

A. JAGIEŁŁO (PK), W. HUDYM (PK), I. CHRABĄSZCZ (PK), K. NOWAK, J. PRUSAK (PK), P. TRĘBACZ (PK)

Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155, Kraków, Poland, e-mail: [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net), [kanowak@gmail.com](mailto:kanowak@gmail.com)

## OCENA PÓL MAGNETYCZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH NA PRZYSTANKACH TRAMWAJOWYCH. ANALIZA WYBRANEGO PRZYPADKU

### Wstęp

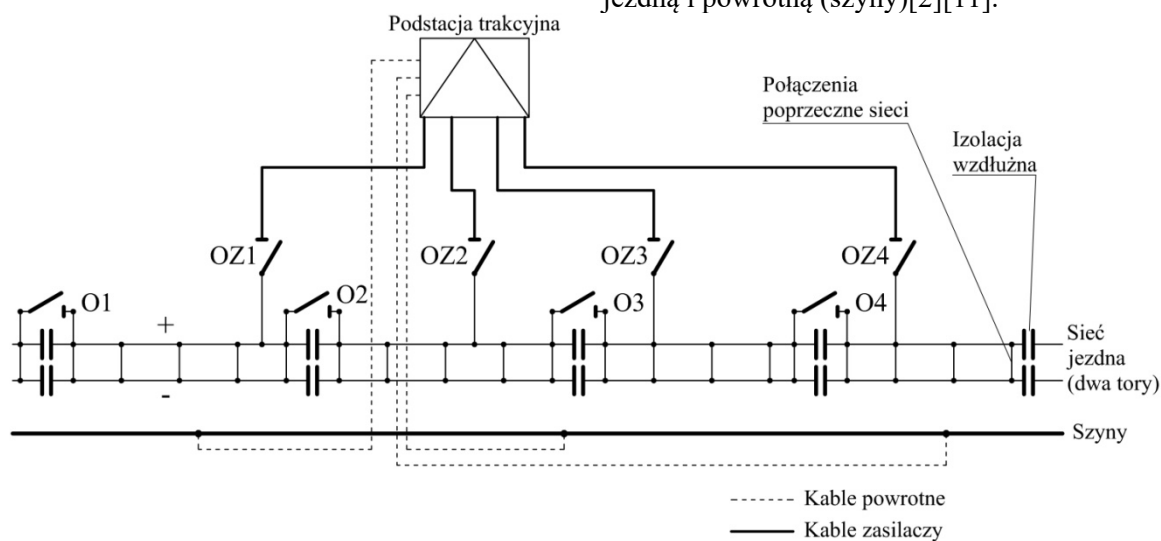
Przystanki tramwajowe dla pasażerów są lokalizowane bezpośrednio obok torowiska. Tak więc osoby zamierzające odbyć przejazd znajdują się stosunkowo blisko konstrukcji stanowiących obwody zasilania pojazdów tramwajowych. Wspomniane konstrukcje to sieci trakcyjne jezdne, oraz szyny stanowiące tzw. obwody powrotne. Przepływ prądu elektrycznego w obwodzie zasilania, który jest związany z poborem energii głównie na cele trakcyjne, powoduje powstawanie wokół niego pól magnetycznych[7][8][10][15][16]. W obszarze oddziaływań tych pól mogą się

znaleźć przyszli pasażerowie przebywający na przystankach.

W artykule poniżej przedstawiono wyniki obliczeń wartości indukcji magnetycznej, która może się pojawić na przystanku wybranej linii tramwajowej. Zwrócono również uwagę na przepisy sanitarne określające zagrożenia wynikające z przekroczenia określonych poziomów wspomnianej wielkości fizycznej.

### Specyfika zasilania sieci trakcyjnej tramwajowej

Na rys. 1 pokazano typowy schemat połączenia podstacji trakcyjnej tramwajowej z siecią trakcyjną jezdnią i powrotną (szyny)[2][11].



Rys. 1. Schemat połączenia podstacji trakcyjnej tramwajowej systemu prądu stałego z siecią trakcyjną; OZ1 – OZ4 odłączniki zasilaczy, O1 – O4 odłączniki sekcyjne.

