

ISSN 1991-3494

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

Х А Б А Р Ш Ы С Ы

ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

THE BULLETIN

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН
ИЗДАЕТСЯ С 1944 ГОДА
PUBLISHED SINCE 1944

3

АЛМАТЫ
АЛМАТЫ
ALMATY

2015

МАМЫР
МАЙ
MAY

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі

М. Ж. Жұрынов

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Айтхожина Н.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байпақов К.М.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байтулин И.О.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Берсімбаев Р.И.**; хим. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Газалиев А.М.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Дүйсенбеков З.Д.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Елешев Р.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; фил. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Нысанбаев А.Н.**; экон. ғ. докторы, проф., ҰҒА академигі **Сатубалдин С.С.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбжанов Х.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішева З.С.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Абсадықов Б.Н.** (бас редактордың орынбасары); а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Баймұқанов Д.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Байтанаев Б.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Давлетов А.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; геогр. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Медеу А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мырхалықов Ж.У.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Огарь Н.П.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Таткеева Г.Г.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Үмбетаев И.**

Р е д а к ц и я к е ñ е с і:

Ресей ҒА академигі **Велихов Е.П.** (Ресей); Әзірбайжан ҰҒА академигі **Гашимзаде Ф.** (Әзірбайжан); Украинаның ҰҒА академигі **Гончарук В.В.** (Украина); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Джрбашян Р.Т.** (Армения); Ресей ҒА академигі **Лаверов Н.П.** (Ресей); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Москаленко С.** (Молдова); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Рудик В.** (Молдова); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Сагян А.С.** (Армения); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Тодераш И.** (Молдова); Тәжікстан Республикасының ҰҒА академигі **Якубова М.М.** (Тәжікстан); Молдова Республикасының ҰҒА корр. мүшесі **Лупашку Ф.** (Молдова); техн. ғ. докторы, профессор **Абиев Р.Ш.** (Ресей); техн. ғ. докторы, профессор **Аврамов К.В.** (Украина); мед. ғ. докторы, профессор **Юрген Аппель** (Германия); мед. ғ. докторы, профессор **Иозеф Банас** (Польша); техн. ғ. докторы, профессор **Гарабаджиу** (Ресей); доктор PhD, профессор **Ивахненко О.П.** (Ұлыбритания); хим. ғ. докторы, профессор **Изабелла Новак** (Польша); хим. ғ. докторы, профессор **Полещук О.Х.** (Ресей); хим. ғ. докторы, профессор **Поняев А.И.** (Ресей); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); техн. ғ. докторы, профессор **Хрипунов Г.С.** (Украина)

Главный редактор

академик НАН РК

М. Ж. Журинов

Редакционная коллегия:

доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Н.А. Айтхожина**; доктор ист. наук, проф., академик НАН РК **К.М. Байпаков**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **И.О. Байтулин**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Р.И. Берсимбаев**; доктор хим. наук, проф., академик НАН РК **А.М. Газалиев**; доктор с.-х. наук, проф., академик НАН РК **З.Д. Дюсенбеков**; доктор сельскохоз. наук, проф., академик НАН РК **Р.Е. Елешев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор фил. наук, проф., академик НАН РК **А.Н. Нысанбаев**; доктор экон. наук, проф., академик НАН РК **С.С. Сатубалдин**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Х.М. Абжанов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **З.С. Абишева**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.Н. Абсадыков** (заместитель главного редактора); доктор с.-х. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Д.А. Баймуканов**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.А. Байтанаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А.Е. Давлетов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор геогр. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А. Медеу**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.У. Мырхалыков**; доктор биол. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.П. Огарь**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Г.Г. Таткеева**; доктор сельскохоз. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **И. Умбетаев**

Редакционный совет:

