

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

**Ф.Ф. МЕНДЕ**

доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник  
НИИ Криогенного приборостроения  
Физико-технический институт низких  
температур им. Б.И. Веркина НАН Украины  
г. Харьков, Украина  
E-mail: mende\_fedor@mail.ru

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

*Если вектор магнитного момента не совпадает с направлением магнитного поля, то такой момент осуществляет прецессионное движение. Такое движение не имеет инерции. т.к. в момент снятия магнитного поля оно мгновенно прекращается. В то же время атом, имеющий магнитный момент и помещенный в магнитное поле, обладает потенциальной энергией. Поэтому потенциальная энергия может накапливаться не только в электрических полях, а и в прецессионном движении магнитных моментов. Эта особенность позволяет ввести в электродинамику новое понятие кинетической ёмкости.*

**Ключевые слова:** магнитный момент, потенциальная энергия, прецессия, кинетическая емкость.

**F.F. MENDE**

Doctor of Technical Sciences, Senior Research  
Research institute for cryogenic instrument engineering  
B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics  
and Engineering, NAS Ukraine  
Kharkov, Ukraine  
E-mail: mende\_fedor@mail.ru

## ELECTRIC KINETIC CAPACITY

*If the vector of magnetic moment does not coincide with the direction of the magnetic field, then this moment accomplishes precession motion. This motion does not have a inertia, since it instantly ceases at the moment of removing the magnetic field. At the same time the atom, which has magnetic moment and placed into the magnetic field, possesses potential energy. Therefore potential energy can be accumulated not only in the electric fields, but also in the precession motion of magnetic moments, which does not possess inertia. This phenomenon makes it possible to introduce into the electrodynamics new the concept of kinetic capacity.*

**Key words:** magnetic moment, potential energy, precession, kinetic capacity.

Если в существующей научной литературе имеет место лишь эпизодические упоминания о том, что такое кинетическая индуктивность носителей зарядов [1...4], то о кинетической емкости до появления работы [5] известно не было.

Если учесть все составляющие плотности токов в проводнике, то второе уравнение Максвелла для этого случая имеет вид [5]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma_E \mathbf{E} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{1}{L_k} \int \mathbf{E} dt, \quad (1)$$

где  $\sigma_E$  – проводимость металла;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $L_k$  – кинетическая индуктивность носителей заряда.

В то же время, первое уравнение Максвелла записывают следующим образом:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды. Видно, что уравнения (1) и (2) несимметричны.

Несколько улучшить симметрию этих уравнений можно, вводя в уравнение (2) член линейный по магнитному полю, учитывающий активные потери в магнетиках в переменных полях:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\sigma_H \mathbf{H} - \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (3)$$

где  $\sigma_H$  – проводимость магнитных токов. Но вот интеграла такого типа, который имеется в правой части уравнения (1), в данном уравнении нет. В то же время нам известно, что атом, обладающий магнитным моментом  $\mathbf{m}$ , помещенный в магнитное поле, и осуществляющий в нем прецессионное движение, имеет потенциальную энергию  $U_m = -\mu \mathbf{m} \mathbf{H}$ . Поэтому потенциальная энергия может накапливаться не только в электрических полях, а и в прецессионном движении магнитных

моментов, которое не обладает инерцией. Аналогичный случай имеется и в механике, когда гироскоп, прецессирующий в поле внешних сил, имеет запас потенциальной энергии. По определению механическое прецессионное движение также является неинерционным и сразу же прекращается после снятия внешних сил. Например, если из-под прецессирующего волчка, вращающегося в поле земного тяготения, быстро убрать опору, то он начнет падать, сохраняя в пространстве то направление своей оси, которое было в момент, когда была убрана опора. Такая же ситуация имеет место и для случая прецессирующего магнитного момента. Его прецессия является неинерционной и прекращается в момент снятия магнитного поля.

С учетом сказанного можно ожидать, что при описании прецессионного движения магнитного момента во внешнем магнитном поле в правой части соотношения (3) может появиться слагаемое того же типа, что и в соотношении (1). Только вместо  $L_k$  будет стоять  $C_k$ , т.е. кинетическая емкость, характеризующая ту потенциальную энергию, которую имеет прецессирующий магнитный момент в магнитном поле:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\sigma_H \mathbf{H} - \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \frac{1}{C_k} \int \mathbf{H} dt. \quad (4)$$

Впервые такое представление первого уравнения Максвелла с учетом кинетической емкости было дано в работах [5, 6].