W trakcji tramwajowej stosowany jest przede wszystkim układ zasilania jednostronnego. Oznacza to, że obszar zasilania podstacji podzielony jest na szereg odcinków, z których każdy zasilany jest oddzielnym kablem.

W normalnych warunkach pracy odłączniki sekcyjne są otwarte. Natomiast sieć szynowa stanowi jeden obwód, do którego przyłączone są kable powrotne. Punkty przyłączenia kabli zasilających i powrotnych są zlokalizowane w różnych miejscach.

Zróznicowana budowa sieci jezdnej (górej) i powrotnej (szyny), jak również zróżnicowany sposób ich połączenia z podstacją trakcyjną w zauważalny sposób wpływa na rozptył prądów trakcyjnych. W szczególności na danym odcinku zasilania prądy w przewodach jezdnych i w szynach mogą mieć różne wartości. Fakt ten uwzględniono przy obliczeniach pola magnetycznego (indukcji magnetycznej) w obszarze analizowanego przystanku tramwajowego. Oczywiście w całym obwodzie

zasilanym z podstacji trakcyjnej obowiązuje pierwsze (węzłowe) prawo Kirchhoffa.

**Przepisy i unormowania dotyczące pól magnetycznych**

Oddziaływaniem pozytywnym lub negatywnym, pól magnetycznych na organizm ludzki zajmują się specjaliści z dziedziny medycyny. Na podstawie wyników badań formułowane są przepisy dotyczące zagrożeń związanych z występowaniem silnych pól

magnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości (f). Można zauważyć, że przepisy podawane przez różne kraje, czy instytucje różnią się między sobą [12]. Jest to widoczny dowód na złożoność tej problematyki. Nie dziwi więc, że prace badawcze są kontynuowane.

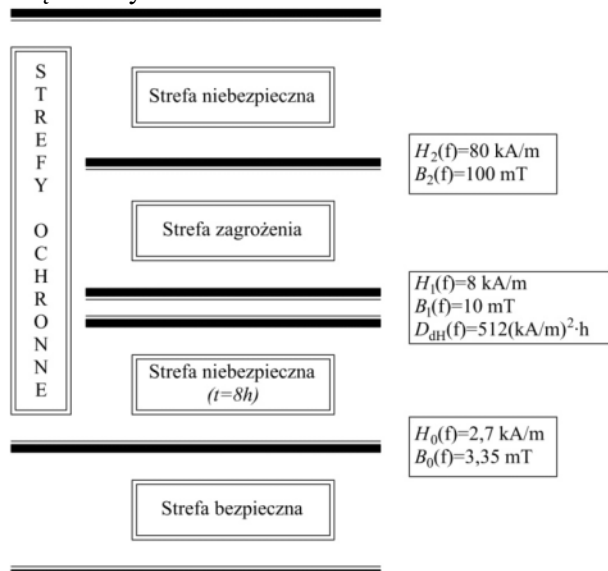
Poniżej, w tabeli 1, przedstawiono obowiązujące w Polsce unormowania dotyczące pól magnetycznych wg. Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej [6].

Table 1

**Dopuszczalne wartości natężenia pola magnetycznego  $H_1(f)$  na granicy stref zagrożenia i pośredniej oraz doza dopuszczalnego pola magnetycznego  $D_{dH}(f)$**

Lp.	Zakres częstotliwości	$H_1(f)$ [A/m]	$D_{dH}(f)$
1.	$0 \text{ Hz} \leq f \leq 0,5 \text{ Hz}$	8000	$512 \text{ (kA/m)}^2 \cdot \text{h}$
2.	$0,5 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$	200	$0,32 \text{ (kA/m)}^2 \cdot \text{h}$
3.	$0,05 \text{ Hz} < f \leq 1 \text{ kHz}$	$10/f$	$800/f^2 \text{ (kA/m)}^2 \cdot \text{h}$
4.	$1 \text{ kHz} < f \leq 800 \text{ kHz}$	10	$800 \text{ (kA/m)}^2 \cdot \text{h}$
5.	$0,8 \text{ MHz} < f \leq 150 \text{ MHz}$	$8/f$	$512/f^2 \text{ (kA/m)}^2 \cdot \text{h}$
6.	$0,15 \text{ GHz} < f \leq 3 \text{ GHz}$	0,053	$0,022 \text{ (kA/m)}^2 \cdot \text{h}$