академик РАН **Е.П. Велихов** (Россия); академик НАН Азербайджанской Республики **Ф. Гашимзаде** (Азербайджан); академик НАН Украины **В.В. Гончарук** (Украина); академик НАН Республики Армения **Р.Т. Джрбашян** (Армения); академик РАН **Н.П. Лаверов** (Россия); академик НАН Республики Молдова **С. Москаленко** (Молдова); академик НАН Республики Молдова **В. Рудик** (Молдова); академик НАН Республики Армения **А.С. Сагиян** (Армения); академик НАН Республики Молдова **И. Тодераш** (Молдова); академик НАН Республики Таджикистан **М.М. Якубова** (Таджикистан); член-корреспондент НАН Республики Молдова **Ф. Лупашку** (Молдова); д.т.н., профессор **Р.Ш. Абиев** (Россия); д.т.н., профессор **К.В. Аврамов** (Украина); д.м.н., профессор **Юрген Аппель** (Германия); д.м.н., профессор **Иозеф Банас** (Польша); д.т.н., профессор **А.В. Гарабаджиу** (Россия); доктор PhD, профессор **О.П. Ивахненко** (Великобритания); д.х.н., профессор **Изабелла Новак** (Польша); д.х.н., профессор **О.Х. Полещук** (Россия); д.х.н., профессор **А.И. Поняев** (Россия); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); д.т.н., профессор **Г.С. Хрипунов** (Украина)

«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан». ISSN 1991-3494

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5551-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел. 272-13-19, 272-13-18.

www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2015

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

Editor in chief

M. Zh. Zhurinov,
academician of NAS RK

Editorial board:

N.A. Aitkhozhina, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **K.M. Baipakov**, dr. hist. sc., prof., academician of NAS RK; **I.O. Baitulin**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **R.I. Bersimbayev**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **A.M. Gazaliyev**, dr. chem. sc., prof., academician of NAS RK; **Z.D. Dyusenbekov**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **R.Ye. Yeleshev**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **T.Sh. Kalmenov**, dr. phys. math. sc., prof., academician of NAS RK; **A.N. Nysanbayev**, dr. phil. sc., prof., academician of NAS RK; **S.S. Satubaldin**, dr. econ. sc., prof., academician of NAS RK; **Kh.M. Abzhanov**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Z.S. Abisheva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.N. Absadykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **D.A. Baimukanov**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.A. Baytanayev**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A.Ye. Davletov**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A. Medeu**, dr. geogr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.U. Myrkhalykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **N.P. Ogar**, dr. biol. sc., prof., corr. member of NAS RK; **G.G. Tatkeeva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **I. Umbetayev**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

E.P. Velikhov, RAS academician (Russia); **F. Gashimzade**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **V.V. Goncharuk**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **R.T. Dzhrbashian**, NAS Armenia academician (Armenia); **N.P. Laverov**, RAS academician (Russia); **S.Moskalenko**, NAS Moldova academician (Moldova); **V. Rudic**, NAS Moldova academician (Moldova); **A.S. Sagiyan**, NAS Armenia academician (Armenia); **I. Toderas**, NAS Moldova academician (Moldova); **M. Yakubova**, NAS Tajikistan academician (Tajikistan); **F. Lupaşcu**, NAS Moldova corr. member (Moldova); **R.Sh. Abiyev**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **K.V. Avramov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine); **Jürgen Appel**, dr.med.sc., prof. (Germany); **Joseph Banas**, dr.med.sc., prof. (Poland); **A.V. Garabadzhiu**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **O.P. Ivakhnenko**, PhD, prof. (UK); **Isabella Nowak**, dr.chem.sc., prof. (Poland); **O.Kh. Poleshchuk**, chem.sc., prof. (Russia); **A.I. Ponyaev**, dr.chem.sc., prof. (Russia); **Mohd Hassan Selamat**, prof. (Malaysia); **G.S. Khripunov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine)

Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.
ISSN 1991-3494

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5551-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,
<http://nauka-nanrk.kz/>, <http://bulletin-science.kz>

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2015

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

BULLETIN OF NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSN 1991-3494

Volume 3, Number 355 (2015), 5 – 9

THE EQUATION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE ANTENNA LOOP IN ANISOTROPIC METAMATERIAL

B. K. Kudaibergenova

Eurasian national university named after L. N. Gumilyov, Astana, Kazakhstan.

E-mail: bakit91_91@mail.ru

Key words: loop antenna, anisotropic metamaterial, Maxwell's equations, electromagnetic field, Green's function.

Abstract. The paper examines the value of the electromagnetic field which resulted from using Maxwell's equation for the loop antenna in the anisotropic metamaterials.

