

ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ПРИ ДИФРАКЦИИ НА ЩЕЛИ В ЭКРАНЕ

Глушченко А.Г.¹, Глушченко Е.П.², Борисенко А.Ю.³

Email: Glushchenko1152@scientifictext.ru

¹Глушченко Александр Григорьевич - доктор физико-математических наук, профессор;

²Глушченко Евгения Павловна - кандидат физико-математических наук, доцент;

³Борисенко Арина Юрьевна - студент,

кафедра физики,

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики,

г. Самара

Аннотация: дифракция волн приводит к перераспределению энергии в пространстве. Сигналы, используемые в системах связи и телекоммуникаций, обладают спектром, зависящим от типа модуляции. В статье рассматривается зависимость интенсивности света от длины волны и параметров дифракционной структуры в зоне дифракции. Установлено искажение спектра исходного сигнала в зоне дифракции. Рассмотрена степень искажения спектра в зависимости от параметров дифракционной структуры, установлен рост искажения с увеличением угла дифракции.

Ключевые слова: дифракция, дисперсия интенсивности, искажение спектра.

DEPENDENCE OF INTENSITY OF LIGHT FROM THE LENGTH OF THE WAVE DIFFRACTION BY A SLOT IN THE SCREEN

Glushchenko A.G.¹, Glushchenko E.P.², Borisenko A.Yu.³

¹Glushchenko Alexander Grigorievich - Doctor of physical and mathematical sciences, Professor;

²Glushchenko Evgeniya Pavlovna - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor;

³Borisenko Arina Yuryevna - Student,

DEPARTMENT OF PHYSICS,

VOLGA STATE UNIVERSITY TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATICS,

SAMARA

Abstract: diffraction of waves leads to the redistribution of energy in space. Signals used in communications and telecommunications systems have a spectrum depending on the type of modulation. The article discusses the dependence of light intensity on the wavelength and the parameters of the diffraction structure in the diffraction zone. The distortion of the spectrum of the original signal in the diffraction zone has been established. The degree of distortion of the spectrum depending on the parameters of the diffraction structure is considered, and the increase in the distortion with increasing diffraction angle is established.

Keywords: diffraction, intensity dispersion, spectrum distortion.

УДК 532.42

Дифракция плоских волн на отверстиях в экране, в частности, дифракция Фраунгофера проявляется в перераспределении энергии волн в пространстве за экраном и описана в литературе достаточно подробно для монохроматических волн [1-5]. Реальные сигналы имеют спектр, поэтому представляют интерес дисперсионные характеристики поля в различных точках пространства, которые, однако, в литературе не рассматривались. В настоящей работе рассматривается зависимость относительной интенсивности поля от нормированной на параметры структуры длины волны. Рассчитана зависимость распределения интенсивности волн от направления дифрагирующих лучей и длины волны. Установлено, распределение интенсивности света по длинам волн меняется с изменением угла дифракции, что необходимо учитывать при построении телекоммуникационных систем.

Пусть на тонкий плоский экран с длинной щелью падает плоская световая волна (рис. 1). Волновая поверхность падающей волны, плоскость щели и экран параллельны друг другу. Считаем щель бесконечно длинной, тогда картина, наблюдаемая в любой плоскости xOy , перпендикулярной к щели, будет одинакова ($\partial/\partial z = 0$). Разобьем открытую часть волновой поверхности ($y = 0, 0 < x < a$) на параллельные краям щели элементарные зоны излучения ширины dx . Вторичные волны, посылаемые зонами в направлении, определяемом углом φ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$), соберутся в одной из точек экрана Р. Пусть каждая элементарная зона волновой поверхности dx создаст в точке Р колебание dE , амплитуда которого пропорциональна ширине зоны dx . Следовательно, амплитуда колебания dE , возбуждае-

мого зоной ширины dx в любой точке экрана, имеет вид: $dE = Cdx$, где C – константа, коэффициент пропорциональности, не зависящий от угла φ , под которым рассматривается дифракционная картина. Результирующая амплитуда колебаний, создаваемая всеми зонами, ищется интегрированием dE по

всей ширине щели a : $E_0 = \int_0^a dE = \int_0^a Cdx = Ca$. Отсюда $C = \frac{E_0}{a}$ и, следовательно,

$dE = \frac{E_0}{a} dx$. Определим фазовые соотношения между колебаниями dE , создаваемые различными элементами dx : с координатой $x = 0$ и зоной в произвольной точке x (рис. 1).

