

A. O. КАСИМОВ, A. K. БЕЙСЕТАЕВА, С. Е. ТУРАБЕКОВА

(Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан)

ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ ӨЗГЕРЕТИН ҚҰРЫЛҒЫЛАРДА ЖҮКТЕЛГЕН ШЕТКІ ҰЗЫНДЫҚТЫ КАБЕЛЬГЕ ИМПУЛЬСТІ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІ ӘСЕРДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІСІ

Аннотация. Телекоммуникациялық беріліс жүйесінің әртүрлі бағыттарында қолданылатын кернеу мен токтың уақыттық формасын есептеудегі импульсті электромагнитті өріс әсері қарастырылған. Бұл әдіс ток пен кернеудің уақыттық формасын есептеу барысындағы уақытты азайтады және есептеу дәлдігін қамтамасыз етеді.

Тірек сөздер: импульсті электромагниттік әсерлер, ток пен кернеудің уақыттық формасы.

Ключевые слова: импульсно-электромагнитное влияние, временная форма напряжений и тока.

Keywords: pulsed electromagnetic interference, temporary form of voltage and current.

Дифференциалды теңдік жүйесінде сыртқы электромагнитті әсерді есептеу үшін E_x электр өрісінің бойлықтық кернеулігі атты шама енгізіледі. Бұл жағдайда біртекті емес дифференциалды теңдік жүйесі жазылады және есептелінеді. Қарастырылып отырған жағдайда, жүйеге уақыт бойынша өзгеретін электрлік өрістің кернеулігі әсер ететін болса, онда сымдардағы ток пен кернеу уақытқа тәуелді болады [1]. Көбінесе бірфазалы сызық ретінде көрсетілетін кабельді сызық пен әуелік тізбектің электр көзімен қамтамасыз етілуін қарастыра отырып, байланыс сызығындағы импульсті электромагнитті әсердің физикалық үлгісі негізінде «сым-жер» жүйесі үшін математикалық үлгісін құрамыз [2].

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial U_1}{\partial x} &= R_1 I_1 + L_1 \frac{\partial I_1}{\partial t} - E_x(t) \\ -\frac{\partial I_1}{\partial x} &= G_1 U_1 + C_1 \frac{\partial U_1}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

мұндағы, R_1 , L_1 , G_1 , C_1 – сымның электрлік параметрлері; $E_x(t)$ – сым орналасқан жердегі ЭМИ сыртқы бойлықтық кернеулігі.

Сымда пайда болатын токтар мен кернеу электромагнитті өрісті өзгертуейді деп жорамал жасаймыз.

Дифференциалды теңдік жүйесінде сыртқы электромагнитті әсерді есептеу үшін E_x электр өрісінің бойлықтық кернеулігі атты шама енгізіліп, жеке туынды біртекті емес дифференциалды теңдік жүйесі жазылады. Келтірілген дифференциалды теңдік жүйесін есептеу барысында ток пен кернеудің уақыттық тәуелділіктерін анықтауда қындықтар туындаиды. Оларды анықтау үшін қазіргі таңда әлі белгісіз, тізбектің уақытқа қатысты электрлік және өзара параметрлері белгілі болуы қажет. Сол үшін уақыттық тәуелділіктерді анықтау әдістері жасалып шығарылды. Олар әсер етуші өрістің спектрлік сипаттамасын анықтауға негізделетін және соның негізінде тізбектің меншікті параметрлерін, жиіліктік аймакта корғау құрылғысы және жерге орналастыру құрылғысын

анықтау болып табылады. Нәтижесінде қарапайым біртекті емес дифференциалды теңдік жүйесі алынады. Теңдік жүйесіне кіретін сымның меншікті электрлік параметрлері жиілікке тәуелді.

Осыған байланысты жеке туынды дифференциалды теңдік жүйесін қарапайым біртекті емес дифференциалды теңдік жүйесіне өтуге болады.

