

**Reactive aperture to compensate for the input imaginary conductance when agreement a transmission line in the microwave range**  
**Petukhova N. (Russian Federation)**

**Реактивная диафрагма для компенсации входной реактивной проводимости при согласовании линии передач в СВЧ диапазоне**  
**Петухова Н. А. (Российская Федерация)**

*Петухова Наталья Александровна / Petukhova Natalya – магистр, аспирант,  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург*

**Аннотация:** в статье представлен проект новой реактивной диафрагмы для обеспечения согласования линии передач в СВЧ диапазоне. Для обеспечения согласования произвольной нагрузки с линией передач вблизи от нагрузки должен быть включен согласующий четырехполюсник. В данной работе проводится исследование трансформатора проводимостей на основе отрезка запердельного волновода и компенсация его реактивной проводимости с помощью специальной реактивной диафрагмы.

**Abstract:** the article presents a draft of the new jet aperture for matching transmission lines in the microwave range. In order to ensure harmonization with any load transmission line in the vicinity of the load must be enabled matching four-pole. In this paper, we study the conductivities of the transformer on the basis of length of the waveguide and of limiting the compensation of its reactive conductivity using a special jet aperture.

**Ключевые слова:** линия передачи, СВЧ, запердельный волновод, трансформатор проводимостей, согласование, реактивная проводимость, активная проводимость, диафрагма, типы волн.

**Keywords:** transmission line, microwave, of limiting the waveguide, conductivities of the transformer, agreement, conductance, susceptance (imaginary) conductance, aperture, types of waves.

Для компенсации входной реактивности будем использовать реактивную диафрагму, которая размещается на стыке между трехсантиметровым и двухсантиметровым волноводами. Расчет конструкции диафрагмы выполняется с целью полного согласования двух волноводов [1, 2, 3, 4]. Для этого она должна шунтировать реактивную часть входной проводимости, а длина отрезка запердельного волновода должна быть такой, чтобы активная часть проводимости была равна единице.

Диафрагма, представляющая собой тонкую металлическую пластинку с щелями, прорезанными в ней, представлена на рисунке 1.

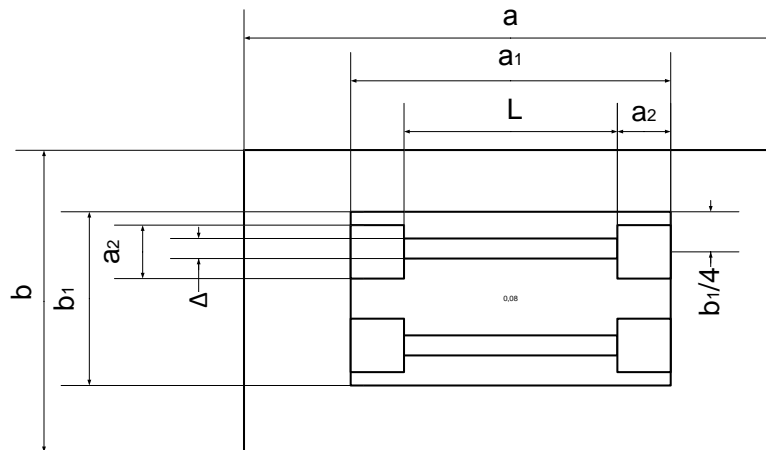


Рис. 1. Конструкция исследуемой диафрагмы

Щелевое отверстие вырезается в сечении, равном сечению запердельного волновода  $a_1 \times b_1$ . Размеры и обозначения, представленные на рис. 2.1:  $a=23$  мм,  $b=10$  мм,  $a_1=17$  мм,  $b_1=8$  мм,  $L$  - длина щелевого отверстия, равного 11 мм,  $a_2=3$  мм - размер гантелей, расположенных симметрично относительно центра щели,  $\Delta$  - ширина щели, равная 1 мм. Щелевые отверстия, за исключением гантелей, с обеих сторон покрыты диэлектриком с  $\epsilon_1 \approx 3$ .