Na rys. 2 przedstawiono podział występowania pól magnetycznych wg. wspomnianego wyżej Rozporządzenia. Widać, że w zależności od wartości indukcji magnetycznej  $B(f)$  lub natężenia pola magnetycznego  $H(f)$  wyróżnia się strefy ochronne i strefę bezpieczną. Przedstawione na rysunku wartości graniczne tych wielkości, oraz dopuszczalnej dawki pola magnetycznego dotyczą przypadku trójfazowej prądu stałego, tak więc wtedy  $f = 0 \text{ Hz}$ .



Rys. 2. Obszary występowania stref ochronnych dla trójfazowej prądu stałego[15]

magnetycznej  $B$  przyjmując następujące założenia [1][7][10][15]:

- sieć trakcyjna jest przewodnikiem prostoliniowym o nieskończonej długości;

- sieć trakcyjna znajduje się w środowisku jednorodnym i izotropowym, tzn. że właściwości tego środowiska są jednakowe we wszystkich punktach i nie zależą od kierunku;

- przy nakładaniu pól magnetycznych od poszczególnych składowych sieci trakcyjnej obowiązuje zasada superpozycji, tj. zasada niezależnego działania pól;

- sumując składowe pola magnetycznego należy brać pod uwagę, że  $B$  i  $H$  są wielkościami wektorowymi.

**Opis wybranego przypadku**

Poniżej przedstawiono, w skróty sposób, podstawowe dane opisujące wybraną linię tramwajową, oraz występujące na niej obciążenie. Dane te były brane pod uwagę przy obliczeniach prądów trakcyjnych, jak i wywoływanych przez nie pól magnetycznych [12][14].

Charakterystyka linii i ruchu tramwajów:

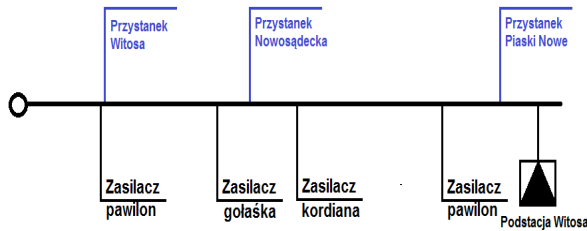
Wybrany odcinek linii tramwajowej, dla którego przeprowadzono wstępne analizy dotyczące pól magnetycznych zasilany jest w typowy sposób (rys. 1), czyli przez jedną podstację trakcyjną. Jest to linia dwutorowa, krańcowa, zakończona pętlą. Długość odcinka przelotowego wynosi 1800 m, a długość pętli 300 m. Na rys. 3 przedstawiono przebieg tego odcinka linii na tle fragmentu planu miasta, gdzie kolorem żółtym zaznaczono odcinek przelotowy, a kolorem czerwonym pętlę.

© Jagiełło A. i inny, 2017



Rys. 3. Przebieg i lokalizacja wybranego odcinka linii tramwajowej

Na rys. 4, w poglądowy sposób, przedstawiono lokalizację podstacji trakcyjnej (Witosa), czterech kabli zasilających oraz trzech przystanków zlokalizowanych na odcinku przelotowym analizowanej linii [12].



Rys. 4. Poglądowy schemat rozmieszczenia zasilaczy i przystanków tramwajowych [12]

W tab. 2 przedstawiono w zbiorczy sposób ilość pojazdów tramwajowych, dla przypadku poruszania się zgodnie z ustalonym rozkładem jazdy [13].

Table 2

**Ilość przejazdów dla poszczególnych linii**

Nr linii	Ilość przejazdów od pętli	Ilość przejazdów do pętli	Suma
Dni robocze			
6	73	76	149
24	57	55	112
50	144	144	288
Razem	274	275	549
Soboty			
6	36	36	72
24	54	53	107
50	87	86	173
Razem	177	175	352
Niedziele i święta			
6	-	-	-
24	51	49	100
50	84	83	167
Razem	135	132	267

Z powyższej tabeli widać, że w okresie kursowania tramwajów, tj. od 4:30 do 23:50, w dzień roboczy przemieszczą się 549 tramwajów, co daje

0,47 pojazdów na minutę. W godzinach szczytu na trasie porusza się średnio 0,7 pojazdów na minutę – oznacza to spore zagęszczenie ruchu tramwajów.

