

---

## **ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ ЧРЕЗ МОДЕЛИРАНЕ В СРЕДАТА НА MATLAB НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ЛЕДОТОПЕНЕ ПРИ ТЯГОВИ КОНТАКТНИ МРЕЖИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК – ЧАСТ III**

**Любомир Секулов, Никола Стамболиев**  
[res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg), [nstamboliev@abv.bg](mailto:nstamboliev@abv.bg)

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“*  
*София, ул. „Гео Милев № 158*  
*РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

**Ключови думи:** железопътен транспорт, контактна мрежа, обледяване, влаково движение

**Резюме:** Контактните мрежи за променлив ток са специални конструкции и основното им предназначение е да пренасят електрическа енергия от тяговите подстанции (ТП) до електрическите товари. Те захранват електрическите транспортни средства чрез осъществяване на непрекъснат електрически контакт между контактната мрежа и токоснемателя на транспортното средство. Тяговите контактни мрежи работят при изключително тежки метеорологични и експлоатационни условия, като върху тях непрекъснато действат различни постоянни и променливи електрически и механични сили, породени от загряване, собственото тегло, опъването на проводниците, натиска на токоприемника и други. Те се експлоатират на открито, поради което върху тях агресивно въздействат и атмосферните фактори - температурни изменения, вятър, сняг и заледяване.

Метеорологичните условия през зимния период подпомагат заледяването на проводниците, в частност образуването на ледена обвивка (кора) върху контактния проводник. По този начин се влошава токоснемането, което от своя страна е предпоставка за нарушаване на графика за движение и пропускателната способност на участъка от железопътната инфраструктура.

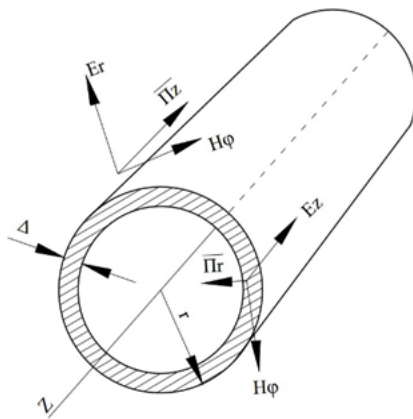
Въпреки, че през последните няколко години в нашата страна зимните периоди не са толкова агресивни, има проблемни железопътни участъци, в които ледообразуването по контактния проводник е значително и създава описаните по-горе проблеми. Известни са редица механични и електрически методи за борба с ледообразуването по контактната мрежа.

За целите на изследването е избран конкретен проблемен участък от контактната мрежа на ЖП транспорт у нас, характеризиращ се с чести обледявания на контактната мрежа и нарушаване на графика на движение. В настоящия доклад (част III), са изследвани конкретни електрически параметри, ограничаващи ледообразуването при използване на честотен метод, характеризиращ се с малки токове и високи честоти, при нормално захранване на участъка от сфазирани подстанции. Поради невъзможност изследването да бъде направено в реални

експлоатационни условия е избран метод, посредством моделиране на изследвания обект с реалните му параметри в средата на Matlab. Направена е верификация на получените резултати с тези от проведено аналитично изследване. [1]

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Поради невъзможност изследването да бъде направено в реални експлоатационни условия е избран метод, посредством моделиране на изследвания обект с реалните му параметри (железопътния участък между подстанции Червена вода и Разград) в средата на Matlab. Направена е верификация на получените резултати с тези от проведено аналитично изследване. Моделирането е направено в рамките на три етапа: при сфазирани подстанции(част I); при несфазирани подстанции (част II); честотен метод (част III).

