

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-02>

УДК 537.87

ПОШИРЕННЯ ІМПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ В КЕРІВСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

О. М. Думін, Р. Д. Ахмедов, Д. В. Черкасов

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

E-mail: dumin@karazin.ua

Надійшла до редакції 11 вересня 2018 р.

Актуальність. Надкороткі імпульсні поля при розповсюдженні концентрують енергію в малому часовому проміжку в обмеженому просторі, що може викликати нелінійні явища. Вивчення впливу нелінійних явищ впродовж розповсюдження на форму імпульсів допоможе уникнути труднощів ідентифікації сигналів за їх формою, як наприклад, методом фільтра Калмана.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження впливу керівської нелінійності на перехідну функцію антени з круговою апертурою та рівномірним розподілом струму. З огляду на те, що форма імпульсу залежить від координат точки спостереження, задля спрощення постановки задачі, розглянемо лише випадок, коли точка спостереження знаходиться на поздовжній осі випромінювача.

Матеріали та методи. У якості об'єкта дослідження виступає електричне поле, що випромінюється антеною з круговою апертурою та розповсюджується в нелінійному керівському середовищі. Розв'язок прямої задачі електродинаміки, а саме, породження поля нестационарним електричним струмом, здійснюється методом еволюційних рівнянь. Розв'язання нелінійної задачі випромінювання здійснюється застосуванням теорії збурень. Чисельне інтегрування невластних інтегралів для отримання нелінійної поправки для електричного поля здійснюється квадратурними методами з урахуванням необмеженості проміжку інтегрування. В якості прикладу нелінійного середовища розглянута кубічна модель нелінійності.

Результати. Вихідним джерелом поля є плаский диск із рівномірним розподілом нестационарного струму. Метод еволюційних рівнянь застосовано для розв'язання задачі випромінювання такого джерела. Перевернений підхід, що полягає в аналізі лінійної частини розв'язку для ефективного обмеження області розрахунку, яка суттєво впливає на формування результуючого поля. Оцінено вплив слабкої нелінійності керівського середовища на форму випроміненого нестационарного імпульсу.

Висновки. Надширокопasmовий сигнал при розповсюдженні крізь керівське середовище проявляє значний самовплив, змінюючи свою форму, причому додаткові складові формують затримку у часі приходу і мають форму, що нагадує першу похідну від збуджуючого струму.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: слабка нелінійність, керівське середовище, плаский диск, часова область, метод еволюційних рівнянь

IMPULSE ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION IN KERR MEDIUM

O. M. Dumin, R. D. Akhmedov, D. V. Cherkasov

V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, 61022, Kharkiv, 4 Svobody Sq.

Background: Propagating ultrashort impulse fields concentrate energy in a small time interval in a limited space that can cause nonlinear phenomena. The study of the influence of nonlinear phenomena on the shape of pulses during propagation will help to avoid the difficulties in the signal identifying by their shape, such as the Kalman filter method.

Objectives: The aim of the work is to study the effect of Kerr nonlinearity on the step response of the antenna with a circular aperture and uniform current distribution. Given that the shape of the pulse depends on the coordinates of the observation point, to simplify the problem, consider the case when the observation point is on the longitudinal axis of the radiator.

Materials and methods: The object of the study is an electric field radiated from the antenna with the circular aperture and propagating in a Kerr nonlinear medium. The solution of the direct electromagnetic problem of electrodynamics, namely, the generation of a field by transient electric current, is carried out by the method of evolutionary equations. The nonlinear radiation problem is solved using the perturbation theory. Numerical integration of improper integrals to obtain the nonlinear correction for the electric field is carried out by quadrature methods, taking into account the unbounded integration interval. A cubic model of nonlinearity is considered as an example of a nonlinear medium.

Results: The initial source of the field is a flat disk with a uniform distribution of transient current. The method of evolutionary equations is applied to solve the problem of radiation of such a source. The approach that consists of the analyzing of the linear part of the solution to effectively limit the calculation domain, which significantly affects on the formation of the resulting field was verified. The influence of weak nonlinearity of the Kerr medium on the shape of the radiated transient pulse is estimated.

Conclusion: the ultrawideband signal propagating through the Kerr medium shows significant self-influence changing its shape. The additional components form a delay in the arrival time and have a shape resembling the first derivative of the exciting current.