The history of the antenna technology represents interesting yet instructive finding in the history of radio. Radiation pattern is known as the fundamental way to determine the efficiency of the antenna and its anisotropic medium properties. Even though the theory of electrodynamic vibrator was built in Gallen, Leontovich and ML Levin and others papers, the theory of electromagnetic waves in gyrotropic media still remains relevant in both theoretical and practical aspects.

As we know, media with anisotropic properties are widely used in modern radio electronics, astrophysics, plasma physics. Recently it has been found that relevant artificial anisotropic materials with desired chiral properties, which are used in the antenna feeder cable systems as well as in bulk technology integrated circuit fabrication. It should be noted that the analytical results for anisotropic media, usually provided in tensor form, devoid clear physical meaning.

УДК 621.396.674.1

ТҰЗАҚ ТӘРІЗДІ АНТЕННАНЫҢ АНИЗОТРОПТЫ МЕТАМАТЕРИАЛДАҒЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТТІК ӨРІСІНІҢ ТЕНДЕУЛЕРІ

Б. Қ. Құдайбергенова

Л. Гумилев атындағы Еуразиялық ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Тірек сөздер: тұзақ тәрізді антенна, анизотропты метаматериал, Максвелл тендеулері, электромагниттік өріс, Грин функциясы.

Аннотация. Максвеллдің аналитикалық тендеулерін қолдана отырып, тұзақ тәрізді антенна үшін анизотропты метаматериалдағы электромагниттік өріс тендеулерінің шешімдері алынды.

Анизотроптық құрамды орталардың көптеген әдебиеттерден қазіргі радиоэлектроника, астрофизика, радиотехникада кеңінен қолданылатынын білеміз [1-8].

Оптикалық анизотроптық орталар түскен сәуле әрекетіне әртүрлі бағытта әсер ету қабілетімен мінезделеді. Бұл жарық толқын өрісі әрекетінен электрлік зарядтардың ығысуынан туындайды.

Анизотропты орталарда берілген кернеуліктегі өрісте зарядтардың ығысу мәні оның бағытына байланысты болады. Бұл дегеніміз, диэлектрлік өтімділік, яғни ортаның сыну көрсеткіші жарық толқынының электрлік векторының әртүрлі бағытында әртүрлі болып келеді дегенді білдіреді.

Анизотроптық материалдарға кристалдар және монокристалдар, талшықты және графиттер, пьезокварцтар және т.б. жатады [9].

Кейінгі кезде, әсіресе антенна-фидерлық жүйелерде, сонымен қатар, үлкен көлемді схемалар жасайтын технологияларда қолданылатын жасанды анизотроптық материалдар, мысалы метаматериалдар өзекті тақырыпқа айналған [10-17].

Тапсырманың қойылымы

Максвеллдің электромагниттік теңдеулер жүйесі [18]:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} H &= j + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \operatorname{rot} E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \operatorname{div} D &= \rho \\ \operatorname{div} B &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

мұндағы E , H – электромагниттік өріс кернеуліктері; D – электрлік индукция векторы.

Анизотропты диэлектрлік ортада электрлік өріс кернеулігі мен индукция арасындағы сызықтық байланыс мына түрде беріледі [19]:

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E, \quad (2)$$

(31) өрнегі изотропты орта үшін де орындалады, бірақ изотропты ортадағыдан айырмашылығы анизотропты орталар үшін диэлектрлік өтімділік енді скалярлық шама болудан қалады. Басқаша айтқанда, анизотропты орталарда диэлектрлік өтімділік \vec{E} электр өрісі қандай бағытта әсер етіп тұрғандығымен және \vec{D} электрлік индукция векторының құраушылары қандай бағытта бақыланатындығымен анықталады.