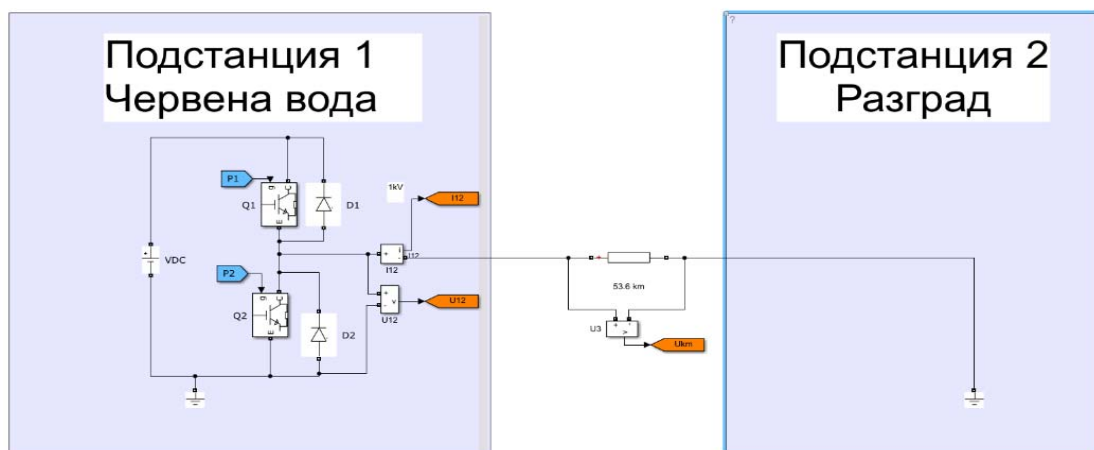


Фигура 1

В настоящия доклад се разглежда електрически метод за разтопяване на залежаванията базиращ се на “skin” ефекта посредством моделиране в средата на Matlab-Simulink. На фиг.1 е показано графично явлението за идеален кръгъл проводник.  $Z$  е оста на проводника,  $r$  е радиуса,  $\Delta$  е дълбочината на повърхностния ефект, векторите  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  и  $\vec{J}$ , които характеризират разпределението и посоката на магнитното и електрическото поле в проводника.

## 2. СИМУЛАЦИЯ НА MATLAB НА УЧАСТЪКА ОТ РАЗГРАД ДО ЧЕРВЕНА ВОДА

Основните характеристики на КМ в дадения участък са показани в част I и част II от доклада. На фиг.2 е показана електрическата схема на симулирания участък между Разград и Червена вода с разпределени параметри на КМ.



Фиг. 2 Електрическа схема на симулирания участък

В подстанция 1 е присъединен на КМ мощен високочестотен генератор на правоъгълни импулси с коефициент на запълване  $\gamma=0.5$  за всички извършени симулации. Захранването на генератора е осъществено с идеален източник на напрежение със стойност 25kV DC. Изборът е направен за да може по прегледно да се направи сравнителен анализ с резултатите от докладите I и II част. На изхода на генератора са

присъединени измерители на напрежение и ток. За целите на доклада се приема, че ОСП е включено. В подстанция 2 КМ е свързана към релса с подходяща апаратура. Направени са симулации за различни честоти в диапазона от 2 kHz до 200 kHz. [2]

Зависимостта на температурата на проводника от КМ над околната среда е показана в I и II част от доклада. Използват се известни формули от теорията на електромагнитното поле.

Уравнението за магнитна проницаемост има следния вид:

$$(1) \quad \mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}, \text{ където:}$$

$\mu_a$  – абсолютна магнитна проницаемост, Н/м

$\mu_0$  – абсолютна магнитна проницаемост във вакуум, Н/м

Величината  $\Delta$  - дълбочина на повърхностния ефект се изразява в следната зависимост:

$$(2) \quad \Delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \mu_a}}, \text{ mm, където:}$$

$\rho$  – специфично съпротивление на проводника,  $\Omega \cdot \text{m/mm}^2$

$\omega$  - кръгова честота,  $\text{rad}^{-1}$

Ако радиусът  $r \gg \Delta$ , то за активното съпротивление  $R_1$  в зависимост от дълбочината на повърхностния ефект е

$$(3) \quad R_1 = \frac{\rho}{S_c} = \frac{\rho}{2\pi r \Delta}, \Omega, \text{ където}$$

