

ИНДУКТИРАНИ НАПРЕЖЕНИЯ ОТ ЕЛЕКТРИЧЕСКИТЕ ЛИНИИ НА ЖП ТРАНСПОРТА

**Красимир Маринов Иванов, Петър Колев Петров, Цвятко Колев Върбов,
Георги Цонев Велев**

Технически университет - Габрово

INDUCED VOLTAGES FROM ELECTRIC LINES OF RAILWAY TRANSPORT

**Krasimir Marinov Ivanov, Petar Kolev Petrov, Tsvyatko Kolev Varbov,
Georgi Conev Velev**

Technical University – Gabrovo

Abstract

In the process of work, the magnetic influence of the traction network on the overhead line was calculated, the electrical effect of the traction network on the overhead line was calculated. The parameters of induced voltages in an adjacent line of railway transport are determined. Measures are given to reduce the negative impacts.

Keywords: electromagnetic compatibility, harmonics current, induced voltage.

ВЪВЕДЕНИЕ

В момента над 71% от железопътните линии в България работят с променливотоково захранване. Тяговата електрическа мрежа е почти напълно асиметрична и има силно въздействие върху съседни електроенергийни обекти [1, 9]. Около проводниците, през които протича променлив ток, възниква променливо електромагнитно поле, което създава електродвижещи напрежения (ЕДН) във всички съседни съоръжения, разположени в това поле (електропроводи, въздушни и кабелни комуникационни линии, метални тръбопроводи, огради и др.). Тези ЕДН и токове могат да предизвикат опасни и смущаващи влияния, тоест да създадат условия за работата на електрическо и друго оборудване, които са несъвместими с техническите изисквания и правилата за безопасност. Натоварването на всяка тягова подстанция е непостоянно и несиметрично. То се променя в зависимост от броя на вагоните на влаковете, местоположението им в зоната между подстанции-

те и мощностите, които те консумират, освен това тяговата мрежа може да съдържа изравнителни токове. На практика измерването на индуктирани напрежения в изключени линии при максималния работен ток в контактната мрежа е практически трудно реализуемо. Ето защо анализът на проблемите на електромагнитна съвместимост на електрическия транспорт с помощта на компютърната техника е важна възможност.

Съгласно нормативната уредба в областта на електромагнитна съвместимост от всички линии с по-ниско ниво на предаване на енергия, разположени в близост до електрическото въздушно захранване на железопътния транспорт, са обект на електромагнитни влияния - въздушни и кабелни линии на комуникации, телеуправление и телесигнализация, осветителни електрически мрежи, електропроводи с ниско напрежение, изключена контактна мрежа на съседни коловози, както и проводящи елементи на метални конструкции, надлези, тръбопроводи, кабелни обвивки и др.[2, 3, 4].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Опасните смущаващи влияния се подразделят на електрически, магнитни и галванични според естеството на тяхното възникване.

Електрическото поле се създава от напрежението на влияещата линия, под негово въздействие в близките електропроводи се индуцират напрежения, чието големина зависи от ширината на сближаване. При разстояния, по-големи от 150 m електрическото влияние може да се пренебрегне. Освен това на проводниците, лежащи на земята или под земята няма въздействие, т.к. силовите линии на електрическото поле са до повърхността на земята [5, 6, 8].

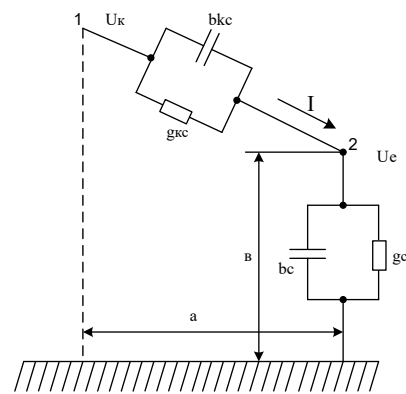
Магнитно влияние възниква, когато протича променлив ток (или висши хармонични съставлящи на изправения ток) през контактната мрежа, което предизвиква индуктиране на ЕДН в съседни линии. Магнитното влияние се счита за най-силно, тъй като неговият ефект се разпространява не само към въздушните линии, но и до подземните кабелни линии, а също така има леко намаляване на интензитета в зависимост от разстоянието и се проявява при ширина на сближаване над 1000 m [7, 10].

На фигура 1 g_c е активната проводимост на изолацията и въздуха; b_{kc} - реактивна (капацитивна) проводимост между контактния проводник (КП) и друга линия.

