu szoku  $T_i$ , które dla czasów trwania impulsów  $T_i < 10$  ms mogą wywołać migotanie komór serca z 5, 50 i 100% prawdopodobieństwem (na podstawie [2]); d) wartość skuteczna impulsów prądowych w funkcji czasu trwania szoku  $T_i$  dla czasów trwania impulsów  $T_i > 10$  ms, mogących wywołać migotanie komór serca z 5% prawdopodobieństwem (na podstawie [1])

Fig. 5: a) „V” and „Y” capacitors system connected between negative and positive pole of the trolleybus circuits fed from OCS and vehicle body or intermediate mass; b) definition of capacitor discharge time  $T_i$ ; c) r.m.s. values of short current impulses of the time duration less than  $T_i < 10$ ms against shock time  $T_i$  that can trigger ventricular fibrillation with 5, 50 and 100% probability (based on [2]); d) r.m.s. values of current impulses of the time duration longer than  $T_i > 10$ ms against shock time  $T_i$  that can trigger ventricular fibrillation with 5% probability (based on [1])



**Podstawowe parametry impulsu prądowego dla układu kondensatorów o pojemności wypadkowej  $C_w$ , włączonych pomiędzy obwody zasilane napięciem sieciowym a karoserią pojazdu;\*) dotyczy tylko impulsów prądowych o czasie trwania  $T_i < 10$  ms**

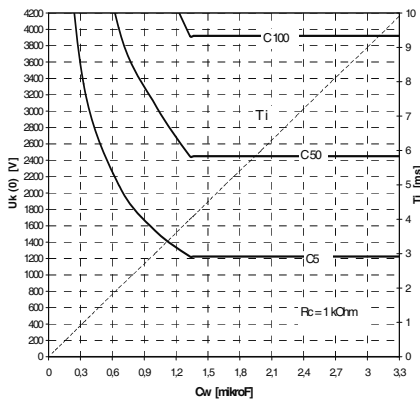
Czas trwania impulsu $T_i$ [s]	Prąd skuteczny $I_F$ [A]	Ładunek $Q_F$ [As]	Energia fazyfikacji $E_F$ [A <sup>2</sup> s]
$3R_c C_w$	$\frac{U_{k(0)}}{\sqrt{6}R_c}$	$0.95U_{k(0)} C_w$ *)	$U_{k(0)}^2 \frac{C_w}{2R_c}$ *)

- $U_{k(0)}$ ,  $U_s$  – dla sieci izolowanej, dla której rezystancje izolacji bieguna (+) i (-) w chwili poprzedzającej wystąpienie doziemienia bieguna (-) lub doziemienia bieguna (-) spełniały warunek  $R_{s-} \gg R_{s+}$  w odniesieniu do pierwszego przypadku i  $R_{s-} \ll R_{s+}$  w odniesieniu do drugiego przypadku,
- $U_{k(0)} \approx U_s/2$  – dla sieci izolowanej, dla której rezystancje izolacji bieguna (+) i (-) w chwili poprzedzającej wystąpienie doziemienia bieguna (-) lub doziemienia bieguna (+) spełniały warunek  $R_{s-} \approx R_{s+}$ ,
- $U_{k(0)} \approx 0$  – dla sieci izolowanej, dla której rezystancje izolacji bieguna (+) i (-) w chwili poprzedzającej wystąpienie doziemienia bieguna (-) lub doziemienia bieguna (+) spełniały warunek  $R_{s-} \gg R_{s+}$  w odniesieniu do pierwszego przypadku i  $R_{s-} \ll R_{s+}$  w odniesieniu do drugiego przypadku,
- $U_{k(0)} = \Delta U_s/2$  – dla sieci z uziemionym biegunem plus lub minus.