Кернеу мен токтың кешенді мәндерін ескеріп,

$$U_1 = |U| \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}, \quad I_1 = |I| e^{j(\omega t + \varphi)},$$

аламыз

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dU_x}{dx} &= I_1 z_1(j\omega) + \dot{E}_x(j\omega) \\ -\frac{dI_x}{dx} &= U_1 Y(j\omega)_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

мұндағы, z_1 – 1-ші тізбектің толық бойлықтық кедергісі.

Теңдіктің жазылуын қысқарту үшін келесі мәндерді белгілейміз:

$$\begin{aligned} \frac{dU(j\omega)}{dx} U', \frac{dI(j\omega)}{dx} I', \\ U(j\omega) = u, I(j\omega) = i, E(j\omega) = E, \\ Z(j\omega) = Z, Y(j\omega) = Y. \end{aligned} \quad (3)$$

(2) жүйесі келесідей сипатқа ие болады:

$$\left. \begin{aligned} U' + iZ + E e^{-\gamma_1 x} &= 0 \\ I' + uY &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Теңдіктің біртекті жүйесі

$$\left. \begin{aligned} -\frac{dU_x}{dx} &= I_1 z_1(j\omega) \\ -\frac{dI_x}{dx} &= U_1 Y(j\omega)_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Жүйенің жалпы шешімі (2) біртекті жүйе теңдігінің (5) жалпы шешімінің суперпозициясы және біртекті емес жүйе теңдігінің (4) жеке шешімі ретінде анықталады және келесідей жазылады:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} &= N(j\omega) e^{-\gamma_1(j\omega)x} + C_1(j\omega) e^{\gamma(j\omega)x} + C_2(j\omega) e^{-\gamma(j\omega)x} \\ \dot{I} &= \frac{1}{Z_B(j\omega)} (-C_1(j\omega) e^{\gamma(j\omega)x} + C_2(j\omega) e^{-\gamma(j\omega)x}) + M(j\omega) e^{-\gamma_1(j\omega)x} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Мұндағы

$$N(j\omega) = \frac{\dot{\gamma}_1(j\omega) E(j\omega)}{\dot{\gamma}_1(j\omega)^2 - \dot{\gamma}(j\omega)^2}, \quad M(j\omega) = \frac{\dot{E}(j\omega) \cdot \dot{Y}(j\omega)}{\dot{\gamma}_1(j\omega)^2 - \dot{\gamma}(j\omega)^2} -$$

біртекті емес жүйенің (6) жеке шешімінің коэффициенті;

$$\begin{aligned} C_1(j\omega) &= \frac{U_H(j\omega) - N(j\omega)}{2} - \frac{Z_B(j\omega)(I_H(j\omega) - M(j\omega))}{2}, \\ C_2(j\omega) &= \frac{U_H(j\omega) - N(j\omega)}{2} + \frac{Z_B(j\omega)(I_H(j\omega) - M(j\omega))}{2} - \end{aligned}$$

тұрақты интегралдау,

$$\dot{Z}_B(j\omega) = \sqrt{\frac{\dot{R}(j\omega) + j \cdot \omega \cdot \dot{L}(j\omega)}{(\dot{G}(j\omega) + j \cdot \omega \cdot \dot{C})}} -$$

толқындық кедергі, Ом:

$$\dot{\gamma}(j\omega) = \sqrt{(R(\omega) + j \cdot \omega \cdot L(\omega))(G(\omega) + j \cdot \omega \cdot C)} -$$

әсерге ұшыраған тізбек үшін электромагнитті толқынның таралу коэффициенті, 1/км; $\dot{\gamma}(j\omega)$ – ықпал етуші әсер үшін электромагнитті толқынның таралу коэффициенті, 1/км; x – ағымдық координата, км.