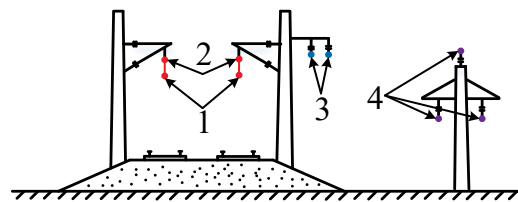
Тяговата мрежа на електрифицирания железопътен транспорт се състои от няколко проводника под напрежение 27.5 kV:

- контактна мрежа от една или повече линии;
- захранваща система за нетягови потребители ДПР (два проводника).

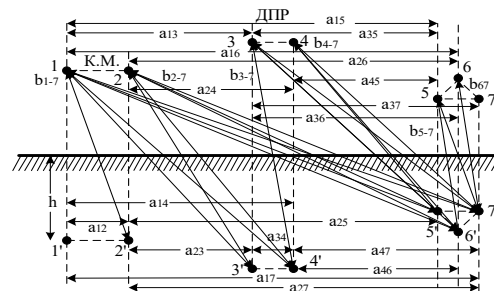
Често има ситуации, когато една част от проводниците са под напрежение, а в друга по някаква причина, напрежението е изключено. Разглеждаме схема на двупътна (двойна) жп линия и в непосредствено с нея линия два проводника, захранваща нетягови потребители и близка въздушна трифазна линия средно напрежение.



Фиг.1. Схема, поясняваща електрическото влияние



Фиг.2. Примерна схема на двойна ЖП линия: 1 – контактен провод; 2 – носещо въже; 3 – линия ДПР; 4 – близък трифазен електропровод СН.



Фиг. 3. Разчетна схема на горния двупътен участък

За изчисленията са необходими следните данни:

- $h_{кп}$ – височина на окачване на контактния проводник;
- $h_{дпр}$ – височина на окачване на линията ДПР;
- $h_{вл.сцб}$ – височина на окачване на най-отдалечената от земята повърхност на проводника на ВЛ;
- $h_{сцб}$ – височина на окачване на проводниците на ВЛ.

За да опростим изчисленията, ще заменим носещето въже и контактния проводник с един еквивалентен радиус, чиято стойност се определя по формулата, m:

$$r_e = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}, \quad (1)$$

където:

n – число на проводниците ($n=2$);

r_0 – среден радиус на контактния проводник и носещето въже, m;

r_p – радиус на окръжността, по която се разполагат проводниците, m.

Средният радиус на контактния проводник и носещето въже се определя, както следва, m:

$$r_0 = \frac{r_{кп} + r_{нт}}{2}, \quad (2)$$

където:

$r_{кп}$ – радиус на контактния проводник;

$r_{нт}$ – радиус на носещето въже.

Радиусът на окръжността, по която се разполагат проводниците, е както следва:

$$r_p = \frac{a_{кп-нт}}{2}, \text{ m} \quad (3)$$

Линията ДПР е прието, че е изпълнена с проводници тип 2хАС–50. Въздушният електропровод ВЛ СЦБ е изпълнен с проводници 3хАС – 35.

За да определим електрическото влияние, ще използваме метода на огледалните образи. За изчислението е необходимо да се определят разстоянията от точката на изчисляване до геометричните центрове на проводниците. Разстоянията от точката на пресмятане до геометричните центрове на проводниците са обобщени в съответствие с фигура 2. Разстоянията b се намират според Питагоровата теорема, като се използват хоризонталните разстояния между проводниците:

$$b_{ik} = \sqrt{h^2 + a_{ik}^2}. \quad (4)$$

Собствените и взаимните потенциални коефициенти се определят по формулата:

$$\alpha_{iM} = \ln \left(\frac{b_{iM}}{a_{iM}} \right). \quad (5)$$

За седемпроводна система, показана на фигура 2 със специфични заряди за единица дължина $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7$ и потенциали $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \phi_5, \phi_6, \phi_7$, уравненията на Максвел ще бъдат, както следва:

$$\begin{cases} \phi_1 = \alpha_{11} \cdot \tau_1 + \alpha_{12} \cdot \tau_2 + \alpha_{13} \cdot \tau_3 + \alpha_{14} \cdot \tau_4 + \alpha_{15} \cdot \tau_5 + \alpha_{16} \cdot \tau_6 + \alpha_{17} \cdot \tau_7 \\ \phi_2 = \alpha_{12} \cdot \tau_1 + \alpha_{22} \cdot \tau_2 + \alpha_{23} \cdot \tau_3 + \alpha_{24} \cdot \tau_4 + \alpha_{25} \cdot \tau_5 + \alpha_{26} \cdot \tau_6 + \alpha_{27} \cdot \tau_7 \\ \phi_3 = \alpha_{13} \cdot \tau_1 + \alpha_{23} \cdot \tau_2 + \alpha_{33} \cdot \tau_3 + \alpha_{34} \cdot \tau_4 + \alpha_{35} \cdot \tau_5 + \alpha_{36} \cdot \tau_6 + \alpha_{37} \cdot \tau_7 \\ \phi_4 = \alpha_{14} \cdot \tau_1 + \alpha_{24} \cdot \tau_2 + \alpha_{34} \cdot \tau_3 + \alpha_{44} \cdot \tau_4 + \alpha_{45} \cdot \tau_5 + \alpha_{46} \cdot \tau_6 + \alpha_{47} \cdot \tau_7 \\ \phi_5 = \alpha_{15} \cdot \tau_1 + \alpha_{25} \cdot \tau_2 + \alpha_{35} \cdot \tau_3 + \alpha_{45} \cdot \tau_4 + \alpha_{55} \cdot \tau_5 + \alpha_{56} \cdot \tau_6 + \alpha_{57} \cdot \tau_7 \\ \phi_6 = \alpha_{16} \cdot \tau_1 + \alpha_{26} \cdot \tau_2 + \alpha_{36} \cdot \tau_3 + \alpha_{46} \cdot \tau_4 + \alpha_{56} \cdot \tau_5 + \alpha_{66} \cdot \tau_6 + \alpha_{67} \cdot \tau_7 \\ \phi_7 = \alpha_{17} \cdot \tau_1 + \alpha_{27} \cdot \tau_2 + \alpha_{37} \cdot \tau_3 + \alpha_{47} \cdot \tau_4 + \alpha_{57} \cdot \tau_5 + \alpha_{67} \cdot \tau_6 + \alpha_{77} \cdot \tau_7 \end{cases} \quad (6)$$

Потенциалите в уравненията на Максвел имат следните стойности:

$$\phi_3 = 27,5, \quad \phi_1 = \phi_2 = \phi_4 = 27,5 \cdot e^{j120},$$

тъй като ϕ_3, ϕ_4 са напреженията на двете захранващи рамена натяговата подстанция, ъгълът между тях е 120 градуса и от които се захранват проводници 3 и 4 на линията ДПР. Стойностите на индуктираните потенциали могат да сепроменят в зависимост от включването или изключването на проводниците на системата. Въз основа на това ще изчислим най-опасните електрически влияния върху съседни линии.

Ще изчисляваме индуктирания потенциал на изключен контактен проводник на първия път ($\tau_1=0$), всички други проводници на системата са включени, т.е. са свързани към източник на захранване.

Тогава системата от уравнения (6) приема вида:

$$\begin{cases} \phi_2 = \alpha_{22} \cdot \tau_2 + \alpha_{23} \cdot \tau_3 + \alpha_{24} \cdot \tau_4 + \alpha_{25} \cdot \tau_5 + \alpha_{26} \cdot \tau_6 + \alpha_{27} \cdot \tau_7 \\ \phi_3 = \alpha_{23} \cdot \tau_2 + \alpha_{33} \cdot \tau_3 + \alpha_{34} \cdot \tau_4 + \alpha_{35} \cdot \tau_5 + \alpha_{36} \cdot \tau_6 + \alpha_{37} \cdot \tau_7 \\ \phi_4 = \alpha_{24} \cdot \tau_2 + \alpha_{34} \cdot \tau_3 + \alpha_{44} \cdot \tau_4 + \alpha_{45} \cdot \tau_5 + \alpha_{46} \cdot \tau_6 + \alpha_{47} \cdot \tau_7 \\ \phi_5 = \alpha_{25} \cdot \tau_2 + \alpha_{35} \cdot \tau_3 + \alpha_{45} \cdot \tau_4 + \alpha_{55} \cdot \tau_5 + \alpha_{56} \cdot \tau_6 + \alpha_{57} \cdot \tau_7 \\ \phi_6 = \alpha_{26} \cdot \tau_2 + \alpha_{36} \cdot \tau_3 + \alpha_{46} \cdot \tau_4 + \alpha_{56} \cdot \tau_5 + \alpha_{66} \cdot \tau_6 + \alpha_{67} \cdot \tau_7 \\ \phi_7 = \alpha_{27} \cdot \tau_2 + \alpha_{37} \cdot \tau_3 + \alpha_{47} \cdot \tau_4 + \alpha_{57} \cdot \tau_5 + \alpha_{67} \cdot \tau_6 + \alpha_{77} \cdot \tau_7 \end{cases} \quad (7)$$