Данная конфигурация диафрагмы более широкополосная и создает более сильную связь при согласовании. Также далее будет показано, что данная конструкция диафрагмы не возбуждает ближайшие к основному высшие типы полей. Однако анализ такой конструкции резко затрудняется и ее

описание становится неоправданно сложным. Анализ целесообразно начинать с тонкой щели, прорезанной в центре диафрагмы, которая является самой простой конструкцией (рис. 2).

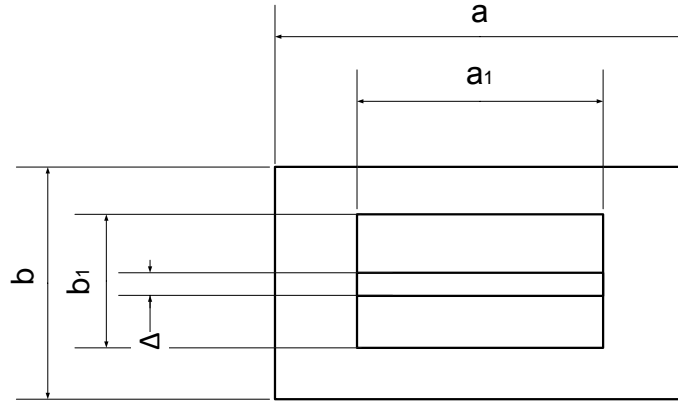


Рис. 2. Конструкция простейшей конфигурации диафрагмы

Рассмотрим диафрагму с конфигурацией щелевого отверстия, простейшей конструкции. Относительно центра будем считать, что щель является вибратором с длиной  $l_{щ}$  с волновым сопротивлением  $Z_{лвибр}$ , нагруженным на сопротивление  $x_3$ . Входное сопротивление вибратора можем рассчитать по формуле:

$$Z_{лвибр} = Z_l \frac{x_3 + j x_3 \tan(kl_{щ})}{Z_l \tan(kl_{щ})} \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число, фазовая постоянная распространения.  
Волновое сопротивление линии:

$$Z_l = 120 \left[ \ln \left( \frac{4l_{щ}}{\Delta} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

Эквивалентное реактивное сопротивление «полуволнового» вибратора, как результат решения интегрального уравнения (с учетом вносимых сопротивлений):

$$x_3 \approx 42,5 \div 49 + x_{вн} \quad (3)$$

Входное сопротивление вибратора:

$$Y_{щ} = \frac{Z_{лвибр}}{(60\pi)^2} \quad (4)$$

Подставляя (1)-(3) в (4), получим проводимость щели, отнесенной к сечению щели:

$$jB_{щ} = j \frac{x_3 - 120 \left[ \ln \left( \frac{4l_{щ}}{\Delta} \right) - 1 \right] \operatorname{ctg} \left( \frac{kl_{щ}}{2} \right)}{(60\pi)^2} \quad (5)$$

Произведем нормировку выражения (5) в проводимости трехсантиметрового волновода:

$$jb_{щ} = \frac{jB_{щ}}{Y_{л}} = j \frac{x_3 - 120 \left[ \ln \left( \frac{4l_{щ}}{\Delta} \right) - 1 \right] \operatorname{ctg} \left( \frac{kl_{щ}}{2} \right) \left( \frac{\pi^2 b}{8 a} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \right)}{(60\pi)^2 \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}} \quad (6)$$

Необходимо также учитывать толщину диафрагмы, в которой прорезана щель. При этом диафрагма, в которой прорезана щель, рассматривается как короткий отрезок волновода. Реактивность, вносимая таким волноводом, будет равняться:

$$B_t \cong \frac{1}{240} \frac{t_{щ}}{\Delta} \left( \frac{2l_{щ}}{\lambda} - \frac{\lambda}{2l_{щ}} \right),$$

где  $t_{щ}$  – толщина пластинки, из которой изготовлена реактивная диафрагма с прорезанной щелью.  
Произведем нормировку:

$$b_t = \frac{1}{240} \frac{t_{щ}}{\Delta} \left( \frac{2l_{щ}}{\lambda} - \frac{\lambda}{2l_{щ}} \right) \frac{\left( \frac{\pi^2 b}{8 a} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \right)}{\sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2}}$$