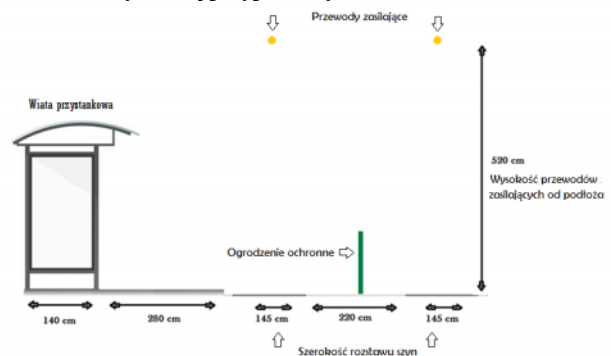
Wymiarowanie przystanku [12]:

Na rys. 5 przedstawiono zdjęcie typowego przystanku tramwajowego występującego na omawianej linii tramwajowej. Widać, że warunki lokalizacyjne pozwoliły na umieszczenie zadaszenia (wiaty) dla pasażerów w zauważalnej odległości od torowiska.



Rys. 5. Przystanek tramwajowy „Nowosądecka”

Natomiast na rys. 6 pokazano zwymiarowany przekrój powyższego przystanku wraz z torowiskiem i siecią trakcyjną jezdnią.

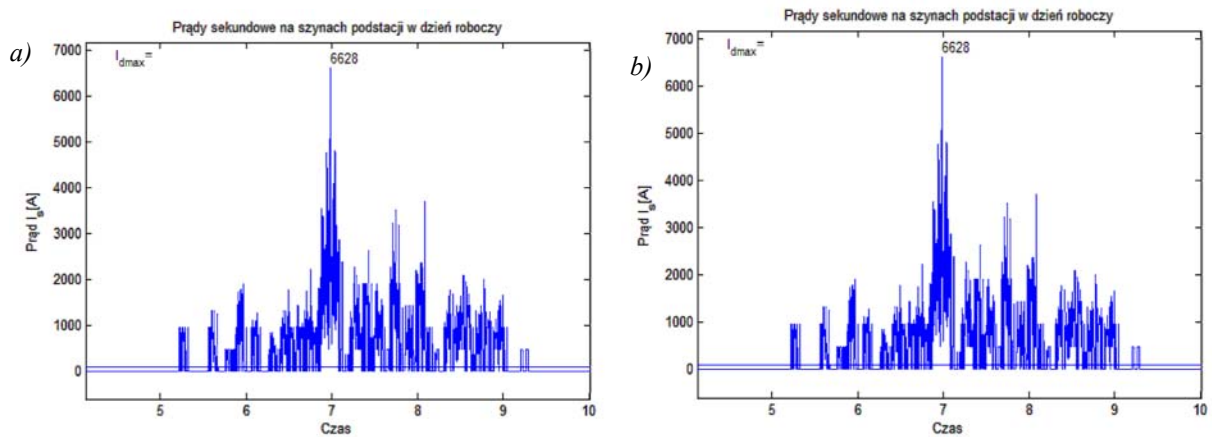


Pic. 6. Wymiary przystanku tramwajowego i sieci trakcyjnej

Wartości indukcji pola magnetycznego [12]:

Aby policzyć wartość indukcji pola magnetycznego należy najpierw określić wielkość prądów w sieci trakcyjnej jezdnej oraz w szynach [14]. Prądy te mają bardzo zmienny charakter, co potwierdzają przeprowadzone badania [3][4][5][13]. Jest to powodem m.in. trudności związanych z projektowaniem układów zasilania [9], jak i oceną ewentualnych zagrożeń pochodzących od pól magnetycznych [1][8][15].