Кабельдің желілері соңынан кедергімен тұйықталған $Z_H(j\omega)$ (егер $x=0$) және $Z_K(j\omega)$ (егер $x=l$; l – сзығытың ұзындығы); $Z_H \neq Z_K \neq Z_B$ [2]. Соңда

$$U_H(j\omega) = -I_H(j\omega) \cdot Z_B(j\omega) \quad (7)$$

$$U_K(j\omega) = +I_K(j\omega) \cdot Z_B(j\omega) \quad (8)$$

мұндағы, $U_H(j\omega)$ және $I_H(j\omega)$ – тізбек басындағы кернеу мен ток, $U_K(j\omega)$ және $I_K(j\omega)$ – тізбек соңындағы кернеу мен ток.

Тұрақты интегралды әсерге ұшыраған тізбектің барапқы кернеуі мен тогынсыз анықтау мүмкін емес.

Әдебиеттерде өткізгіштің меншікті және өзара параметрлерінің уақыттық тәуелділіктері жайлы мәлімет жоқ болғандықтан, кернеу мен токтың уақыттық тәуелділіктерін алу үшін, келтірілген байланыс сзығында кері Фурье түрленуінің интегралдау әдісін қолдану қажет.

Алынған шамаларды сәйкесінше, яғни (6) теңдік жүйесіне келтіріп жазамыз:

$$U(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \operatorname{Re} [\dot{N}(j\omega) \cdot e^{-\gamma_1 x} + \left(\frac{\dot{U}_H(j\omega) - \dot{N}(j\omega)}{2} - \frac{\dot{Z}_B(j\omega)(I_H(j\omega) - M(j\omega))}{2} \right) \cdot e^{\gamma_1 x} + \left(\frac{U_H(j\omega) - N(j\omega)}{2} + \frac{Z_B(j\omega)(I_H(j\omega) - M(j\omega))}{2} \right) \cdot e^{-\gamma_1 x}] \cdot \cos(\omega t) d\omega,$$

$$I(t) = \frac{\pi}{2} \int_0^\infty \operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z_B(j\omega)} \left(\frac{U_H(j\omega) - N(j\omega)}{2} - \frac{Z_B(j\omega)(I_H(j\omega) - M(j\omega))}{2} \right) \cdot e^{\gamma_1 x} + \left(\frac{U_H(j\omega) - N(j\omega)}{2} + \frac{Z_B(j\omega)(I_H(j\omega) - M(j\omega))}{2} \right) \cdot e^{-\gamma_1 x} \right] + M \cdot e^{\gamma_1 x} \sin(\omega t) d\omega. \quad (9)$$

$\sin(\omega t) d\omega$

Жалғыз әуелік сымның өзіндік параметрлерін есептеу [3]:

$$\text{тұрақты ток кедергісі, Ом/км } R_0 = 4 \cdot 10^3 \frac{\rho}{\pi d};$$

$$\text{айнымалы токтың белсенді кедергісі, Ом/км } R = R_0 k_1(x) + 2,51 \cdot 10^3 f P(y);$$

$$\text{сыртқы индуктивтілік, Гн/км } L = \left(2 \cdot \ln \left(\frac{4c}{d} \right) + 4Q(y) \right) \cdot 10^{-4};$$

$$\text{ішкі индуктивтілік, Гн/км } L_{\text{іш}} = 0,5 \cdot 10^{-4} \mu' k_2(x);$$

$$\text{бірлік тізбек сыйымдылығы, } \Phi/\text{км} \quad C = \frac{72,2 \cdot 10^{-3}}{\ln \left(\frac{4c}{d} \right)},$$