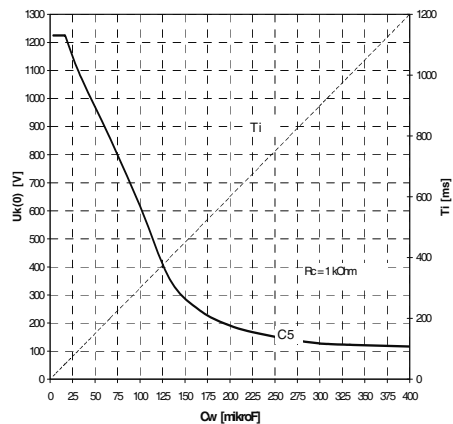
Uwzględniając zależności  $U_{k(0)} = f(I_F)$  oraz  $C_w = f(T_i)$  podane w tabeli 1, można dla przyjętej wartości rezystancji  $R_c = \text{const}$  sporządzić na podstawie wykresów z rys. 5c i 5d wykresy zależności krytycznych  $U_{k(0)} = f(C_w)$ . Wykresy  $U_{k(0)} = f(C_w)$  dla założonej wartości  $R_c = 1$  k $\Omega$  dla krótkotrwałych impulsów prądowych o czasie trwania  $T_i < 10$  ms oraz czasie trwania przekraczającym  $T_i > 10$  ms przedstawione zostały na rys. 6a i 6b. Uwzględniając założenia podane w pkt. 2, w tabeli 2 określono na podstawie normy [3] wartości napięć  $U_s = U_{\text{max}2}$  i  $\Delta U_s = U_{\text{max}2} - U_{\text{min}2}$  występujące dla normalnych stanów pracy sieci trakcyjnej systemów zasilania trakcji trolejbusowej o napięciu znamionowym 600 V lub 750 V. Biorąc pod uwagę poziomy napięć podane w tabeli 2, można na podstawie wykresu z rys. 6a stwierdzić, że w trolejbusach zasilanych z sieci o znamionowym napięciu zasilania 600 V lub 750V nie wystąpi w najbardziej niekorzystnym przypadku (przypadek a, gdy  $U_{k(0)} = U_{\text{max}2}$ ) nawet 5% ryzyko porażenia śmiertelnego krótkotrwałymi jednokierunkowymi impulsami prądowymi ( $T_i < 10$  ms), niezależnie od zastosowanej wartości pojemności wypadkowej  $C_w$  kondensatorów wpiętych pomiędzy instalację sieciową a karoserię. Zagrożenie takie mogłoby wystąpić, jeśli napięcie w sieci trakcyjnej w chwili wystąpienia doziemienia przekraczałoby w najbardziej niekorzystnej sytuacji poziom  $U_s > \sim 1250$  V. Nie oznacza to jednak, że pojemność  $C_w$  może być dowolnie duża. Mając na uwadze kolejny wykres z rys. 6b, można oszacować, że przy pojemności  $C_w \approx 40$   $\mu\text{F}$  dla systemu zasilania 750 V i  $C_w \approx 75$   $\mu\text{F}$  dla systemu zasilania 600 V następuje przekroczenie standardowej krzywej krytycznej C5 określonej dla czasu trwania impulsów  $T_i > 10$  ms. Podane powyżej krytyczne wartości pojemności są o ponad rząd wielkości większe od pojemności stosowanych z reguły w standardowych filtrach EMC, co oznacza tym samym, że nie występuje żadne ryzyko wywołania migotania komór serca. Tym niemniej przy stosowaniu pojemności tłumiących

rzędu kilku mikrofaradów może zachodzić niebezpieczeństwo pojawienia się niekontrolowanej reakcji fizjologicznej, która – chociaż wywołana została impulsem prądowym nie stanowiącym bezpośredniego zagrożenia dla zdrowia i życia – w skrajnych sytuacjach może stanowić tzw. przyczynę pośrednią wypadku, polegającego np. na tym, że u pasażera lub pracownika personelu obsługi, stojącego na ziemi i dotykającego jednocześnie karoserii trolejbusu, pojawi się w chwili przepływu impulsu prądowego gwałtowny niekontrolowany odruch fizjologiczny, w trakcie którego może dojść do utraty równowagi i upadku. Na przykład według [2] przepływ impulsu prądu o ładunku  $Q_F = 1000 \cdot 10^{-6} \text{ As}$  i energii  $E_F = 5 \cdot 10^{-4} \text{ As}^2$  w czasie  $T_i = 3 \text{ ms}$  jest już odczuwany jako bardzo bolesny. W związku z powyższym wartości pojemności tłumiących powinny zostać ograniczone do poziomu

a)



b)



Rys. 6. Zależności krytyczne napięcia  $U_{k(0)}$  w funkcji pojemności wypadkowej  $C_w$  układu kondensatorów włączonych pomiędzy biegun plusowy i minusowy instalacji zasilanej napięciem sieciowym a karoserią pojazdu: a) krzywe krytyczne  $U_{k(0)} = f(C_w)$  dla krótkotrwałych impulsów prądu o czasie trwania  $T_i < 10 \text{ ms}$  dla 5, 50 i 100% prawdopodobieństwa wystąpienia migotania komór serca; b) krzywa krytyczna  $U_{k(0)} = f(C_w)$  dla czasu trwania impulsów  $T_i > 10 \text{ ms}$  dla 5% prawdopodobieństwa wystąpienia migotania komór serca