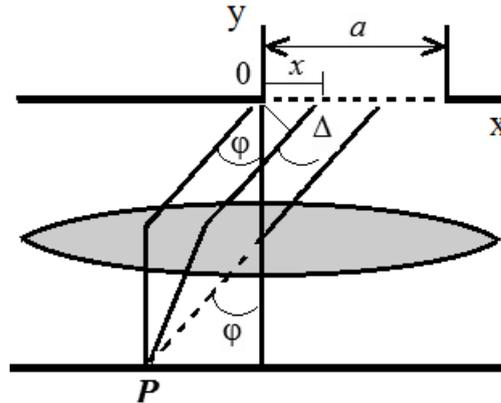


Рис. 1. Ход лучей в области дифракции

Если начальная фаза колебания, возбуждаемого в точке P элементарной зоной, находящейся с края щели ($x = 0$), равна нулю, то начальная фаза колебания, возбуждаемого зоной с координатой x , будет равна: $k\Delta = kx \sin \varphi$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны.

Колебание, возбуждаемое элементарной зоной с координатой x в точке P (положение которой определяется углом φ), может быть представлено в виде:

$$E_{\varphi} = \int dE_{\varphi} = \int_0^a \frac{E_0}{a} \exp \left[i \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \varphi \right) dx \right] = E_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right) \cos(\omega t - u),$$

где $u = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \varphi$. Дифракционная картина симметрична относительно центра линзы. Амплитуда результирующего колебания зависит от направления, угла дифракции φ , ширины щели a и длины вол-

ны λ : $E_{\varphi} = E_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)$. Интенсивность определяется соотношением:

$$I_{\varphi} = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2.$$

На рис.2 показан график зависимости распределения интенсивности излучения для трех углов дифракции от отношения ширины щели к длине волны в диапазоне $0 < a < 5\lambda$. Из графика следует, что при малых углах дифракции искажение спектра наименьшее (при $\varphi < 10^0$ интенсивность плавно уменьшается). С ростом угла дифракции число длин волн, на которых интенсивность равна нулю растет (рис.2). Под углом $\varphi = 20^0$ имеется минимум интенсивности при $\lambda = a/3$, под углом $\pi/6$ на двух длинах волн $\lambda = a/2, \lambda = a/4$).

Минимумы интенсивности при заданном направлении φ ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) наблюдаются на длинах волн:

$$\lambda_{n, \min} = \frac{a \sin \varphi}{n}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