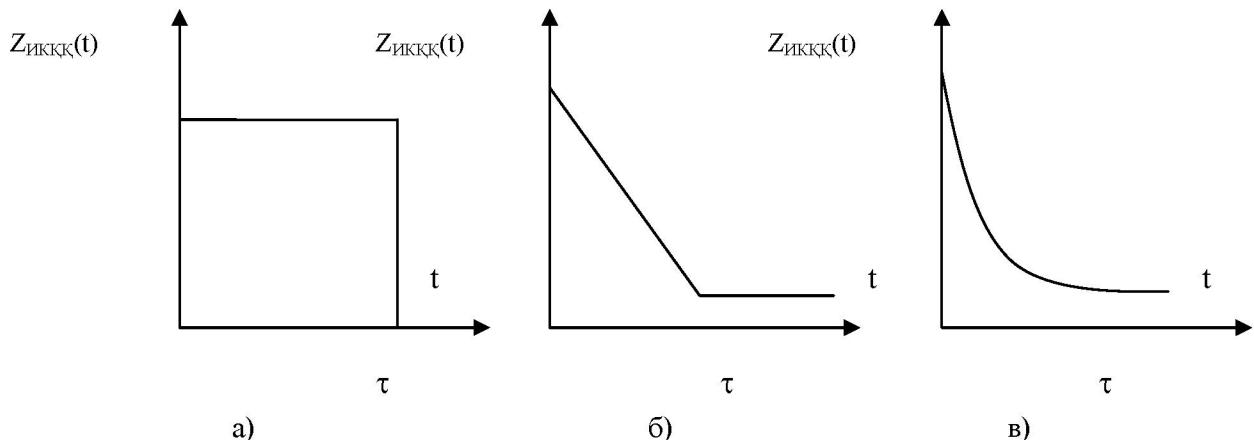
мұндағы d – байланыс сзығының диаметрі, м; ρ – сымды материалдың шекті электрлік кедергісі, Ом/м; f – ток жиілігі, Гц; μ' – сымды материалдың қатыстық магнитті өткізгіштігі; c – сым ілінуінің орташа биіктігі, м; $x = 50 - \sqrt{\frac{\mu' f}{R_0}}$; $y = 5,58c\sqrt{\sigma_k f}$; $k_1(x)$, $k_2(x)$, $P(y)$, $Q(y)$ қосымша функциялары әдебиетте келтірілген [3].

Корғау құрылғысы өзінің уақыттық техникалық сипаттамасына байланысты келесідей параметрлерге ие: қосылуға қатысты кешігү уақыты $\tau_{\text{кеш}}$ және разрядты аралықтағы ойықтың қатыстық кешігү уақыты $\tau_{\text{кат}}$. Келтірілген уақыттық параметрлер телекоммуникациялық жүйе тізбегінің кірісіне енсін кернеу ұлғаюының деңгейін аныктайды.

$Z_{\text{икк}}$ импульсті кернеу ұлғаюынан қорғау құрылғысының кедергісі бірінші тарауда келтірілген талдауға сәйкес келесідей формада жазуға болады:

$$Z_{\text{икк}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{егер } t < 0 \\ Z_{\text{икк}} & \text{егер } 0 < t < \tau_{\text{кеш}} \\ 0 & \text{егер } t > \tau_{\text{кеш}} \end{cases} \quad (10)$$

Мұндағы $Z_{\text{икк}}(t)$ – импульсті әсердің ағымдық уақыты.



Корғау құрылғысы кедергісінің уақытқа қатысты тәуелділігі

Алынған тәуелділік (а-сурет) ток арнасының бір сэтте толығуын көрсетеді. Ол қорғау құрылғысының нақты жұмысын көрсетпейді. Алайда қорғау құрылғысы кедергісінің өзгерісіне әсер ететін (температура, иондаушы сәуле әсері, электрод пен газ құрамы материалы) факторларды алу үшін $Z_{\text{икк}}$ өзгерісін полином түрінде елестетуге болады (б-сурет).

$$Z_{\text{икк}}(t) = 20t^4 - 280t^3 + 1420t^2 - 3080t + 2420 \quad (11)$$

$Z_{\text{икк}}$ қорғау құрылғысы кедергісі өзгеруінің экспоненциалды функциясы:

$$Z_{\text{икк}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{егер } t < 0 \\ Z_{\text{икк}} \cdot e^{\alpha t} & \text{егер } t > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Мұндағы α – қорғау құрылғысы ток арнасының толу деңгейін сипаттайты (в-сурет).