Намираме стойностите на τ_i , заместваемe получените стойности в първото уравнение на системата (6), получаваме формулата за намиране на индуктирания потенциал

върху контактния проводник на първия път:

$$\varphi_1 = \alpha_{12} \cdot \tau_2 + \alpha_{13} \cdot \tau_3 + \alpha_{14} \cdot \tau_4 + \alpha_{15} \cdot \tau_5 + \alpha_{16} \cdot \tau_6 + \alpha_{17} \cdot \tau_7 \quad (8)$$

По този начин потенциалът на точка 1 ще бъде равенна:

$$\varphi_1 = 6,775 \text{ kV}.$$

Изчисляваме индуктирания потенциал върху въздушния проводник на втория път, всички други проводници на системата са под напрежение

Контактният проводник на втория път (отгук нататък 2) е изолиран и обезточен, останалите проводници: контактният проводник на първия път, линията ДПР и линията на електропровода СЦБ са свързани към източника на захранване (по-долу 1, 3, 4, 5, 6 и 7), тогава $\tau_2 = 0$. Тогава системата от уравнения (6) приема вида:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \alpha_{11} \cdot \tau_1 + \alpha_{13} \cdot \tau_3 + \alpha_{14} \cdot \tau_4 + \alpha_{15} \cdot \tau_5 + \alpha_{16} \cdot \tau_6 + \alpha_{17} \cdot \tau_7 \\ \varphi_3 = \alpha_{13} \cdot \tau_1 + \alpha_{33} \cdot \tau_3 + \alpha_{34} \cdot \tau_4 + \alpha_{35} \cdot \tau_5 + \alpha_{36} \cdot \tau_6 + \alpha_{37} \cdot \tau_7 \\ \varphi_4 = \alpha_{14} \cdot \tau_1 + \alpha_{34} \cdot \tau_3 + \alpha_{44} \cdot \tau_4 + \alpha_{45} \cdot \tau_5 + \alpha_{46} \cdot \tau_6 + \alpha_{47} \cdot \tau_7 \\ \varphi_5 = \alpha_{15} \cdot \tau_1 + \alpha_{35} \cdot \tau_3 + \alpha_{45} \cdot \tau_4 + \alpha_{55} \cdot \tau_5 + \alpha_{56} \cdot \tau_6 + \alpha_{57} \cdot \tau_7 \\ \varphi_6 = \alpha_{16} \cdot \tau_1 + \alpha_{36} \cdot \tau_3 + \alpha_{46} \cdot \tau_4 + \alpha_{56} \cdot \tau_5 + \alpha_{66} \cdot \tau_6 + \alpha_{67} \cdot \tau_7 \\ \varphi_7 = \alpha_{17} \cdot \tau_1 + \alpha_{37} \cdot \tau_3 + \alpha_{47} \cdot \tau_4 + \alpha_{57} \cdot \tau_5 + \alpha_{67} \cdot \tau_6 + \alpha_{77} \cdot \tau_7 \end{cases} \quad (9)$$

Решаваме система относно стойностите на τ_i , заместваме получените стойности в първото уравнение на системата (6), получаваме формулата за намиране на индуктирания потенциал върху контактния проводник на втория път:

$$\varphi_2 = \alpha_{12} \cdot \tau_1 + \alpha_{23} \cdot \tau_3 + \alpha_{24} \cdot \tau_4 + \alpha_{25} \cdot \tau_5 + \alpha_{26} \cdot \tau_6 + \alpha_{27} \cdot \tau_7 \quad (10)$$

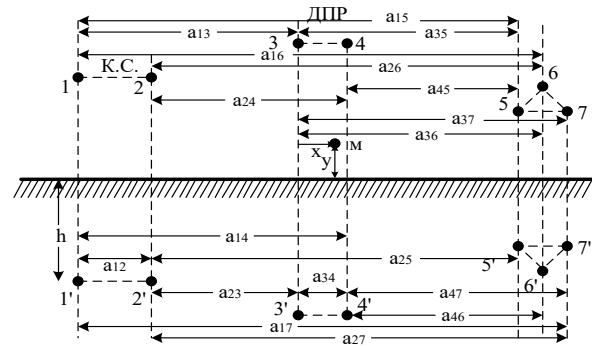
По този начин потенциалът на точка 2 ще бъде равен на:

$$\varphi_2 = 7,047 \text{ kV}.$$

Изчисляване на интензитета на електрическото поле на контактната мрежа с променлив ток, индуктиран върху обслужващия персонал