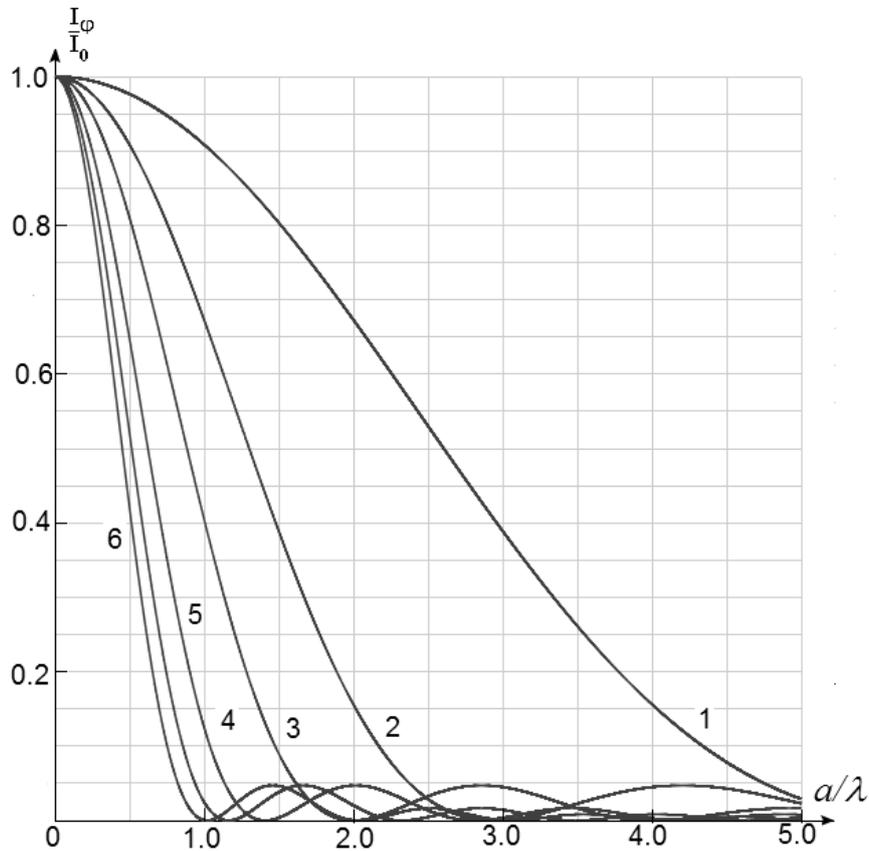


Рис. 2. График интенсивности света при заданных углах дифракции: 1- $\varphi = 10^\circ$, 2- $\varphi = 20^\circ$ 3- $\varphi = 30^\circ$,
4- $\varphi = 45^\circ$ 5- $\varphi = 60^\circ$ 6- $\varphi = 80^\circ$

и зависят, таким образом, от угла наблюдения φ и ширины щели. Число минимумов в заданном интервале длин волн определяется соотношением $n \leq a/\lambda$. На рис.3 показана зависимость длин волн $\lambda_{n, \min}$, на которых интенсивность равна нулю в зависимости от угла дифракции для различных n . При больших углах дифракции ($\varphi > \pi/6$) величина $\lambda_{n, \min}$ от угла дифракции практически не зависит. При ширине щели, меньшей длины волны, минимумы интенсивности вообще не возникают. В этом случае интенсивность света монотонно убывает от середины экрана к ее краям.

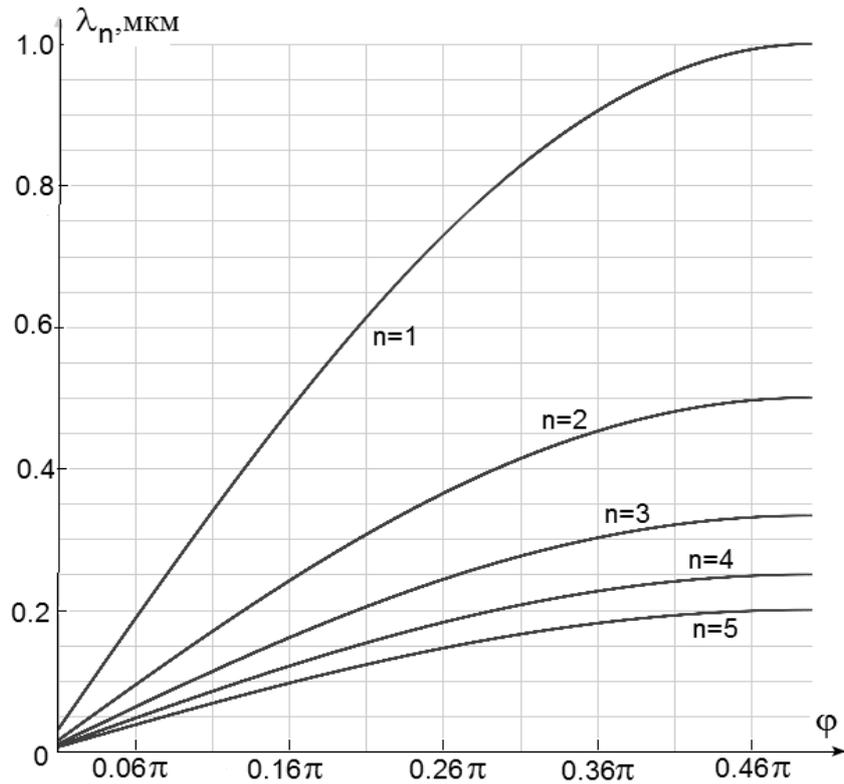


Рис. 3. Зависимость $\lambda_{n, \min}$ от угла дифракции

При углах дифракции $\varphi > 0$ наблюдается искажение спектра падающего на отверстие излучения с вырезанием спектральных составляющих на частотах, определяемых соотношением:

$$V_n = \frac{nc}{a \sin \varphi},$$

Числовое значение частот зависит от угла дифракции. Это означает, что искажение спектра под разными углами дифракции будет различным. С увеличением угла дифракции, также и ширины щели расстояние ΔV между частотами V_n с минимальной интенсивностью света растет. Параметр ΔV зависит (рис.4) от ширины щели a , угла дифракции и не зависит от номера n частоты, на которых наблюдается минимум интенсивности:

$$\Delta V = \frac{c}{a \sin \varphi}.$$

Наибольшая зависимость ΔV наблюдается при углах дифракции ($\varphi \leq \pi/6$). Таким образом, дифракция волн приводит не только к перераспределению энергии волн в пространстве, которое зависит от частоты (или длины волны) но и к частотному искажению сигналов (в особенности широкополосных сигналов), что необходимо учитывать при создании систем связи.

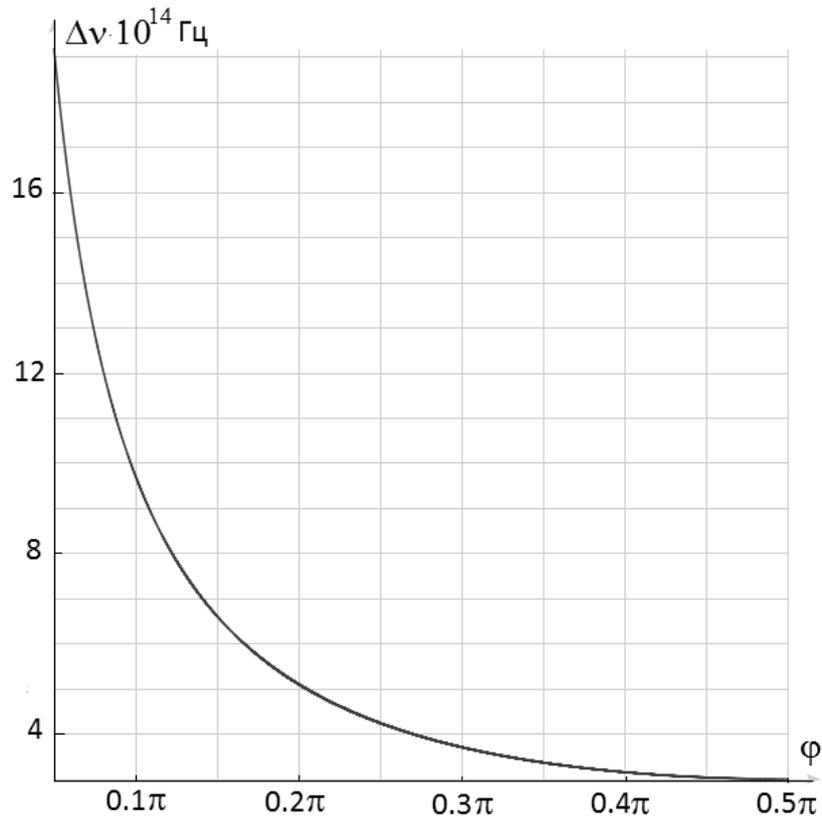


Рис. 4. Зависимость разности частот $\Delta \nu$ между частотами с минимальной интенсивностью от угла дифракции

Прохождение сигнала через совокупность щелей N при радиусе когерентности много больше длин волн, определяющих спектр сигнала, может быть описано соотношением для интенсивности колебаний в точке P , положение которой определяется углом Φ , в виде [2]:

$$\frac{I_{\Phi}}{I_0} = \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N\gamma u}{\gamma u} \right)^2$$

$u = \pi(a/\lambda)\sin\phi$, $\gamma = d/a$. Первый множитель описывает распределение интенсивности, формируемое отдельной щелью шириной a в экране, второй – совокупностью когерентных излучателей, расположенных с периодом d . На рис.5 *a,b* показана интенсивность излучения в фиксированном направлении в зависимости от относительной длины волны для различного количества щелей N . При увеличении N растет число длин волн для которых интенсивность излучения в данном направлении падает до нуля. Число провалов пропорционально N (рис.5 *a,b*). Длины волн, на которых интенсивность падает до нуля для разных точек наблюдения P также как и для дифракции на одиночной щели зависят от угла Φ .