$r$  – радиус на проводника, mm

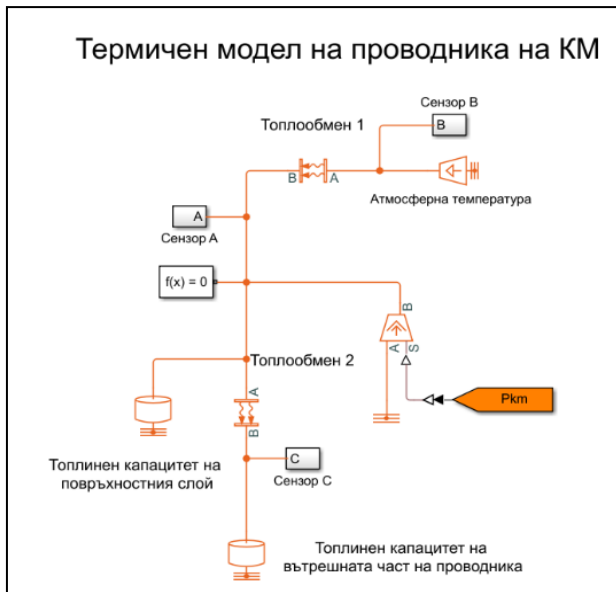
$S_c$  – напречно сечение на повърхностния (скин) слой на проводника,  $\text{mm}^2$

Реактивното съпротивление при силно изразен скин ефект е равно на активното и за комплексното съпротивление  $Z_1$  е валидна зависимостта:

$$(4) \quad Z_1 = R_1 + iX_1 = \frac{\rho(1+i)}{2\pi r \Delta} = R_{01} \cdot \frac{r}{2\Delta} \cdot (1+i), \Omega [3]$$

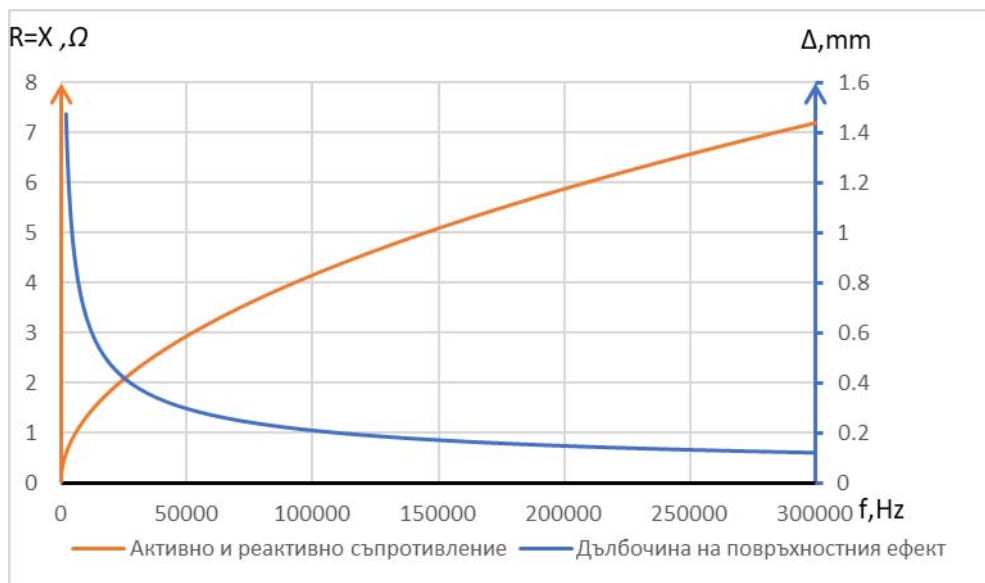
В конкретния разглеждан случай това комплексно съпротивление трябва да се добави към вече известното от част I и част II на доклада, което включва релсата и носещите въжета. Поради сложната форма на релсата и структурата на носещите въжета резултатите се отнасят само до проводника на КМ. От теорията и известните формули показани по-горе се установява че увеличаването на честота намалява дълбочината на повърхностния ефект и увеличава комплексното съпротивление. Симулациите, които са направени установяват конкретни зависимости в изследвания участък. [4]