KEY WORDS: weak nonlinearity, Kerr medium, plane disk, time domain, evolutionary equation method

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ В КЕРРОВСКОЙ СРЕДЕ

А. Н. Думин, Р. Д. Ахмедов, Д. В. Черкасов

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

Актуальность. Сверхкороткие импульсные поля при распространении концентрируют энергию в малом временном промежутке в ограниченном пространстве, что может вызвать нелинейные явления. Изучение влияния нелинейных явлений в процессе распространения на форму импульсов поможет избежать трудностей идентификации сигналов по их форме, как например, методом фильтра Калмана.

Цель работы. Целью работы является исследование влияния керровской нелинейности на переходную функцию антенны с круговой апертурой и равномерным распределением тока. Учитывая то, что форма импульса зависит от координат точки наблюдения, для упрощения постановки задачи, рассмотрим случай, когда точка наблюдения находится на продольной оси излучателя.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выступает электрическое поле, излучаемое антенной с круговой апертурой и распространяющееся в нелинейной среде Керра. Решение прямой задачи электродинамики, а именно, порождения поля нестационарным электрическим током, осуществляется методом эволюционных уравнений. Решение нелинейной задачи излучения проводится при помощи теории возмущений. Численное интегрирование несобственных интегралов для получения нелинейной поправки для электрического поля осуществляется квадратурными методами с учетом неограниченности промежутка интегрирования. В качестве примера нелинейной среды рассмотрена кубическая модель нелинейности.

Результаты. Исходным источником поля является плоский диск с равномерным распределением нестационарного тока. Метод эволюционных уравнений применен для решения задачи излучения такого источника. Проверен подход, заключающийся в анализе линейной части решения с целью эффективного ограничения области расчета, которая существенно влияет на формирование результирующего поля. Оценено влияние слабой нелинейности керровской среды на форму излученного нестационарного импульса.

Выводы. Сверхширокополосный сигнал при распространении сквозь керровскую среду проявляет значительное самовоздействие, изменяя свою форму, причем дополнительные составляющие формируют задержку во времени прихода и имеют форму, напоминающую первую производную от возбуждающего тока.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Слабая нелинейность, керровская среда, плоский диск, временная область, метод эволюционных уравнений.

ВСТУП

Найбільш перспективні розробки пристроїв різного призначення в галузі імпульсної радіоелектроніки спрямовані на покращення їхніх характеристик шляхом скорочення тривалості імпульсів та покращення часової форми [1-3]. Зменшення тривалості імпульсів, в свою чергу, приводить до підвищення напрямленості енергії випромінювання [4], породжуючи ефекти так званих «локалізованих хвиль» [5]. Джерело, що розглядається в роботі, також породжує локалізовану хвилю, відому як «електромагнітний снаряд» [6]. Незважаючи на аномально повільне згасання енергії «електромагнітного снаряду» з відстанню, його поява не протирічить закону збереження енергії, і цей ефект був пояснений необмеженою у просторі дальньою зоною цього випромінювача [7]. Більш того, відкрита теоретично концентрація енергії була підтверджена експериментально [8]. Формування променя з високою інтенсивністю енергії в ближній зоні [9] вздовж осі випромінювання змушує звертати увагу на виникнення нелінійних ефектів в просторі що оточує джерело. З огляду на нестационарність процесів, нелінійну задачу [10] слід розглядати саме в часовому просторі [11], що зумовлює бажання її розв'язувати методом еволюційних рівнянь [12].

Часто розв'язання нелінійних задач виконується шляхом лінеаризації стосовно деяких параметрів. В даному випадку вплив середовища на розповсюдження надкороткого імпульсу методами лінеаризації нелінійної оптики неможливий через надвелику ширину спектру сигналу. Нелінійне середовище задається поліноміальним розкладом вектору поляризації поля. Розв'язання задачі проводиться за допомоги теорії збурень [11]. Аналітичний розв'язок для кожного доданку вектору поляризації шукатимемо за допомогою методу еволюційних рівнянь. Діелектрична проникність для слабого нелінійного середовища розкладається в ряд за малим параметром та представляється у вигляді степеневого ряду [13].

$$\vec{P} = \epsilon_0 \epsilon(\vec{E}) \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} \sum_n \chi_n \vec{E}^n. \quad (1)$$

Застосовуючи метод еволюційних рівнянь для кожного доданку з (1), розглядаємо його як вторинне джерело електромагнітного поля. Таким чином, нелінійну модель зводимо до набору лінійних моделей.