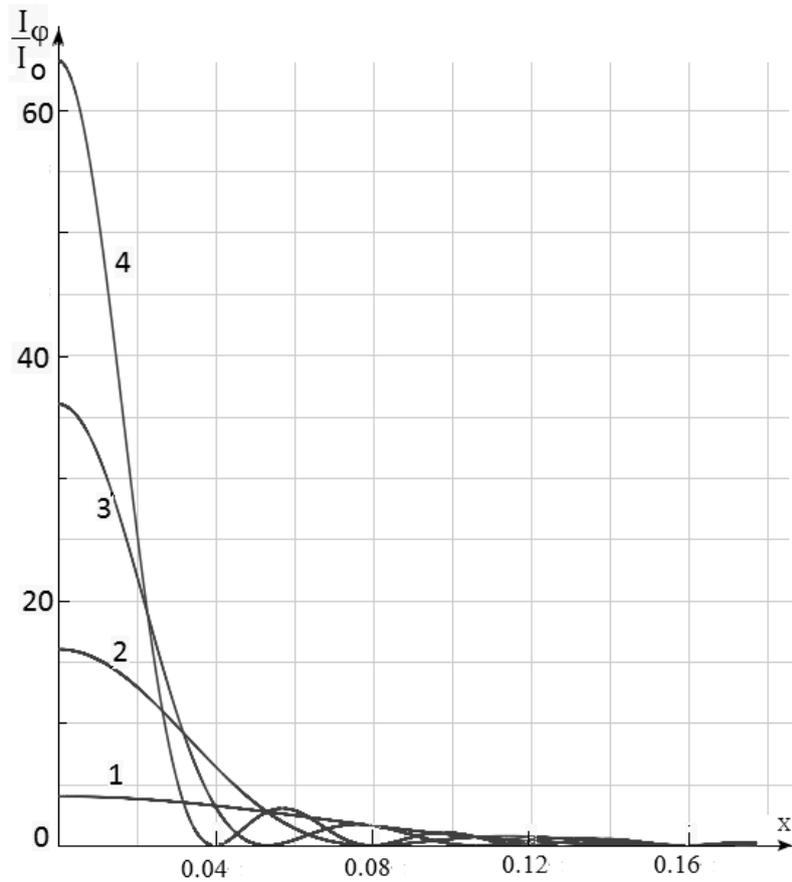


Рис. 5. Зависимость интенсивности от относительной длины волны в фиксированном направлении для разного количества щелей $x = a/\lambda$, $d = 2a$, $\varphi = \pi/6$ (a : 1 $N=2$, 2- $N=4$, 3 - $N=6$, 2- $N=8$)

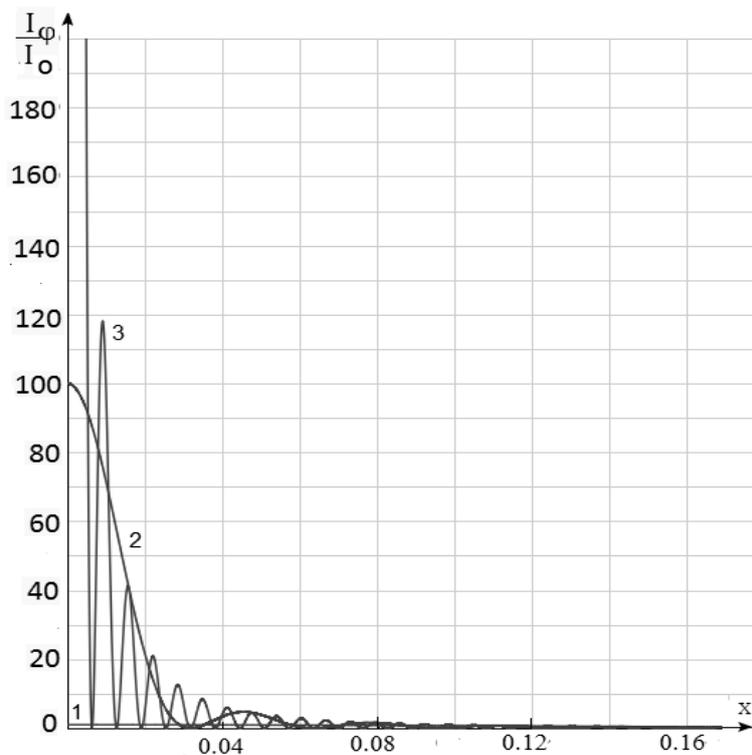


Рис.6. Зависимость интенсивности от относительной длины волны в фиксированном направлении для разного количества щелей $x = a/\lambda$, $d = 2a$, $\varphi = \pi/6$ ($N=1$, 2 - $N=10$, 3 - $N=50$)

Зависимость интенсивности света от относительной длины волны для различных углов дифракции показана на рис.7. С ростом угла дифракции степень искажения спектра сигнала возрастает.