Алынған уақыттық тәуелділікті (5) жиіліктік аумактар есептері үшін келтіреміз:

$$Z_{\text{икк}}(j\omega) = |Z_{\text{икк}}| \cdot (1 - e^{-j\omega\tau_{\text{кеш}}})$$

Бұл әдісті қолдану арқылы әртүрлі ТБЖ жүйесінде ескере отырып кернеу мен тоқтың уақыттық формасын есептеуге болады:

- импульсті электромагнитті әсерді;
- бағытталған жүйедегі еркін жүктемені;
- қорғау құрылғысы мен жерге орналастыру кедергісінің уақыттық параметрлерінің динамикалық сипаттамасы;
- кернеу мен тоқтың уақыттық формасын есептеуде дәлдікті жоғалтпай барынша уақытты азайту.

ӘДЕБИЕТ

1 Митрохин В.Е., Поздняков Л.Г. Математическая модель влияния импульсного электромагнитного поля на систему линейных сооружений железнодорожного транспорта. – Омск, 1991. – С. 19-25.

- 2 Михайлов М.И., Разумов Л.Д. Защита кабельных линий связи от влияния внешних электромагнитных полей. – М.: Связь, 1967. – 344 с.
3 Кравченко В.И., Болотова Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
4 Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. – М.: Транспорт, 1975. – 359 с.

REFERENCES

- 1 Mitrokhin VE, LG Pozdnjakov Mathematical model of pulsed electromagnetic field on the system of linear structures of rail transport. Omsk, 1991. P. 19-25.
2 Mikhailov MI, LD Razumov Protection of cable lines from the influence of external electromagnetic fields. M.: Communications, 1967. 344 p.
3 Kravchenko VI, Bolotov EA Letunova NI Radio electronic and powerful electromagnetic interference. M.: Radio and communication, 1987. 256 s.
4 Radchenko VD High-voltage electric traction devices. Moscow: Transport, 1975. 359 s.

Резюме

A. O. Kasimov, A. K. Beisetaeva, S. E. Turabekova

(Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева, Алматы, Казахстан)

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЛИЯНИЯ НА КАБЕЛИ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ, НАГРУЖЕННЫЕ НА УСТРОЙСТВА С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В статье были рассмотрены влияния импульсного электромагнитного поля, позволяющий выполнить расчет временных форм напряжения и тока в различных направляющих системах ТСП. Этот метод позволяет значительно сократить время расчета временных форм напряжений и тока без потери точности вычисления.

Используя этот метод, стало возможным выполнить расчет временных форм напряжения и тока в различных направляющих системах ТСП с учетом:

- импульсного электромагнитного влияния;
- произвольных нагрузок направляющей системы;
- динамических характеристик устройств защиты и временных параметров сопротивлений заземлений;
- значительно сократить время расчета временных форм напряжений и тока без потери точности вычислений.

Ключевые слова: импульсно-электромагнитное влияние, временная форма напряжений и тока.

Summary

A. O. Kasimov, A.K. Beisetaeva, S.E. Turabekova

(Kazakh national technical university after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan)

MATHEMATICAL MODELS OF PULSED ELECTROMAGNETIC IMPACT ON CABLES FINITE LENGTH LOADED ON WITH VARIABLE DYNAMIC CHARACTERISTICS

The article examined the influence of pulsed electromagnetic field that allows to perform the calculation of temporary forms of voltage and current in a variety of directing systems TSP. This method significantly reduces the time of calculating temporary forms of voltage and current without loss of precision.

Using this method, it was possible to perform calculation of temporary forms of voltage and current in a variety of guides TSP systems taking into account:

- pulsed electromagnetic interference;
- arbitrary loads rail system;
- dynamic characteristics of protection devices and temporal parameters of the grounding resistance;
- significantly reduce the computation time of temporary forms voltage and current without loss of precision.

Keywords: pulsed electromagnetic interference, temporary form of voltage and current.

Поступила 22.03.2014 г.