Застосування теорії збурень полягає в ітеративному пошуку точного розв'язку нелінійної задачі [4]. Врахування більшої кількості доданків вектору поляризації наближає розв'язок до точного значення з урахуванням нелінійних ефектів:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' + \vec{E}'' + \vec{E}''' + \dots \quad (2)$$

Робота спрямована на демонстрацію можливості такого підходу до задач розповсюдження нестационарних хвиль в нелінійному середовищі.

РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХВИЛІ У ЛІНІЙНОМУ НАБЛИЖЕННІ

Для застосування теорії збурень необхідно знайти лінійний розв'язок. Він є головним компонентом вектору поляризації, що розглядається, а також спричинює появу вторинних джерел поля [11].

В якості зручного джерела поля для лінійного розв'язку розглянемо перехідну функцію. Таким чином, часова залежність джерела в задачі – функція Хевісайда $H(ct)$. Розподіл електричного струму від антени кругової апертури [6] буде представлено в вигляді:

$$\vec{j} = \vec{x}_0 A_0 H(ct) \delta(z) (H(\rho) - H(\rho - R)), \quad (3)$$

де \vec{x}_0 орт вектору декартової системи координат, A_0 – максимальна амплітуда збуджуючого струму, z, ρ – координати циліндричної системи. Як було зазначено вище, випромінювання джерела супроводжується ефектом «електромагнітного снаряду» [6]. Розв'язок в часовій області було отримано в наступній формі [13]:

$$\vec{E} = \frac{A_0}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon}} (\vec{\rho}_0 (I_2 - I_1) \cos \varphi - \vec{\varphi}_0 I_1 \sin \varphi), \quad (4)$$

де I_1 та I_2 – деякі невластні інтеграли [14]. На Рис. 1 побудований просторовий розподіл енергії електромагнітного поля перед круглою апертурою в двох взаємно перпендикулярних площинах. Енергія випромінювання плоского диску в ортогональних поздовжніх перерізах дасть можливість оцінити області концентрації енергії, що важливо при визначенні тих частин простору, які вносять найбільший вклад до наступного нелінійного доданка до поля в усьому просторі (1) та потребують чисельного обрахунку.

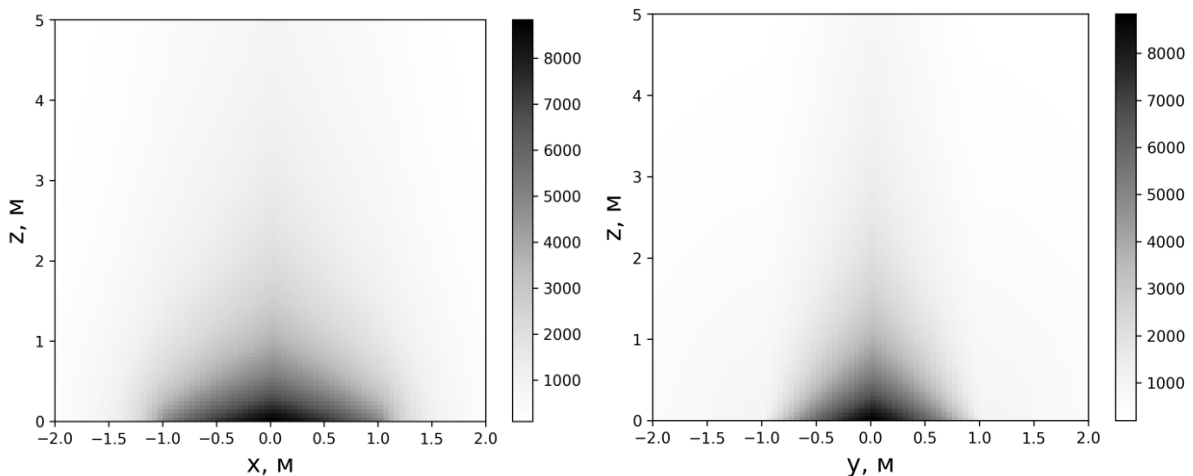


Рис. 1. Просторовий розподіл густини енергії електромагнітного поля ($\text{Дж}/\text{м}^3$) перед випромінювачем при збудженні круглої апертури рівномірно розподіленим струмом з часовою залежністю у вигляді функції Хевісайда в площині XZ (зліва) та YZ (справа).