Разработен е термичен модел на Matlab-Simscape на проводника на КМ показан на фиг. 3. В него са заложени параметрите на КМ от изследвания участък. В моделът се използват резултатите от формули 1-4 за "skin" ефекта. В термичния модел не са заложени параметри на вятъра, неговата посока спрямо КМ, както и неговата скорост. Също не са отчетени дебелината на леда, масата и температурата му. Предвид голямата дължина на участъка тези параметри са променливи и тяхното използване не би довело до коректни резултати. Симулацията разглежда проводника на КМ като два отделни елемента, които имат различни физични параметри и които се променят във функция от честотата на подаваното напрежение от подстанция 1. Измерват се температурите във



**Фиг. 3 Термичен модел на проводника на КМ**

на напрежението на генератора за конкретния участък. Активното и реактивното съпротивление според формула 4 при високи честоти е еднакво. Със синьо е изразена функцията на активното съпротивление, с червено е дълбочината на повърхностния ефект.

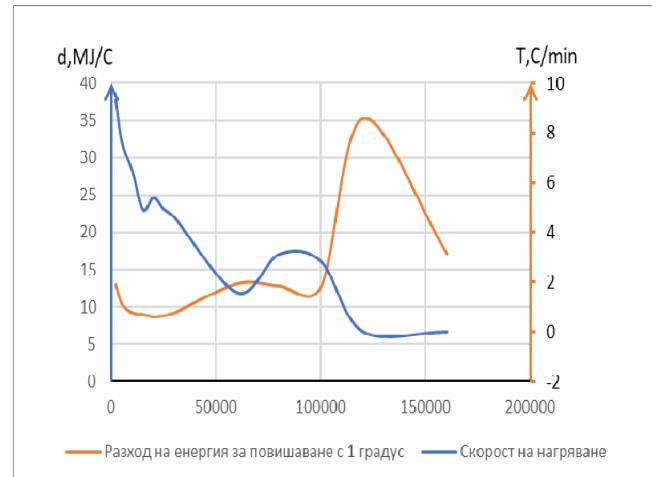


**Фиг. 4 Комплексно съпротивление и повърхостен ефект във функция от честотата**

В Таблица 1 са показани резултатите от симулацията при различни честоти на нагряване. В първата колона е честотата в Hz, във втората дълбочината на повърхностния ефект  $\Delta$  в mm, в третата стойностите на активното и реактивното съпротивление  $R_{01}$  на КМ в  $\Omega$ , в четвъртата скоростта на нарастване на температурата за първата минута от нагряването, в шестата колона от таблицата разхода на енергия за нагряване. На фиг.5 е изобразена зависимостта на разхода на енергия за първата минута от нагряването и скоростта на нагряването във функция от честотата.

Таблица 1

Честота Hz	$\Delta$ mm	$R_{01}$ $\Omega$	Скорост $^{\circ}\text{C}/\text{min}$	Разход MJ/min
2000	1.473729	0.593388	9.31	120.79
5000	0.940675	0.929645	7.6	78.64
10000	0.665593	1.313856	6.44	59.25
15000	0.5436	1.60871	4.91	44.04
20000	0.470657	1.858027	5.39	46.72
25000	0.42116	2.076392	4.92	43.34
30000	0.384389	2.275021	4.6	42.36
60000	0.271807	3.217339	1.57	20.58
80000	0.235399	3.714939	3.12	39.96
100000	0.210536	4.153657	2.82	35.89
120000	0.192197	4.549986	4.48E-08	1.58E-06
160000	0.166445	5.253948	9.13E-08	1.57E-06