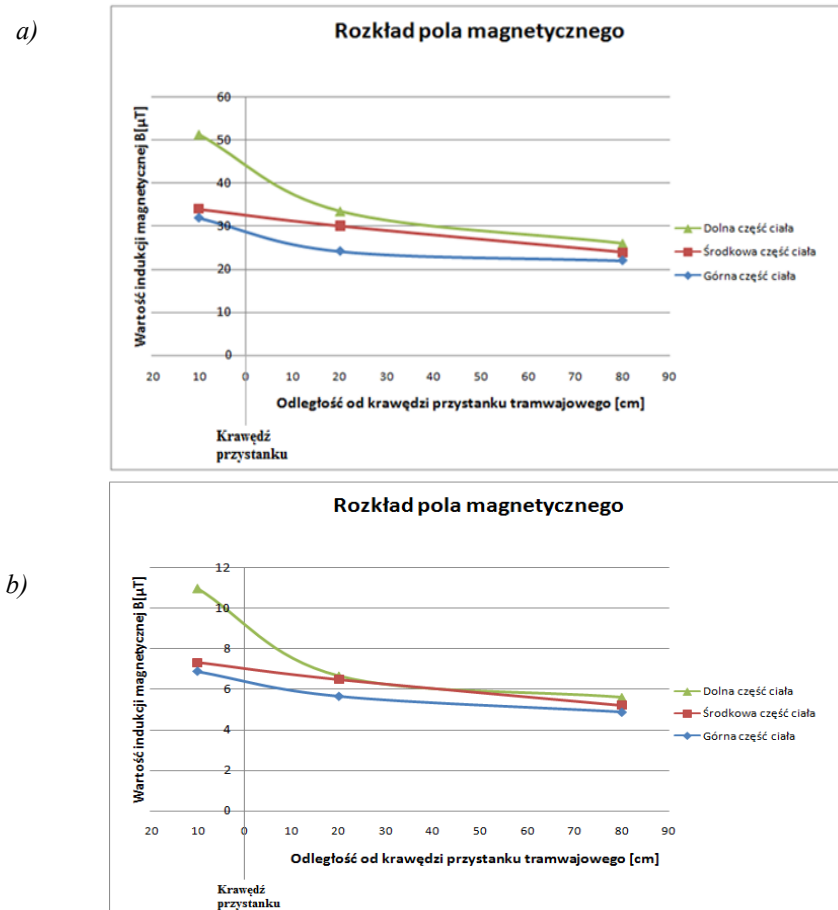
Na rys. 7 przedstawiono przykładowe przebiegi obciążeń tej samej podstacji trakcyjnej, w tym samym przedziale czasowym w dniu roboczym, ale dla różnych sytuacji związanych z ruchem tramwajów. Na rys. 7a obciążenie wynika z ruchu zgodnego z rozkładem jazdy, a na rys. 7b obciążenie jest związane z zagęszczeniem się ruchu np. po jakiejś awarii.



Pic. 7. Przebieg obciążenia podstacji trakcyjnej w dniu roboczym; a) ruch tramwajów zgodny z rozkładem jazdy; b) zagęszczony ruch tramwajów

Jak łatwo zauważyć, oba przebiegi prądów wyraźnie się różnią co do kształtu przebiegu, jak i wartości maksymalnej. Taka sama sytuacja dotyczy prądów w sieci trakcyjnej. Na rys. 8 przedstawiono wyniki obliczeń pola magnetycznego mogącego oddziaływać na hipotetycznego pasażera oczekującego na przystanku (rys. 5 i rys. 6), który może znajdować się w różnych od-

ległościach względem krawędzi tego przystanku. Rozróżniono wartości pól magnetycznych dla dolnej części ciała, środkowej i górnej [12]. Założono, że wspomniany pasażer jest wzrostu 180 cm. W przypadku rys. 8a, przyjęto, że prąd w przewodach jezdnych wynosi  $I_p=1148$  A, a w szynach (sieć powrotna)  $I_s=1200$  A. Natomiast rys. 8 b, dotyczy sytuacji gdy  $I_p=250$  A, a  $I_s=255$  A.