Таким образом, общая реактивная проводимость диафрагмы будет равна сумме реактивности, вносимой из-за ненулевой толщины диафрагмы, в которой вырезана щель, и реактивности собственно самого щелевого излучателя:

$$b_{\text{д}} = \left( \frac{x_3 - 120 \left[ \ln \left( \frac{4l_{\text{ш}}}{\Delta} \right) - 1 \right] \text{ctg} \left( \frac{kl_{\text{ш}}}{2} \right)}{(60\pi)^2} + \frac{1}{240} \frac{t_{\text{ш}}}{\Delta} \left( \frac{2l_{\text{ш}}}{\lambda} - \frac{\lambda}{2l_{\text{ш}}} \right) \right) \quad (7)$$

Полученное выражение является неудобным для использования. Для расчета можно использовать более простую формулу (6) для определения реактивности диафрагмы.

Покажем, что конструкция диафрагмы, представленная на рисунке 1, не возбуждает высшие типы.

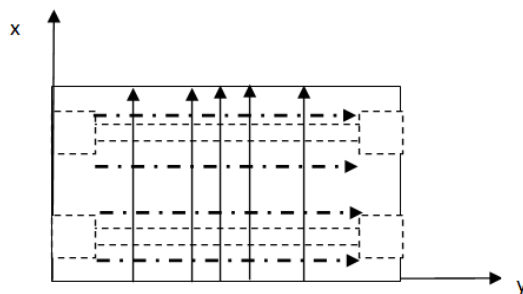
Критическая длина волны в прямоугольном волноводе для волны типа  $H_{nm}$  рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\text{кр}} = \frac{2}{\sqrt{\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}}}$$

$m, n$  – количество полупространственных периодов поля по соответствующей оси координат.

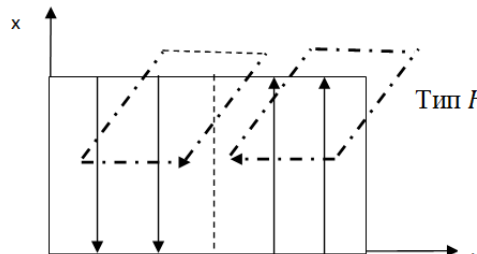
На рисунке 3 показаны картины полей [4] (сплошной линией показаны силовые линии поля  $E$ , штрих-пунктиром –  $H$ ). Контуром показаны щели, далее они расположены так же, но чтобы рисунки не были перегружены, они не показаны, рядом с каждым рисунком дан комментарий относительно высших типов волн.

$H_{01} \quad m=1, n=0$



$$\lambda_{\text{кр}} = 2a = 0,046 \text{ м}$$

$H_{02} \quad m=2, n=0$



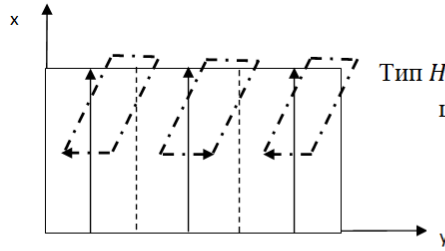
$$\lambda_{\text{кр}} = a = 0,023 \text{ м}$$

Тип  $H_{02}$  щелью не возбуждается, так как щели не пересекают силовые линии

$H_{03} \quad m=3, n=0$

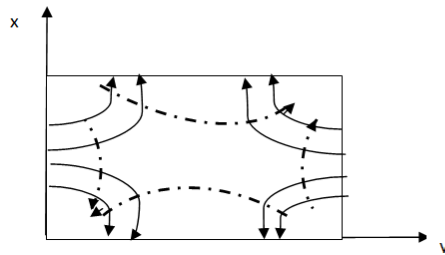
Контуром показаны щели, далее они расположены также, но чтобы рисунки не были перегружены, они не показаны.