Оперативният персонал, който извършва работа в областта на електрическо поле, индуктирано от контактна мрежа с променлив ток, не трябва да бъде излаган на превишаване на установените норми. Необходимо е да се разгледа възможността оперативният

персонал да работи директно под контактната мрежа, при условие че са включени всички проводници на системата. Тази опция е най-опасната, тъй като интензитетът на полето е с максималната си стойност.



Фиг. 4. Разчетна схема за определяне на интензитета на електрическото поле при двупътен участък

Изразяваме потенциала φ_M чрез координатите на точката М, за да намерим интензитета E_y :

$$\begin{aligned} \varphi_M(x, y) = & \ln \left[\frac{\sqrt{(h_1 + y)^2 + (a_{13} + x)^2}}{\sqrt{(h_1 - y)^2 + (a_{13} + x)^2}} \right] \cdot \tau_1 + \ln \left[\frac{\sqrt{(h_1 + y)^2 + (a_{23} + x)^2}}{\sqrt{(h_1 - y)^2 + (a_{23} + x)^2}} \right] \cdot \tau_2 + \\ & + \ln \left[\frac{\sqrt{(h_2 + y)^2 + (x)^2}}{\sqrt{(h_2 - y)^2 + (x)^2}} \right] \cdot \tau_3 + \ln \left[\frac{\sqrt{(h_2 + y)^2 + (a_{34} - x)^2}}{\sqrt{(h_2 - y)^2 + (a_{34} - x)^2}} \right] \cdot \tau_4 + \\ & + \ln \left[\frac{\sqrt{(h_2 + y)^2 + (a_{35} - x)^2}}{\sqrt{(h_2 - y)^2 + (a_{35} - x)^2}} \right] \cdot \tau_5 + \ln \left[\frac{\sqrt{(h_3 + y)^2 + (a_{36} - x)^2}}{\sqrt{(h_3 - y)^2 + (a_{36} - x)^2}} \right] \cdot \tau_6 + \\ & + \ln \left[\frac{\sqrt{(h_2 + y)^2 + (a_{37} - x)^2}}{\sqrt{(h_2 - y)^2 + (a_{37} - x)^2}} \right] \cdot \tau_7 \end{aligned} \quad (11)$$

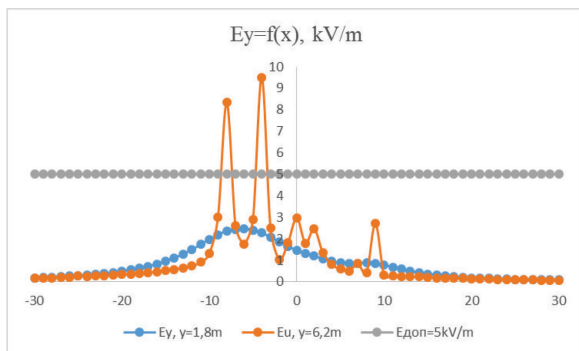
Човек, който се намира перпендикулярно на проводниците, е под въздействието на вертикалната съставляваща на електрическото поле, което означава, че трябва да се определи само E_y . Вертикалната съставляваща на интензитета на електрическото поле се определя чрез диференциране по отношение на y :

$$E_y = \left| \frac{d\varphi_M(x, y)}{dy} \right| \quad (12)$$

Определяме интензитета на височина на нивото на главата на човек, стоящ на земята ($y=1,8 \text{ m}$), и на височината на главата на човек, работещ под напрежение от изолиран кран ($y=6,24 \text{ m}$).

Съгласно резултатите от изчисленията построяваме графики на интензитета на електрическото поле, в зависимост от

разстоянието до оста на коловозите ($y=1,8$ m и $y = 6,24$ m).