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ПОЛЯ В КЕРІВСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянемо випадок кубічної нелінійності, тобто, коли вектор поляризації електричного поля матиме дві компоненти – лінійну та кубічну:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} + \epsilon_0 \chi_3 \vec{E}^3. \quad (5)$$

Перша компонента вектору поляризації врахована в лінійному розв'язку (4). Другий доданок формує вторинне джерело поля, що можна представити у вигляді густини електричного струму

$$\vec{j}' = \frac{\chi_3}{c} \frac{d}{dt} \{(\vec{E} \cdot \vec{E}) \vec{E}\}. \quad (6)$$

Поздовжня компонента струму j'_z відсутня. Просторово-часовий розподіл поперечних компонент струму проілюструємо на прикладі компоненти j'_x , зображеної на Рис. 2. З рисунку видно, що основний вплив на результуюче поле буде вносити нелінійне середовище в околі джерела, особливо поблизу поздовжньої вісі. Знання цього розподілу дозволяє ефективно обмежити розрахунковий простір задачі.

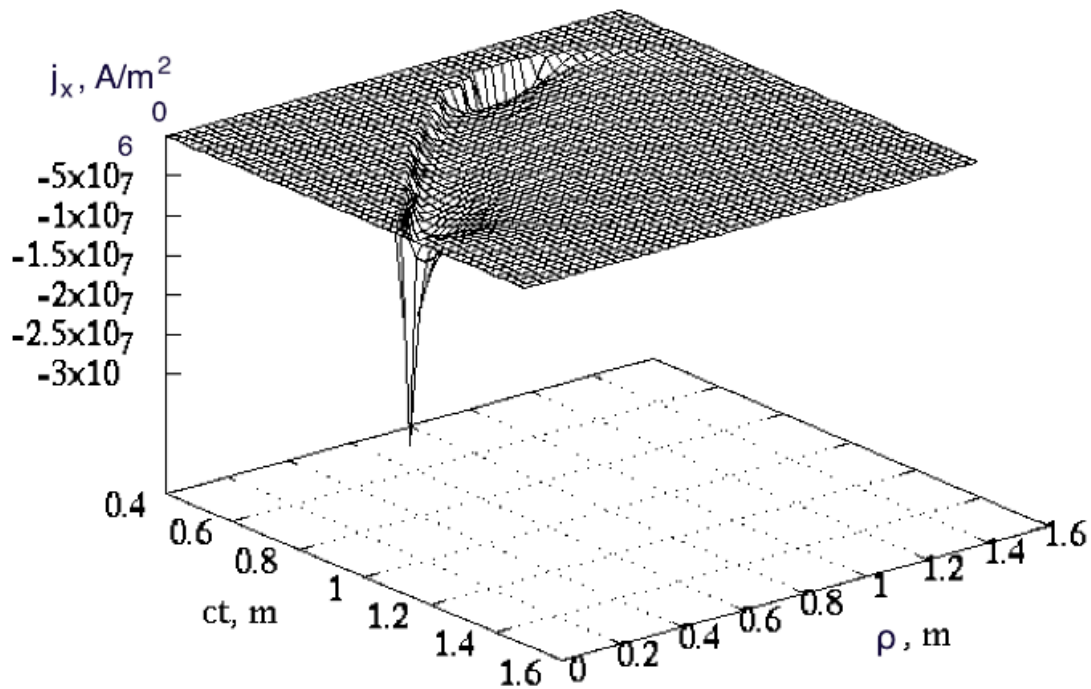


Рис. 2. Просторово-часовий розподіл поперечної компоненти густини струму джерела, породженого нелінійністю середовища.

Для отримання нелінійної поправки до електричного поля спочатку отримаємо розкладене по модовому базису вторинне джерело поля (6), а далі проведемо його згортку оператором \hat{E}_4 :

$$\hat{E}_4[f(v|t', \rho', z')] = \int_0^\infty dv \int_0^\infty d\tau' \int_0^\infty d\rho' \int_0^\infty dz' [H(\Delta\tau - \Delta z) J_0(v\sqrt{\Delta\tau^2 - \Delta z^2})]_r' f(v|t', \rho', z'). \quad (7)$$

Тоді значення поправки до лінійного електричного поля матимуть вигляд

$$E'_x = -\frac{\epsilon_0 \xi_3 A_0^3}{2 \cdot 4^3} \left(\frac{\mu_0 \mu}{\epsilon_0 \epsilon} \right)^2 \hat{\mathbf{E}}_4 \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} e_m^x(\nu|r) \cdot N_m^{sum}(\nu|r') \right], \quad (8)$$

де $e_m^x(\nu|r)$ – функція модового розподілу

$$e_m^x(\nu) = \cos \varphi \cos m\varphi (J_{m-1}(\nu\rho) + J_{m+1}(\nu\rho)) + \sin \varphi \sin m\varphi (J_{m-1}(\nu\rho) - J_{m+1}(\nu\rho)),$$