Полученные результаты показывают, что дифракция сигнала на одиночном отверстии в экране и решетке сопровождается как перераспределением интенсивности света в области дифракции, так и искажением спектральной характеристики сигналов, вплоть до подавления отдельных спектральных компонент сигналов. Искажение спектральной характеристики сигнала сильно зависит от направления и растет с увеличением угла дифракции.

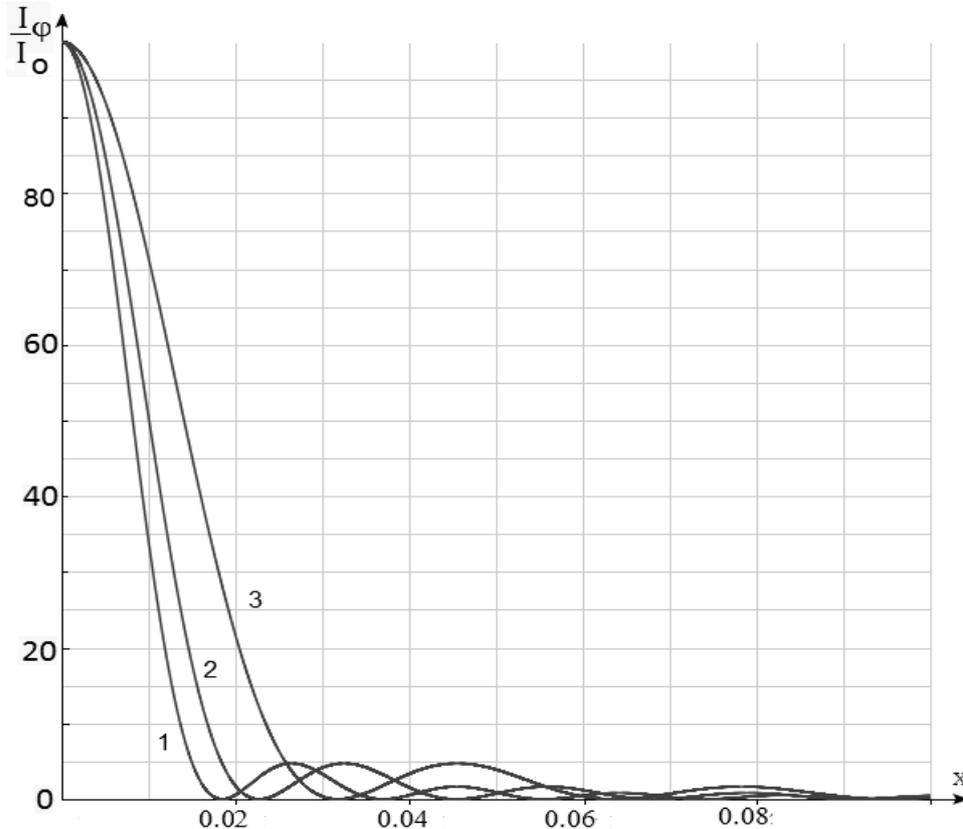


Рис. 7. Зависимость интенсивности от относительной длины волны в фиксированном направлении для разных направлений ($N=10$, 1- $\varphi = \pi/3$, 2- $\varphi = \pi/4$, 3- $\varphi = \pi/6$ $x = a/\lambda$, $d = 2a$)

Список литературы / References

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
2. Савельев И.В. Курс физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. Учебники для вузов. Лань СПб. 2008. 480 с.
3. Кондратьев И.Г., Малюжинец Г.Д. Дифракция волн // Физическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1988-1999. 3544 с.
4. Глуценко А.Г., Глуценко Е.П. Влияние движения среды на интерференционную картину, формируемую двумя когерентными источниками// Научный вестник, 2015. № 3(5). С. 108-112.
5. Андриянчик А.А., Апанасевич А.П., Афанасенко В.П. и др. Дифракция электромагнитных волн на объемной дифракционной решетке // Письма в журнал технической физики, 1992. Вып.17. С.13.