Фиг. 5. Криви на зависимостта на интензитета на електрическото поле от разстоянието до оста на коловоза

Параметрите на електрическото поле зависят от разстоянието спрямо източника на излъчване. В резултат на това персоналът, който извършва работа по железопътните коловози, не е изложен на интензитет на електрическо поле, надвишаващо допустимата стойност от 5 kV/m. При работа на изолиран кран, експлоатационният персонал на контактната мрежа е изложен на електрическо поле над допустимата стойност, но само при работа на разстояние, по-малко от 0,5 m от контактния проводник. Времето за извършване на такава работа трябва да бъде ограничено в съответствие със санитарните стандарти, което е не повече от 180 минути. Необходимо е също така да се осигурят на персонала лични предпазни средства (специални костюми).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на проведените изследвания могат да се направят следните изводи:

1. Индуктираните електрически напрежения във въздушния проводник на първата линия, когато тя е изключена, на жп двуколовозна линия под въздействие на втората линия и близките въздушни линии с пониско напрежение достигат опасни стойности.

2. Индуктираните електрически напрежения във въздушния проводник на втората линия, когато тя е изключена, на жп двуколовозна линия под въздействие на първата линия и близките въздушни линии с пониско напрежение достигат опасни стойности.

3. При работа на кран под работещи две линии на двуколовозен път, експлоатационният персонал на контактната мрежа е изложен на електрическо поле над допустимата стойност, но само при работа на разстояние по-малко от 0,5 m от контактния проводник.

REFERENCE

- [1] НАРЕДБА № 58 от 2.08.2006 г. за правилата за техническата експлоатация, движението на влаковете и сигнализацията в железопътния транспорт // NAREDBA № 58 от 2.08.2006 g. za pravilata za tehničeskata eksploataciya, dvizhenieto na vlakovete i signalizacijata v zhelezopatniya transport;
- [2] IEC 62236-1:2008, Electromagnetic compatibility of technical equipment. Railway systems and equipment.
- [3] Бессонов, В. А., Электромагнитная совместимость: учеб. Пособие, Хабаровск, Издательство ДВГУПС, 2000 // Bessonov, V. A. Elektromagnitnaya sovmestimosty: ucheb. Posobie, Habarovsk, Izdatelstvo DVGUPS, 2000;
- [4] Бадер, М. П., Электромагнитная совместимость, учебник для вузов, УМК МПС, 2002, 638 с. // Bader, M. P., Elektromagnitnaya sovmestimosty, uchebnik dlya vuzov, UMK MPS, 2002, 638 s.
- [5] Крюков, А. В., В. П. Закарюкин, Н. В. Буякова, Расчет электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями электрофицированных железных дорог, Вестник “Иркутского государственного технического университета”, № 1(48), 2011 // Krjukov, A. V., V. P. Zakarjukin, N. V. Buyakova, Raschet elektromagnitnih poley, sozdavaemah tyagovaimi setyami elektroficirovannaih zheleznaih dorog, Vestnik “Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta”, № 1(48), 2011;
- [6] Крюков, А. В., В. П. Закарюкин, Н. В. Буякова, Моделирование электромагнитных полей на железнодорожных станциях, Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, № 1, 2009 // Krjukov, A. V., V. P. Zakarjukin, N. V. Buyakova, Modelirovanie elektromagnitnih poley na zheleznodorozhnaih stanciyah, Nauchnaie problemai transporta Sibiri i Dalynego Vostoka, № 1, 2009;

- [7] Крюков А.В., В. П. Загорюкин, Д. С. Кобычев, Моделирование электромагнитных влияний контактной сети железных дорог на смежные линии электропередачи, Иркутск, 2009, 5с. // Krjukov A.V., V. P. Zakorjugin, D. S. Kobachev, Modelirovanie elektromagnitnih vliyaniy kontaktnoy seti zheleznaih dorog na smezhnie linii elektroperedachi, Irkutsk, 2009, 5s.
- [8] Abdulaziz and N. K. Gupta, "Application of FDTD method in induced voltage calculations in ac electrified railways," in SAIEE Africa Research Journal, vol. 96, no. 1, pp. 67-72, March 2005, doi: 10.23919/SAIEE.2005.9488151.
- [9] Gankova-Ivanova Zw., Wirtschaftliche Herausforderungen der Digitalisierung der Energetik, 30 Years FDIBA, Proceedings of the 9th FDIBA Conference, Sofia, Bulgaria, 26-27 November, 2020, S. 51-54
- [9] Mellitt B, Allan J, Shao Z Y, "Computer-based Methods for Induced-voltage Calculations in AC Railways", IEE Proc., Volume 137, Issue 1, January 1990, p. 59 – 72, DOI: 10.1049/ip-b.1990.0006 , Print ISSN 0143-7038, Online ISSN 2053-7913.