Pic. 8. Przykładowe wartości indukcji magnetycznej w obrębie przystanku tramwajowego dla różnych wartości prądów w przewodach jezdnych ( $I_p$ ) i w szynach ( $I_s$ ); a)  $I_p=1148$  A,  $I_s=1200$  A; b)  $I_p=250$  A,  $I_s=255$  A

Przedstawione na rys. 8 wyniki potwierdzają, że wielkości pól magnetycznych (indukcji mag-

netycznej) mogących oddziaływać, na pasażerów oczekujących na przystankach tramwajowych

zależą od wartości prądów w sieci trakcyjnej oraz od odległości od torowiska. Wyraźnie wyższa jest indukcja przy stopach niż przy głowie – szczególnie w pobliżu krawędzi przystanku, co również nie dziwi specjalistów, zorientowanych w budowie

i funkcjach sieci powrotnej (szyn). Biorąc pod uwagę tylko wartości indukcji magnetycznej można słusznie stwierdzić, na podstawie polskich przepisów sanitarnych [6] (rys. 2), że w obszarze przystanku występuje strefa bezpieczna ( $B_0=3,35$  mT). Wobec czego nie ma w tym względzie zagrożenia dla pasażerów.

### Uwagi końcowe

Znaczna zmienność obciążeń trakcyjnych przekłada się na złożony charakter pól magnetycznych pochodzących w szczególności od sieci trakcyjnych. Na rys. 8 widać, że indukcja magnetyczna, dla wziętych pod uwagę przypadków, może być porównywalna co do wartości, z magnetyzmem ziemskim na naszej szerokości geograficznej (48 – 50 mikro T) [1][7][10]. Są jednak zauważalne różnice między tymi polami. Indukcja magnetyczna pochodząca od sieci trakcyjnej przyjmuje różne wartości wzdłuż ciała człowieka, oraz wykazuje wspomnianą już zmienność. Być może specjaliści – z dziedziny medycyny, uznają te fakty za warte sprawdzenia pod względem zdrowotnym.

Zachowując optymizm co do ewentualnych rozstrzygnięć wpływu specyfiki, omówionych wyżej, pól magnetycznych na organizm człowieka warto stosować się do starej angielskiej zasady „prudent avoidance” – roztrzonego unikania. Dla prezentowanego w tym artykule przypadku, warto stać w pewnej odległości od krawędzi przystanku, jeśli tylko na to pozwalają miejscowe warunki.

### REFERENCES

1. Braun W., Meisel R., Schneider E.: Elektrische und magnetische Felder in der Bahnstromversorgung. Elektrische Bahnen 96 (1998) 7 (str. 222 – 230).
2. Chrabąszcz Ireneusz, Prusak Janusz, Drapik Sławomir: Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania; Podręcznik INPE dla Elektryków; Zeszyt nr 27; Wydawca: SEP-COSiW w Warszawie; Zakład Wydawniczy „INPE” w Bełchatowie; Listopad 2009.
3. Drapik Sławomir, Kobielski Andrzej, Prusak Janusz: Wybrane aspekty zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych. TTS Technika Transportu Szynowego, nr 4/2010 (str. 27 – 31).
4. Drapik Sławomir, Kuzniecowa Walery, Markowski Paweł, Prusak Janusz, Woszczyzna Bartosz: Badanie skali zmienności obciążeń wybranej tramwajowej podstacji trakcyjnej na podstawie rzeczywistych wyników pomiarowych dla spójnego okresu czasowego

obejmującego szesnaście tygodni. Logistyka nr 6/17 (str. 1026 – 1035).

5. Drapik Sławomir, Markowski Paweł, Prusak Janusz, Woszczyzna Bartosz: Analiza obciążeń zespołów prostownikowych przed i po wystąpieniu przeciążenia na przykładzie wybranej tramwajowej podstacji trakcyjnej. TTS Technika Transportu Szynowego, nr 12/2015 (str. 427 – 434).

6. Dziennik Ustaw RP nr 69 z dnia 22 czerwca 1995r., poz. 351: Obwieszczenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 17 maja 1995 w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (str. 1918, E. Pola magnetyczne stałe i o częstotliwości 50 Hz).

7. Jaworski B., Dietla A., Miłkowska L.: Elektryczność i magnetyzm. Kurs Fizyki, tom II, PWN, Warszawa 1984.

8. Kotelnik W. Aleksandr: Problemy elektromagnitnej ekologii na żelaznodoroznym transporcie (Tezisy dokłada). Materiały drukowane Konferencji Naukowo – Technicznej SEP nt. „Oddziaływanie Trakcji Elektrycznej na Środowisko”, Zakopane, 14-16 października 1999, (str. 41 – 43).