а $N_m^{sum}(\nu|r')$ – модовий коефіцієнт:

$$N_{-1}^{sum}(\nu|r') = -3N_1(-1) - N_2(-1) + 3N_3(-1) + N_4(-1);$$

$$N_1^{sum}(\nu|r') = -3N_1(1) - N_2(1) + 3N_3(1) - N_4(1);$$

$$N_{-3}^{sum}(\nu|r') = -N_1(-3) + N_2(-3) - N_3(-3) + N_4(-3);$$

$$N_3^{sum}(\nu|r') = N_1(3) + N_2(3) - N_3(3) + N_4(3),$$

де

$$N_1(m) = 3mJ_m(\nu\rho')I_1^2 \frac{\partial I_1}{\partial t};$$

$$N_2(m) = mJ_m(\nu\rho')(I_2 - I_1) \left(\frac{\partial I_1}{\partial t} (I_2 - I_1) + 2I_1 \left(\frac{\partial I_2}{\partial t} - \frac{\partial I_1}{\partial t} \right) \right);$$

$$N_3(m) = -3\nu\rho' \frac{J_{m-1}(\nu\rho') - J_{m+1}(\nu\rho')}{2} (I_2 - I_1)^2 \left(\frac{\partial I_2}{\partial t} - \frac{\partial I_1}{\partial t} \right);$$

$$\frac{-N_4(m)}{\nu\rho'} = \frac{J_{m-1}(\nu\rho') - J_{m+1}(\nu\rho')}{2} I_1 \left(I_1 \left(\frac{\partial I_2}{\partial t} - \frac{\partial I_1}{\partial t} \right) + 2 \frac{\partial I_1}{\partial t} (I_2 - I_1) \right).$$

На основі цих формул шляхом числового інтегрування були отримані часові залежності нелінійної поправки для напруженості електричного поля у першому наближенні для випадку збудження апертури функцією Хевісайда. Часові залежності напруженості поля у лінійному наближенні та її нелінійна поправка в точці $x = y = 0, z = 2R, R=1$ м зображені на Рис. 3. Треба відмітити, що за часовою формою поправка нагадує першу похідну від лінійної частини напруженості поля, але із певною затримкою у часі, яка пояснюється інтегральним впливом певного об'єму простору, в якому напруженість лінійної складової поля велика і нелінійні явища виражені найбільш яскраво.

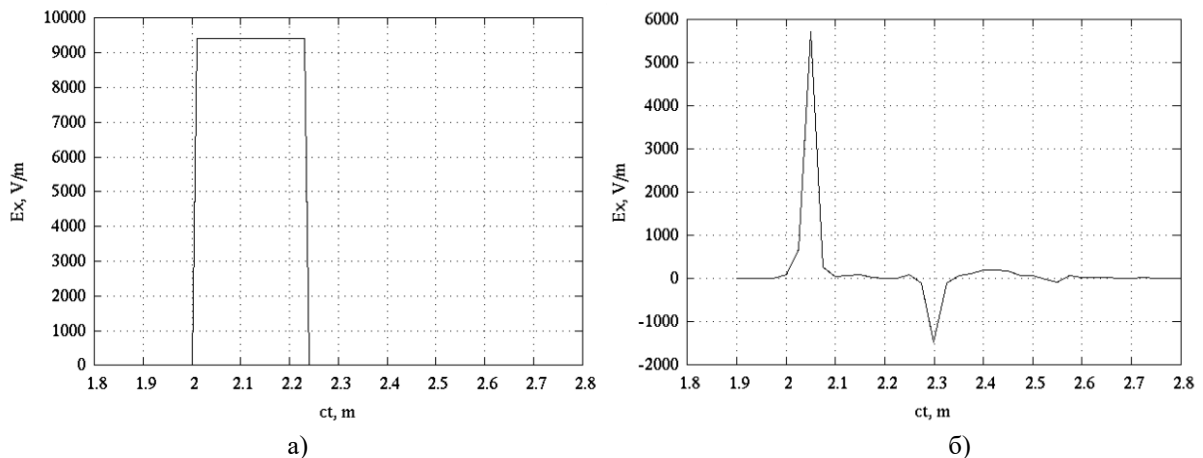


Рис. 3. Часові залежності напруженості поля у лінійному наближенні (а) та її нелінійна поправка (б) в точці $x = y = 0, z = 2R, R=1$ м.