Ал магниттік индукция векторы:

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (3)$$

Анизотропты орта екінші рангті диэлектрлік өтімділік тензорымен сипатталады:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Бұл \vec{D} электрлік индукция векторының әрбір құраушысы электр өрісі \vec{E} кернеулік векторының барлық үш құраушылары арқылы өрнектелетіндігін білдіреді:

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \varepsilon_{xx} E_x + \varepsilon_{xy} E_y + \varepsilon_{xz} E_z \\ D_y &= \varepsilon_{yx} E_x + \varepsilon_{yy} E_y + \varepsilon_{yz} E_z \\ D_z &= \varepsilon_{zx} E_x + \varepsilon_{zy} E_y + \varepsilon_{zz} E_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Диэлектрлік өтімділік тензорының басты осіне сәйкес келетін координат жүйесін таңдайтын болсақ, материалды теңдеу келесі түрде беріледі:

$$D_x = \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_x, \quad D_y = \varepsilon_0 \varepsilon E_y, \quad D_z = \varepsilon_0 \varepsilon E_z, \quad (6)$$

мұндағы $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрлік тұрақтылық; $\hat{\epsilon}$ – диэлектриктік өтімділік тензоры; j – тоқтығыздығының векторы.

Анизотропты ортада диэлектрлік өтімділік тензорын бір осьті кристалл үшін төмендегі өрнекпен жазуға болады:

$$E = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad \hat{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\frac{\partial}{\partial t}$ -ні $-i\omega$ -ге ауыстырып, бастапқы (1) теңдеуін келесі түрге ауыстыруға болады:

$$\begin{cases} \text{rot} H + i\omega D = j \\ \text{rot} E - i\omega B = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Бұл жұмыста диэлектрлік өтімділік тензорының элементтері $\hat{\epsilon}$ бір осьті кристаллға сәйкес келеді. Кристалл осі x осі бойымен бағытталған.

Электромагниттік изотроптық орта үшін Максвелл теңдеуінің Грин матрицасы белгілі. Ол Максвелл теңдеуін кез-келген токта, сонымен қатар сингулярлы жалпы функция тобында шешуге көмектеседі:

$$\begin{cases} E = E_1 + E_2 \\ H = H_1 + H_2 \end{cases} \quad (9)$$

Электромагниттік өріс спектрлі ауданға түрленгеннен кейін келесі түрде жазылады:

$$k_0^2 \tilde{j}_z, \quad (10)$$

мұндағы

$$\tilde{j} = \tilde{j}_0 + \tilde{j}_z, \quad \tilde{j}_0 = (j_x, 0, 0), \quad \tilde{j}_z = (0, j_y, j_z),$$

(9) және (10) өрнектері A_0, A_1 және A_2 векторлық потенциалдар көмегімен келесі түрде жазылады:

$$\begin{cases} E = i\omega \left(A_0 + \epsilon_x (\epsilon_x A_1) + \nabla_z \nabla A_2 + \frac{1}{k_0^2} \nabla \nabla A_1 \right), \\ H = \frac{1}{\mu \mu_0} \nabla \times \left(A_0 + \epsilon_x (\epsilon_x A_1) - \epsilon_x \frac{\partial}{\partial x} \nabla A_2 \right). \end{cases} \quad (11)$$

мұндағы A – векторлық потенциалдың құраушылары:

$$A_0 = -\mu \mu_0 j_z * \psi_0, \quad A_1 = -\mu \mu_0 j * \psi_1, \quad A_2 = -\mu \mu_0 j_z * \psi_2 \quad (12)$$

Өрнектегі «*» белгісі түйінді білдіреді.

Грин функциялары ψ_1, ψ_2 анизотропты орта үшін сәйкесінше радиус-вектор [19]:

$$\psi_1 = -\frac{\sqrt{\epsilon} \cdot e^{(ik_0 r_1(x,y,z))}}{4\pi \sqrt{\epsilon_1} \cdot r_1(x,y,z)}, \quad \psi_2 = \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon} - 1 \right) \psi_0 * \psi_1,$$

$$r_1(x,y,z) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_1(x^2 + y^2 + z^2)}},$$

мұндағы a, b – антенна өлшемдері; k – толқын саны:

$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{2\pi}{\lambda} \\ k_x &= k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon}} \end{aligned} \quad (13)$$

Түйінді есептеп, арнайы функциялар арқылы ψ_2 функциясын жазамыз:

$$\psi_2 = 1/8\pi k_0 i (e^{ik_0 x} (Ci(k_1 0 (r-x)) + isi(k_1 0 (r-x))) + e^{i(-ik_0 x)} (Ci(k_1 0 (r+x)) + isi(k_1 0 (r+x))) - e^{ik_0 x} (Ci(k_1 n (r-k_1 0 x)) + isi(k_1 n r - k_1 0 x)) - e^{i(-ik_0 x)} (Ci(k_1 n r + k_1 0 x) + isi(k_1 n r$$

мұндағы интегралданған косинус пен синус келесі түрдегідей анықталады [20]:

$$Ci(x) = \gamma + \ln(x) + \int_0^x \frac{\cos t - 1}{t} dt \quad (14)$$

$$si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt - \frac{\pi}{2}$$

$\gamma = 0,5772$ – Эйлер саны. (11) өрнекті қолдана отырып, антенна үшін дифференциалдаймыз.