$$\lambda_{кр} = \frac{2}{3}a = 0,0153 \text{ м}$$



Тип  $H_{03}$  щелью не возбуждается, так как щели не пересекают силовые линии

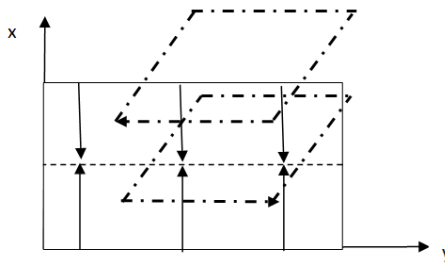
$H_{11}$   $m=1, n=1$



$$\lambda_{кр} = 0,01834 \text{ м}$$

Линии поля возбуждаются щелями противофазно и распространяться не будут

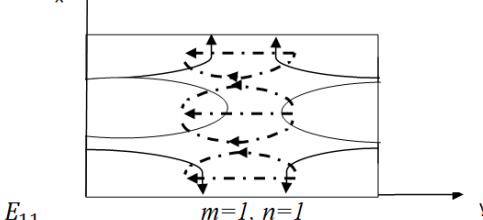
$H_{20}$   $m=0, n=2$



$$\lambda_{кр} = b = 0,01 \text{ м}$$

Линии поля возбуждаются щелями противофазно и распространяться не будут

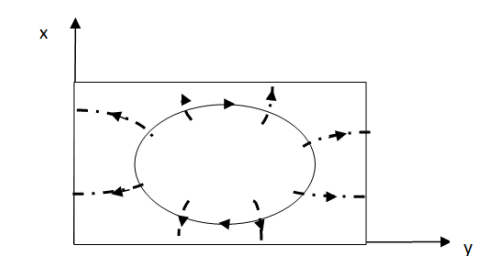
$H_{21}$   $m=1, n=2$



$$\lambda_{кр} = 0,0097 \text{ м}$$

Линии поля возбуждаются щелями противофазно и распространяться не будут

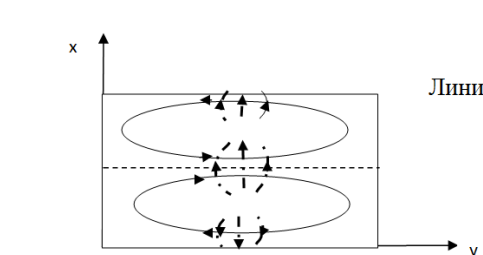
$E_{11}$   $m=1, n=1$



$$\lambda_{кр} = 0,01834 \text{ м}$$

Линии поля возбуждаются щелями противофазно и распространяться не будут

$E_{21}$   $m=1, n=2$



$$\lambda_{кр} = 0,0097 \text{ м}$$

Линии поля не пересекаются щелями

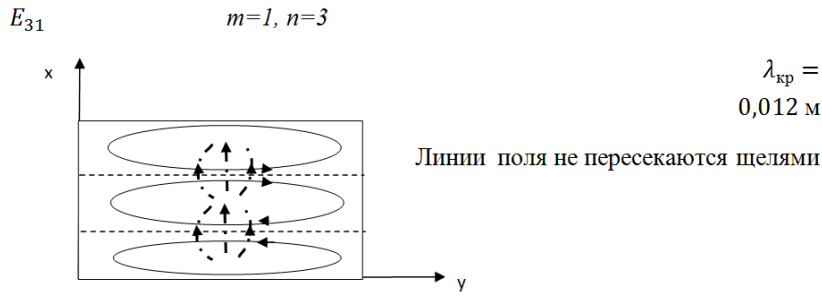


Рис. 3. Картины полей

Диафрагма, с прорезанной в ней щелью, изображенная на рисунке 1, имеет сложную конфигурацию, и все расчеты мы ведем для щели простейшей конфигурации. Покажем, что распределение на «гантельной» щели отличается от косинусоидального, но вклад дополнительных слагаемых невелик, поэтому можем ими пренебречь.

«Гантельная» щель сравнивается с эквивалентным электрическим вибратором, у которого на концах емкости в виде дисков (рис. 2, 4).