Посмотрим, может ли реализоваться такой случай на практике, и что представляет кинетическая емкость. Резонансные процессы в плазме и диэлектриках характеризуются тем, что в процессе колебаний происходит попеременное преобразование электростатической энергии в кинетическую энергию движения зарядов и наоборот. Такой процесс может быть назван электрокинетическим и все устройства: лазеры, мазеры, фильтры и т.д., которые используют этот процесс, могут быть названы электрокинетическими. Наряду с этим существует и другой тип резонанса – магнитный. Если пользоваться существующими представлениями о зависимости магнитной проницаемости от частоты, то не трудно показать, что такая зависимость связана с наличием магнитного резонанса. Чтобы показать это, рассмотрим конкретный пример ферромагнитного резонанса. Если намагнитить феррит, приложив постоянное поле  $H_0$  параллельно оси  $z$ , то по отношению к внешнему переменному полю среда будет выступать как анизотропный магнетик с комплексной проницаемостью в виде тензора [7]

$$\boldsymbol{\mu} = \begin{pmatrix} \mu_T^*(\omega) & -i\alpha & 0 \\ i\alpha & \mu_T^*(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & \mu_L \end{pmatrix},$$

где

$$\mu_T^*(\omega) = 1 - \frac{\Omega |\gamma| M_0}{\mu_0(\omega^2 - \Omega^2)}, \quad \alpha = \frac{\omega |\gamma| M_0}{\mu_0(\omega^2 - \Omega^2)}, \quad \mu_L = 1,$$

причем

$$\Omega = |\gamma| H_0 \quad (5)$$

есть собственная частота прецессии, а

$$M_0 = \mu_0(\mu - 1)H_0 \quad (6)$$

есть намагнитченность среды. Учитывая (5) и (6)

для  $\mu_T^*(\omega)$ , можно записать

$$\mu_T^*(\omega) = 1 - \frac{\Omega^2(\mu - 1)}{\omega^2 - \Omega^2}. \quad (7)$$

Получилось, что магнитная проницаемость магнетика зависит от частоты, и могут возникнуть подозрения, что, как и в случае с плазмой, здесь есть какой-то подвох.

Если считать, что электромагнитная волна распространяется вдоль оси  $x$  и имеются компоненты полей  $H_y$  и  $H_z$ , то первое уравнение Максвелла примет вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{E}_z}{\partial x} = \mu_0 \mu_T \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t}.$$

Учитывая (7), получим

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \left[ 1 - \frac{\Omega^2(\mu - 1)}{\omega^2 - \Omega^2} \right] \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t}.$$

Для случая  $\omega \gg \Omega$  имеем

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \left[ 1 - \frac{\Omega^2(\mu - 1)}{\omega^2} \right] \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t}. \quad (8)$$

Полагая  $H_y = H_{y0} \sin \omega t$  и учитывая, что в этом случае

$$\frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t} = -\omega^2 \int \mathbf{H}_y dt,$$

из (8) получим

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t} + \mu_0 \Omega^2 (\mu - 1) \int \mathbf{H}_y dt,$$

или

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t} + \frac{1}{C_k} \int \mathbf{H}_y dt. \quad (9)$$

Величину

$$C_k = \frac{1}{\mu_0 \Omega^2 (\mu - 1)}$$

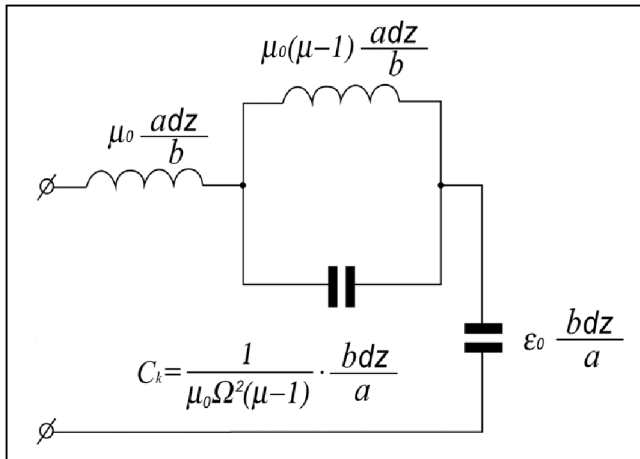
которую введена в соотношении (9), назовем кинетической емкостью.

Для случая  $\omega \ll \Omega$  находим

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \mu \frac{\partial \mathbf{H}_y}{\partial t} -$$

имеем первое уравнение Максвелла.