Fig. 6. Critical curves of the voltage  $U_{k(0)}$  against total capacitance  $C_w$  of the capacitors system connected between negative and positive pole of the trolleybus circuits fed from OCS and vehicle body: a)  $U_{k(0)} = f(C_w)$  for short time current impulses of the time duration less than  $T_i < 10 \text{ ms}$  with 5, 50 i 100% probability of triggering ventricular fibrillation; b)  $U_{k(0)} = f(C_w)$  for current impulses of the time duration longer than  $T_i > 10 \text{ ms}$  with 5% probability of triggering ventricular fibrillation

gwarantującego brak ryzyka wystąpienia jakiegokolwiek silnej reakcji fizjologicznej. O ile jednak przyjęcie wartości maksymalnej ładunku na poziomie ok.  $50 \cdot 10^{-6}$  As, jak to zaleca norma [4], w istotny sposób ograniczałoby pojemności kondensatorów stosowanych w filtrach EMC lub innych dodatkowych układach tłumiących, to wyliczenie zalecanych dopuszczalnych wartości pojemności  $C_w$  w oparciu o tzw. przeciętną energię  $E_F = 0,75 \cdot 10^{-4}$  A<sup>2</sup>s krótkotrwałego impulsu prądowego ( $T_i < 10$  ms), której przekroczenie według [2] odpowiada wrażeniom porównywanym do bólu towarzyszącego ukąszeniu pszczoły lub jednosekundowego przypalania papierosem, wydaje się propozycją racjonalną technicznie, tym bardziej, że obszar drzwi wejściowych do trolejbusu jest z reguły, przynajmniej częściowo (np. poręcze i stopnie), odizolowany dielektrycznie od karoserii, a same przepływy prądów wyrównawczych zachodzą tylko sporadycznie. Dodatkowo można jeszcze uwzględnić rezystancję tzw. mokrego obuwia, przyjmowaną z reguły na poziomie ok. 1 k $\Omega$ . W takiej sytuacji można założyć, że poziom napięcia rażeniowego  $U_{k(0)}$  zmaleje dwukrotnie w odniesieniu do najbardziej niekorzystnego przypadku. Wyznaczając zatem  $C_w$  na podstawie wzoru na  $E_F$  podanego w tabeli 1, można do wzoru podstawić wartość  $U_{k(0)} \approx U_{\max 2}/2$ . Zalecane, obliczone na podstawie powyższych założeń, maksymalne wartości pojemności  $C_w$  dla systemów zasilania o napięciu znamionowym 600 V i 750 V podano w tabeli 3.

Tabela 2

**Przyjęte do obliczeń poziomy napięcie  $U_s$  sieci trakcyjnej i nagłego skoku napięcia  $U_s$  w sieci dla sytemu zasilania 600 V i 750 V (według [3])**

Napięcie znamionowe zasilania [V]	$U_s = U_{\max 2}$ [V]	$\Delta U_s = U_{\max 2} - U_{\min 2}$ [V]
600	800	400
750	1000	500

Tabela 3

**Zalecana maksymalna pojemność wypadkowa układu kondensatorów tłumiących włączanych pomiędzy instalację sieciową a karoserię pojazdu**

Napięcie znamionowe systemu zasilania [V]	Zalecana maksymalna pojemność wypadkowa $C_w$ kondensatorów tłumiących [ $\mu$ F]
600	0,94
750	0,6

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że w trakcji trolejbusowej zasilanej z sieci o napięciu znamionowym 600 V lub 750 V nie występuje zagrożenie wystąpienia śmiertelnego w skutkach porażenia wywołanego krótkotrwałymi impulsami prądowymi o czasie trwania do 10 ms, mogącymi przepływać z karoserii do ziemi poprzez

elementy pojemnościowe tłumiące włączane pomiędzy obwody zasilane napięciem sieciowym a karoserię. Ustalono jednocześnie, że istotne zagrożenie może wystąpić dopiero przy pojemnościach rzędu  $C_w \approx 40 \mu\text{F}$  dla systemu zasilania 750V i  $C_w \approx 75 \mu\text{F}$  dla sytemu zasilania 600 V, z uwagi na przekroczenie standartowej krzywej krytycznej C5, określonej dla czasu trwania impulsów  $T_i > 10$  ms. Tym niemniej z uwagi na możliwość wystąpienia zagrożenia pośredniego w postaci niekontrolowanej reakcji fizjologicznej u osoby stojącej na ziemi i dotykającej karoserii trolejbusu w chwili występowania krótkotrwałego przepływu prądu wyrównawczego, zaleca się ograniczenie wymienionych pojemności kondensatorów tłumiących do wartości podanych w tabeli 3.

### Literatura

- [1] IEC TS 60479-1:2006: Effects of current on human beings and livestock. Part 1: General aspects.
- [2] IEC TS 60479-2: Effects of current on human beings and livestock. Part 2: Special aspects.
- [3] PN-EN 50163:2006: Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
- [4] PN-EN 61140:2005: Ochrona przed porażeniem prądem elektrycznym. Wspólne aspekty instalacji i urządzeń.
- [5] pr-TS 50502:2008: Railway application. Rolling Stock. Electric equipment in trolley-buses. Safety requirements and connection systems.