Фиг.5 Разход на енергия и скорост на нагряване във функция от честотата

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разглежданият в доклада честотен метод за ледотопене може да бъде използван само при известни параметри на КМ. От направената симулация на Matlab-Simulink за участъка от подстанции Червена вода до Разград, съгласно получените резултати в таблица 1 и фиг. 5 и направения анализ, може да се определи скоростта на нагряване на проводника на КМ и разхода на енергия необходима за повишаване на температурата му с  $1^{\circ}\text{C}$ . Чрез симулацията най-ефективно ледотопене за конкретния участък се установява около честота 15 kHz или 60 kHz. При честота 15 kHz, разходът на енергия е най-нисък, като съотношението разход на енергия към скорост на ледотопене е най-добро при честота около 60 kHz. При честоти над 100 kHz реактивното съпротивление рязко нараства, токовете намаляват и не може да бъде получена необходимата ефективност за нагряване на проводника на КМ.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Исаев Я., М. Томчева. Проектиране на енергоефективно захранване за електрически транспортни средства., Научна конференция с международно участие на тема „Приоритетите в транспорта – през моя поглед” („Младежки форум – 2014”), 2014г.
- [2] Ирена Божичкова, Мартин Златков, Петко Костадинов, Здравко Бакалов – „Ремонт и модернизация на високоволтова изпитвателна уредба 50kV-50Hz“, 2019.05.16. - ВТУ Младежки Научен Форум „АЗ ЗНАМ И МОГА!” - Научно списание, „Механика Транспорт Комуникации”, ISSN 2367-6612 (print) том 8, брой 1, 2019 г. стр. X-1 - X-5 статия № 1768 ISSN 2367-6558 (online) <https://mtc-aj.com/library/1768.pdf>, 2019г.
- [3] В.В. Никольский – „Теория електромагнитного поля“, Государственное издательство „Высшая школа“, Москва, 1961 г.
- [4] Лалев Т., Ив. Миленов. Проектиране на цифрова релейна защита за тягови електрически вериги за постоянен ток, Научно списание Механика Транспорт Комуникации том 12, брой 3/2, 2014 г. статия № 1008, ISSN 1312-3823, 2014г.
- [5] Лалев Т. Моделиране посредством MATLAB Simulink на аварийни режими в тяговите електрозахранващи вериги на „Метрополитен“ ЕАД, ФНСТ, Дванадесета национална младежка научно-практическа конференция 2014, Сборник доклади14 - 15 април 2014 г., 2014г.

# INVESTIGATION AND ANALYSIS THROUGH MODELING IN THE MATLAB ENVIRONMENT OF THE POSSIBILITIES OF ICE MELTING IN AC ACTIVE TRAIN NETWORKS - PART III

**Lubomir Sekulov, Nikola Stamboliev**

[res\\_start@abv.bg](mailto:res_start@abv.bg), [nstamboliev@abv.bg](mailto:nstamboliev@abv.bg)

**Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA**

**Key words:** *railway transport, overhead contact line, ice, train movement*

**Abstract:** *AC OCLS are special constructions and their main purpose is to transmit electricity from traction substations (TP) to electrical loads. They supply electric vehicles by making continuous electrical contact between the catenary and the pantograph of the vehicle. Traction contact networks operate in extremely severe meteorological and operational conditions, and they are constantly exposed to various constant and variable electrical and mechanical forces caused by heating, own weight, wire tension, pantograph pressure, etc .. They are operated outdoors, due to which they are aggressively affected by atmospheric factors - temperature changes, wind, snow and icing.*

*The meteorological conditions during the winter period support the icing of the conductors, in particular the formation of an ice shell (crust) on the contact conductor. In this way, the current collection deteriorates, which in turn is a prerequisite for the violation of the traffic schedule and the capacity of the section of the railway infrastructure.*

*Although in the last few years in our country the winter periods are not so aggressive, there are problematic railway sections in which the ice formation on the contact wire is significant and creates the problems described above. A number of mechanical and electrical methods for combating ice formation on the catenary are known.*

*For the purposes of the study, a specific problematic section of the contact network of railway transport in our country was selected, characterized by frequent icing of the contact wire and violation of the traffic schedule. In the present report (part III), specific electrical parameters limiting ice formation using a frequency method characterized by low currents and high frequencies, under normal power supply of the phased substation section, are investigated. Due to the impossibility to perform the research in real operating conditions, a method was chosen by modeling the studied object with its real parameters in the Matlab environment. Verification of the obtained results was made with those of the conducted analytical research.*