9. Kuznetsov V.G.: Elaboration of methodology for calculation of traction power-supply system with the help of renewal stream theory. [w:] Kuznetsov V.G., Vaiciunas G., Gediminas Technical University, Vilnius 2009 (str. 123 – 128).

10. Matusiak Ryszard: Teoria pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa 1976.

11. Mierzejewski Leszek, Szeląg Adam, Gałuszewski Marek: Systemy zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego; Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej; Warszawa 1989.

12. Nowak Kamil: Trakcja tramwajowa jako źródło pól magnetycznych – ocena zagrożeń. Praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, Kraków 2016.

13. Oćwieja Dominik, Markowski Paweł, Prusak Janusz, Woszczyzna Bartosz: Specyfika obciążeń zespołów prostownikowych tramwajowej podstacji trakcyjnej dla kilku wariantów pracy na przykładzie rzeczywistej linii tramwajowej. Materiały drukowane XVII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej z zakresu Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2016, Zakopane, październik 2016 (str. 215 – 224).

14. Podoski J., Kacprzak J., Mysłek J.: Zasady trakcji elektrycznej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980. L14,

15. Prusak Janusz, Zając Waldemar: Sieci trakcyjne jako źródło pola magnetycznego. Materiały drukowane Konferencji Naukowo – Technicznej SEP nt. „Oddziaływanie Trakcji Elektrycznej na Środowisko”, Zakopane, 14-16 października 1999, (str. 103 – 110).

16. Zeńczak Michał: Analiza technicznych problemów związanych z dozymetrią pól elektromagnetycznych o częstotliwości przemysłowej. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 543; Instytut Elektrotechniki nr 26; Szczecin 1998.

Received 18.04.2017.

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń wartości indukcji magnetycznej, która może się pojawić na przystanku wybranej linii tramwajowej. Zwrócono również uwagę na przepisy sanitarne określające zagrożenia wynikające z przekroczenia określonych poziomów wspomnianej wielkości fizycznej. Na podstawie wyników badań sformułowane są przepisy dotyczące zagrożeń związanych z występowaniem silnych pól magnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości.

**Keywords:** indukcji magnetycznej; tramwajowej linii; pól magnetycznych.

### УДК 621.331.3

А. ЯГЕЛЛО (КП), В. ГУДИМ (КП), І. ХРАБОНШЧ (КП), К. НОВАК, Я. ПРУСАК (КП), П. ТРЕБАК (ПК)

Краківська політехніка, факультет електротехніки та обчислювальної техніки e-mail: gudymvi@ukr.net, kanowak@gmail.com

## ОЦІНКА МАГНІТНИХ ПОЛІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ НА ЗУПИНЦІ ТРАМВАЮ. ОКРЕМИЙ ПРИКЛАД

У статті наведені результати розрахунку значень магнітної індукції, яка може з'явитися на обраній зупинці трамвайної лінії. Також звернули увагу на санітарні правила, що визначають ризики перевищення певних рівнів згаданої фізичної величини. На підставі результатів дослідження були сформульовані положення, що стосуються ризиків, пов'язаних з виникненням сильних магнітних полів у широкому діапазоні частот.

**Ключові слова:** магнітна індукція; трамвайна лінія; магнітні поля.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

### УДК 621.331.3

А. ЯГЕЛЛО (КП), В. ГУДИМ (КП), И. ХРАБОНШЧ (КП), К. НОВАК, Я. ПРУСАК (КП), П. ТРЕБАК (ПК)

Краковская политехника, факультет электротехники и вычислительной техники e-mail: gudymvi@ukr.net, kanowak@gmail.com

## ОЦЕНКА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ОСТАНОВКЕ ТРАМВАЯ. ОТДЕЛЬНЫЙ ПРИМЕР

В статье приведены результаты расчета значений магнитной индукции, которая может появиться на выбранной остановке трамвайной линии. Также обратили внимание на санитарные правила, определяющие риски превышения определенных уровней упомянутой физической величины. На основании результатов исследования были сформулированы положения, касающиеся рисков, связанных с возникновением сильных магнитных полей в широком диапазоне частот.

**Ключевые слова:** магнитная индукция; трамвайная линия; магнитные поля.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Саєнко Ю. Л.*