ВИСНОВКИ

Для випадку збудження апертури нестационарним струмом у вигляді функції Хевісайда показано, що метод малих збурень дозволяє суто в часовому просторі отримати нелінійний розв'язок

випромінювання у середовище із керівською нелінійністю. В силу нелінійного характеру процесів у середовищі та великого обсягу обчислень доцільно зменшити об'єм, що породжує нелінійні ефекти, за допомогою аналізу лінійного розв'язку задачі. За часовою формою нелінійна поправка нагадує першу похідну від лінійної частини напруженості поля. Затримка у часі з її появою у порівнянні із лінійною частиною пояснюється впливом скінченного об'єму нелінійної речовини, в якому напруженість лінійної складової поля найбільша.

Стаття містить результати досліджень НДР «Імпульсні та синусоїдальні поля у нелінійних і шаруватих електродинамічних структурах та наносистемах як перетворювачах полів і моделей елементів спінтроники» (№ держреєстрації 0117U004851, 2017–2019).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

O. M. Dumin  <http://orcid.org/0000-0001-5067-9689>

R. D. Akhmedov  <https://orcid.org/0000-0002-3819-1282>

D. V. Cherkasov  <http://orcid.org/0000-0003-0320-7923>

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Andrian Andaya Lestari, Endon Bharata, Andriyan Suksmono, A.Kurniawan, A. G. Yarovoy, L.P. Lighthart, "A Modified Bow-Tie Antenna for Improved Pulse Radiation," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on.* 58, 2010, 2184 - 2192. 10.1109/TAP.2010.2048853.
2. Shinya Takaichi, A. Mase, Y. Kogi, Kang Kim, "Application of ultrashort-pulse radar to non-destructive inspection," *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT, 2008*, 316 - 318. 10.1109/ICCT.2008.4716255.
3. A. Maimistov, "Propagation of an ultimately short electromagnetic pulse in a nonlinear medium described by the fifth-order Duffing model", *Optics and Spectroscopy.* 94., 2003, 251-257. 10.1134/1.1555186.
4. R. Akhmedov, O. Dumin, V. Katrich, "Impulse radiation of antenna with circular aperture," *Telecommunications and radio engineering, V.77 (20)*, 2018., pp.1767–1784.
5. P. Saari, O. Rebane, I. Besieris, "Energy-flow velocities of nondiffracting localized waves," *Physical Review A.* 2019, 100. 13849. 10.1103/PhysRevA.100.013849.
6. T.T. Wu, "Electromagnetic missiles," *Journal of Applied Physics* 57, 2370 (1985).
7. T. Wu, R. King, and H. Shen, "Circular cylindrical lens as a line-source electromagnetic missile launcher," *PIEEE Trans. Antennas and Propagat*, vol. 37, pp. 39–44, 1989.
8. L.G. Sodin, "Impulse radiation of antenna (electromagnetic missile)", *Radiotekhnika i elektronika*, 5(36), pp. 1014-1022, 1991 (in Russian).
9. H.G. Schantz, "Energy velocity and reactive fields", *Phil. Trans.R.Soc. A. Math. Phys. and Eng. Sc.*, 29 Oct. 2018.
10. O. Dumin, V. Katrich, R. Akhmedov, O. Tretyakov, O. Dumina, "Evolutionary Approach for the Problems of Transient Electromagnetic Field Propagation in Nonlinear Medium," 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, August 26-28 2014, (Dnipropetrovsk, Ukraine), 26-30.
11. O. Dumin, O. Tretyakov, R. Akhmedov, O. Dumina, "Transient Electromagnetic Field Propagation through Nonlinear Medium in time domain," *International Conference on Antenna Theory and Techniques*, pp. 93-95, 2015.
12. O.A. Tretyakov, "Essentials of Non-stationary and Nonlinear Electromagnetic Field Theory. Analytical and Numerical Methods" in *Electromagnetic Wave Theory*" Edited by Hashimoto M., Idemen M., and Tretyakov O.A. Tokyo, Science House Co., Ltd, 1993, 572p
13. L. Bergamin, P. Alitalo, S. Tretyakov, "Nonlinear transformation optics and engineering of the Kerr effect". *Physical Review B – (2011) PHYS REV B.* 84. 10.1103/PhysRevB.84.205103.
14. O.M. Dumin, R.D. Akhmedov, V.A. Katrich, O.O. Dumina, "Transient Radiation of Circle with Uniform Current Distribution," *Proc. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, pp. 261-265, 2017.