С чем связано существование кинетической емкости, и каков ее физический смысл? Если направление магнитного момента не совпадает с направлением внешнего магнитного поля, то вектор такого момента начинает прецессировать вокруг вектора магнитного поля с частотой  $\Omega$ . Магнитный момент  $\mathbf{m}$  обладает при этом потенциальной энергией  $U_m = -\mathbf{m}\mathbf{B}$ . Эта энергия подобно энергии заряженного конденсатора является по-



Эквивалентная схема двухпроводной линии заполненной магнетиком, на который наложено постоянное магнитное поле

тенциальной, потому что прецессионное движение, хотя и является механическим, однако, оно не инерционно и мгновенно прекращается при снятии магнитного поля. При наличии же магнитного поля прецессия продолжается до тех пор, пока не будет израсходована накопленная потенциальная энергия, и вектор магнитного момента не станет параллельным вектору магнитного поля.

Эквивалентная схема рассмотренного случая приведена на рисунке. В точке  $\omega = \Omega$  имеет место магнитный резонанс, при этом  $\mu_T^*(\omega) = -\infty$ . Резонансная частота макроскопического магнитного резонатора, как легко видеть из эквивалентной схемы, также не зависит от размеров линии и равна  $\Omega$ . Таким образом, параметр

$$\mu_H^*(\omega) = \mu_0 \left[ 1 - \frac{\Omega^2(\mu - 1)}{\omega^2 - \Omega^2} \right]$$

не является частотно зависимой магнитной проницаемостью, а включает в себя  $\mu$ ,  $\mu_0$  и  $C_k$ , которые включены в соответствии с эквивалентной схемой, изображенной на рисунке.

Нетрудно показать, что в данном случае имеет место распространение трех волн: электрической, магнитной и волны, несущей потенциальную энергию, которая связана с прецессией магнитных моментов вокруг вектора  $\mathbf{H}_0$ .

До появления работы [5] в электродинамике такое понятие, как кинетическая емкость не использовалось, хотя этот реальный параметр имеет очень понятную физическую природу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудкайд Дж. Применение сверхпроводимости // УФН. 1972. Т. 106. Вып. 3.
2. Арцимович Л.А. Что каждый физик должен знать о плазме. М.: Атомиздат, 1976.
3. Лихарев К.К. Сверхпроводящие слабые связи: Стационарные процессы // УФН. 1979. Т. 127. Вып. 2.
4. Менде Ф.Ф., Спицын А.И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. Киев: Наукова думка, 1985.
5. Менде Ф.Ф. Существуют ли ошибки в современной физике. Харьков: Константа, 2003.
6. Mende F.F. On refinement of certain laws of classical electrodynamics, arXiv, physics/0402084.
7. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М: Наука, 1989.

## REFERENCE

1. Goodkind J. Applications of Superconductivity. Amer. J. Phys. 1971. Vol. 39. № 9.
2. Artsimovich L.A. *Chto kazhdy fizik dolzhen znat' o plazme* [What every physicist should know about plasma]. M.: Atomizdat [Moscow: Publishing house «Atomizdat»], 1976.
3. Likhaev K.K. *Sverkhprovodyashchie slabye svyazi: Statsionarnye protsessy* [Superconducting weak links: Stationary processes]. UFN [Physics-Uspekhi]. 1979. Vol. 127. № 2.
4. Mende F.F., Spitsyn A.I. *Poverkhnostnyy impedans sverkhprovodnikov* [The surface impedance of superconductors]. Kiev: Naukova dumka [Kiev: Publishing house «Scientific thought»], 1985.
5. Mende F.F. *Sushchestvuyut li oshibki v sovremennoi fizike* [Are there any errors in modern physics]. Kharkov: Konstana [Kharkov: Publishing house «Konstanta»], 2003.
6. Mende F.F. *On refinement of certain laws of classical electrodynamics*, arXiv, physics/0402084.
7. Nikol'skiy V.V., Nikol'skaya T.I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* [Electrodynamics and radio waves propagation]. M: Nauka [Moscow: Publishing house «Sciences»], 1989.

## Сведения об авторе

**Федор Федорович Менде**, доктор техн. наук, ст. научн. сотрудник, директор

E-mail: [mende\\_fedor@mail.ru](mailto:mende_fedor@mail.ru)

НИИ Криогенного приборостроения Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины

61103, Украина, Харьков, пр. Ленина, 47

**Information about author**

*Fedor Fedorovich Mende, Doctor of Techn. Sciences, Senior Research Assistant, Director  
E-mail: mende\_fedor@mail.ru  
Research institute for cryogenic instrument engineering B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics  
and Engineering NAS Ukraine  
61103, Kharkov, Ukraine, Lenin Ave., 47.*