Анизотропты метаматериалдағы кристалл өсіне (x) перпендикуляр тұзақ тәрізді антенна үшін электр өрісінің кернеулігі:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (E) = 1/(\epsilon_1 0 \epsilon \omega) (k_1 0^2 j_1 x + d/dx div j^*) + \psi_1 @ E_1 y = 1/(\epsilon_1 0 \epsilon \omega) (k_1 0^2 \psi_1 0 + j_1 y + d/dy div j^*) + \psi_1 1 + \\ + k_1 0^2 d/dy div j^* @ \psi_1 2 @ E_1 z = 1/(\epsilon_1 0 \epsilon \omega) (k_1 0^2 \psi_1 0 + j_1 z + d/dz div j^*) + \psi_1 1 - \end{aligned}$$

ӘДЕБИЕТ

- [1] Шаскольская М.П. Кристаллография. – М.: Высшая школа, 1984.
- [2] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982.
- [3] Рязанов М.И. Электродинамика конденсированного вещества. – М.: Наука, 1984.
- [4] Ахиезер А.И., Ахиезер И.А. Электромагнетизм и Электромагнитные волны. – М.: Наука, 1985.
- [5] Глеуконов С.К., Орынбасаров К.А., Оспан А.Т. О свойствах уравнений распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах. // Труды Межд. Симпозиума, посвящ. 100-летию со дня рождения К. И. Сатпаева. – Ч. 3. – Алматы, 1999.
- [6] Глеуконов С.К., Орынбасаров К.А., Оспан А.Т. Распространение электромагнитных волн в неоднородных анизотропных диэлектриках ромбической сингонии // Поиск. – 1999. – № 6.
- [7] Clemmow P.C. (Jun. 1963a). The theory of electromagnetic waves in a simple anisotropic medium, Proc. IEE, N 1, Jun 1963.
- [8] Clemmow P.C. (Jun. 1963b). The resolution of a dipole field in transverse electric and transverse magnetic waves, Proc. IEE, pp. 107-111, Vol. 110, No. 1, Jun 1963.
- [9] Kong J.A. (1986). Electromagnetic Wave Theory, The 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.
- [10] Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы. – электроника: НТБ, 2011.
- [11] Veselago V.G. “Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities”, Sov. Phys. Usp. 10, 509-514 (1968).
- [12] Metamaterials: Physics and Engineering Explorations/Edited by N. Engheta and R. W. Ziolkowski. Wiley-IEEE Press, 2010.
- [13] Metamaterials Handbook: Vol. I. Phenomena and Theory of Metamaterials. 926 p. Vol. II. Applications of Metamaterials. 724 p. / Ed. by F. Capolino CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.
- [14] Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // УФН. – 1967.
- [15] Радковская А.А., Прудников В.Н., Захаров П.Н., Бабушкин А.К. Волны в магнитных метаматериалах с сильным взаимодействием между элементами. – Москва, 2009.
- [16] Negative-refraction metamaterials: Fundamental Principles and Applications / Ed. by G.V. Eleftheriades K. G. Balmain. IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., 2005. 418 p.
- [17] Миттра Р. Критический взгляд на метаматериалы. – Радиотехника и электроника, 2007, том 52, № 9.
- [18] Sautbekov S.S. Radiation of Electric and Magnetic Dipole Antennas in Magnetically Anisotropic Media
- [19] Alekseyeva L.A., Sautbekov S.S. (1999). Fundamental Solutions of Maxwell's Equations. Diff. equation, Vol. 35, N 1, 125-127.
- [20] Born M. & Wolf E. (1999). Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light, 7th ed. Cambridge U. Press, Cambridge.