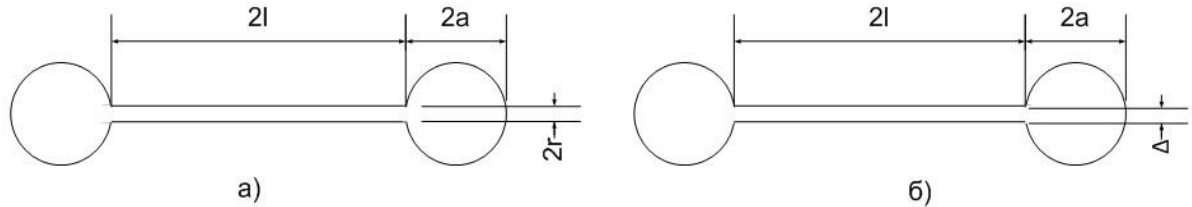


Рис. 4. Схема вибратора (а) и «гантельной» щели (б)

$Z_{л}$  – волновое сопротивление «половины» вибратора.

$$Z_{л} \cong 60 \left[ \left( \ln \left( \frac{2(l + 2\delta l)}{r} \right) \right) - 1 \right]$$

Где  $\delta l$  - удлинение щели за счет гантелей, следовательно  $l_{щ} = 2(l + \delta l)$

$$\delta l = \frac{Z_{л}}{\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}} 8a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left[ \left( \ln \left( \frac{4l_{щ}}{\Delta} \right) \right) - 1 \right] 8a = \frac{4a}{\pi} \left[ \left( \ln \left( \frac{4l_{щ}}{\Delta} \right) \right) - 1 \right] \cong \frac{4a}{\pi} \left[ \left( \ln \left( \frac{2\lambda}{\Delta} \right) \right) - 1 \right]$$

Так как  $l_{щ} = 2(l + \delta l)$ ;  $l_{щ} \cong \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \frac{l_{щ}}{2} - l = \delta l \Rightarrow \frac{\lambda}{4} - \delta l = l$

Распределение напряжения на гантельной щели (или тока в вибраторе с емкостными дисками на концах) показано на рисунке 5.

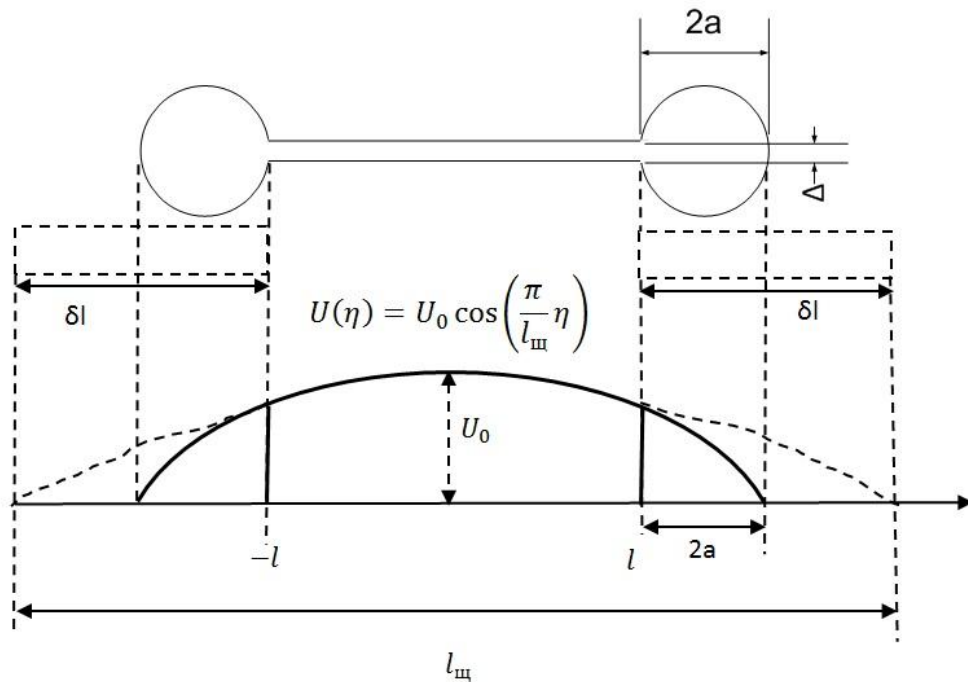


Рис. 5. Распределение напряжения на гантельной щели

$$U(\eta) = U_0 \cos\left(\frac{\pi}{l_{щ}} \eta\right)$$

Поле в «гантелях» (рис. 5)

$$U(\eta) \approx U_0 C(2a + l - \eta), \text{ где } C = \frac{1}{2a} \cos\left(\frac{\pi}{l_{щ}} \eta\right)$$