REFERENCES

- [1] Shaskol'skaya M.P. *Crystallography*. M.: Higher School, 1984. (in Russ.).
- [2] Landau L.D., Lifshitz E.M. *Electrodynamics of continuous medium*. M.: Science, 1982. (in Russ.).
- [3] Ryazanov M.I. *The electrodynamics of condensed matter*. M.: Nauka, 1984. (in Russ.).

- [4] Akhiezer A.I., Akhiezer I.A. *Electromagnetism and Electromagnetic waves*. M.: Nauka, 1985. (in Russ.).
- [5] Tleukenov S.K., Orynbasarov K.A., Ospan A.T. *The properties of the equations of propagation of electromagnetic waves in inhomogeneous anisotropic media*. /Proceedings of the Int. Symposium dedicated to the 100th anniversary of the birth of K.I. Satpayev. Part 3 Almaty, 1999. (in Russ.).
- [6] Tleukenov S.K., Orynbasarov K.A., Ospan A.T. *The propagation of electromagnetic waves in a nonuniform anisotropic dielectrics orthorhombic system*. Poisk. 1999. №6. (in Russ.).
- [7] Clemmow P.C. (Jun. 1963a). *The theory of electromagnetic waves in a simple anisotropic medium*, Proc. IEE. N 1. Jun 1963.
- [8] Clemmow P.C. (Jun. 1963b). *The resolution of a dipole field in transverse electric and transverse magnetic waves*, Proc. IEE, pp. 107-111, Vol. 110, N 1, Jun 1963.
- [9] Kong J.A. (1986). *Electromagnetic Wave Theory*, The 2nd ed., John Wiley and Sons, New York.
- [10] Sliusar V. *Metamaterials in antenna technology: history and basic principles*. - Electronics: NTB, 2011. (in Russ.).
- [11] Veselago V.G. *Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities*, Sov. Phys. Usp. 10, 509-514 (1968).
- [12] *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*. Edited by N. Engheta and R.W. Ziolkowski. Wiley-IEEE Press, 2010.
- [13] *Metamaterials Handbook: Vol. I. Phenomena and Theory of Metamaterials*. 926 p. Vol. II. Applications of Metamaterials. 724 p. Ed. by F. Capolino CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.
- [14] Veselago V.G. *Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ , and μ* . UFN. 1967. (in Russ.).
- [15] Radkovskaya A.A., Prudnikov V.N., Zakharov P.N., Babushkin A.K. *The waves in magnetic metamaterials with strong interactions between the elements*. Moscow, 2009. (in Russ.).
- [16] *Negative-refraction metamaterials: Fundamental Principles and Applications*. Ed. by G. V. Eleftheriades, K. G. Balmain. IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., 2005. 418 p.
- [17] Mittra R. *Critical view on metamaterials*. - Technology and Electronics, 2007, Vol. 52, № 9. (in Russ.).
- [18] Sautbekov S.S. *Radiation of Electric and Magnetic Dipole Antennas in Magnetically Anisotropic Media*.
- [19] Alekseyeva L.A., Sautbekov S.S. (1999). *Fundamental Solutions of Maxwell's Equations*. Diff. equation, Vol. 35, N 1, P. 125-127.
- [20] Born M. & Wolf E. (1999). *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, 7th ed. Cambridge U. Press, Cambridge.

УРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЕТЛЕВОЙ АНТЕННЫ В АНИЗОТРОПНОМ МЕТАМАТЕРИАЛЕ

Б. К. Кудайбергенова

Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ключевые слова: петлевая антенна, анизотропный метаматериал, уравнение Максвелла, электромагнитные поле, функция Грина.

Аннотация. С использованием аналитических уравнений Максвелла для петлевой антенны в анизотропном метаматериале получены значения электромагнитного поля. Необходимо отметить, что аналитические результаты для анизотропных сред, как правило, приводятся в тензорной форме, лишенной ясного физического содержания. Поскольку напряженности электромагнитного поля являются векторными величинами, для представления четкой физической картины целесообразно найти их векторные выражения.

Поступила 22.05.2015 г.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

www:nauka-nanrk.kz

bulletin-science.kz

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов, Т. А. Апендиев*
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 28.05.2015.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
18,2 п.л. Тираж 2000. Заказ 3.