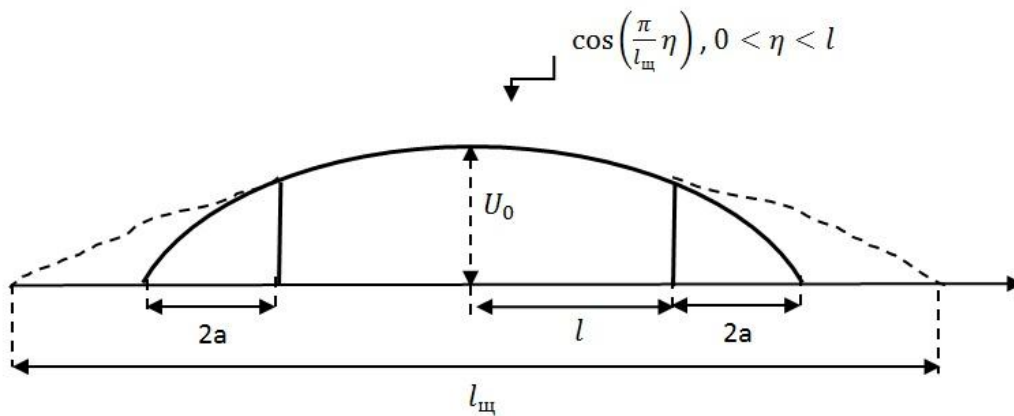


Рис. 6. Распределение напряжения в гантельной щели

$$\cos\left(\frac{\pi}{l_{щ}} \eta\right), 0 < \eta < l, l_{щ} \cong \frac{\lambda}{2} \Rightarrow U(\eta) \approx U_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \eta\right)$$

$$\frac{U(l)}{2} = \frac{U \left[ \cos \left( \frac{\pi}{l_{щ}} l \right) \right]}{2} = U_{cp}$$

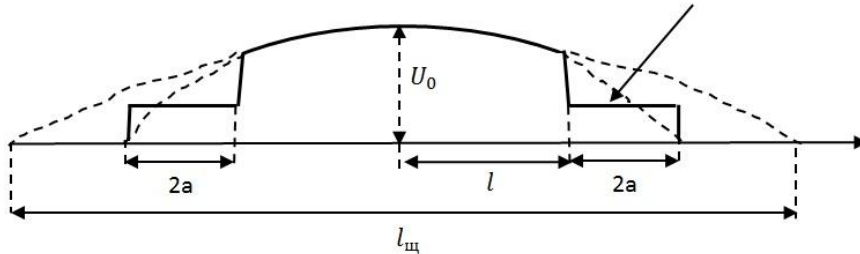


Рис. 7. Распределение напряжения в «гантелях»

Поле в «гантелях» определяется (рис. 6, 7), как:

$$\frac{U(l)}{2} = \frac{U \left[ \cos \left( \frac{\pi}{l_{щ}} l \right) \right]}{2} = U_{cp}$$

Где  $U_{cp}$  - среднее значение напряжения на участке «гантелей»

В итоге получаем:

- Поле на участке самой щели:  $U(\eta) \approx U_0 \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \eta \right)$ ,

при  $0 < \eta < l$  и  $-l < \eta < 0$

- На участке «гантелей»:  $U(\eta) \approx \frac{U_0}{2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)$

#### Литература

1. Петухова Н. А. Проблема согласование линий передач в СВЧ диапазоне // Научный журнал. Москва, 2016 г. № 6 (7). С. 54 – 57.
2. Петухова Н. А. Теоретическое обоснование возможности согласования сопротивлений линий передач с помощью отрезка запердельного волновода // Технические науки – от теории к практике. Новосибирск, 2016 г. № 6 (54). С. 99 – 111.
3. Петухова Н. А. Вывод формулы для определения оптимальной длины запердельного волновода для обеспечения согласования линии передачи в диапазоне СВЧ / Н. А. Петухова // Ученый XXI века. Международный научный журнал. Йошкар-Ола, 2016. № 7 (20). С. 6-9.
4. Степанов В. А. Конспект лекций по курсу «техническая электродинамика», ЛЭТИ, рукописный.