

**Российский государственный университет имени И.  
Канта**

**Кафедра телекоммуникаций**

**Проектирование и расчет антенно-  
фидерных устройств (АФУ)**

**Лекция №5**

**Многовибраторные проволочные  
антенны**

# **1.Общая характеристика многовибраторных антенн**

**Многовибраторные проволочные антенны относятся к системам связанных электромагнитной связью излучателей в силу близко отстоящих друг от друга дискретных или непрерывных излучающих элементов.**

**В качестве отдельных излучателей (элементов) в системе связанных излучателей применяют вибраторы, длина которых соизмерима с длиной волны, рупорные антенны, щелевые антенны, спиральные антенны и т.д.**

**Вибратор, к которому через фидерную линию подводят электрическое напряжение от радиопередатчика, называют активным элементом, а вибраторы, ток в которых возникает под действием радиоволны, излученной активным элементом,**

**Система уравнений, связывающих напряжения и токи на зажимах взаимосвязанных вибраторов, имеет общий вид:**

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{11} + \dot{I}_2 Z_{12} + \dots + \dot{I}_n Z_{1n}; \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_1 Z_{21} + \dot{I}_2 Z_{22} + \dots + \dot{I}_n Z_{2n}; \\ \dots\dots\dots \\ \dot{U}_n = \dot{I}_1 Z_{n1} + \dot{I}_2 Z_{n2} + \dots + \dot{I}_n Z_{nn}. \end{cases}$$

**где**  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n; \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_n$  - комплексные значения напряжений и токов на 1-ом, 2-ом и т.д. вибраторах системы;

$Z_{11}, Z_{22}, \dots, Z_{nn}$  - собственные комплексные сопротивления вибраторов;

$Z_{12}, Z_{13}, \dots, Z_{1n}$  - взаимные комплексные сопротивления 1-ого и 2-ого, 1-ого и 3-его и т.д. вибраторов системы.

**Эквивалентное входное сопротивление на зажимах первого вибратора:**

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = Z_{11} + \frac{I_2}{I_1} Z_{12} + \dots + \frac{I_n}{I_1} Z_{1n}$$

**Вносимое сопротивление в первый, второй и т.д. вибраторы со стороны других вибраторов:**

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{вн1} = \frac{I_2}{I_1} Z_{12} + \frac{I_3}{I_1} Z_{13} + \dots + \frac{I_n}{I_1} Z_{1n} = Z_{вн12} + Z_{вн13} + \dots + Z_{вн1n}; \\ Z_{вн2} = \frac{I_1}{I_2} Z_{21} + \frac{I_3}{I_2} Z_{23} + \dots + \frac{I_n}{I_2} Z_{2n} = Z_{вн21} + Z_{вн23} + \dots + Z_{вн2n}; \\ \dots \\ Z_{внn} = \frac{I_2}{I_n} Z_{n2} + \frac{I_3}{I_n} Z_{n3} + \dots + \frac{I_{n-1}}{I_n} Z_{n(n-1)} = Z_{внn2} + Z_{внn3} + \dots + Z_{внn(n-1)}. \end{array} \right.$$

## 2. Сущность метода наводимых ЭДС

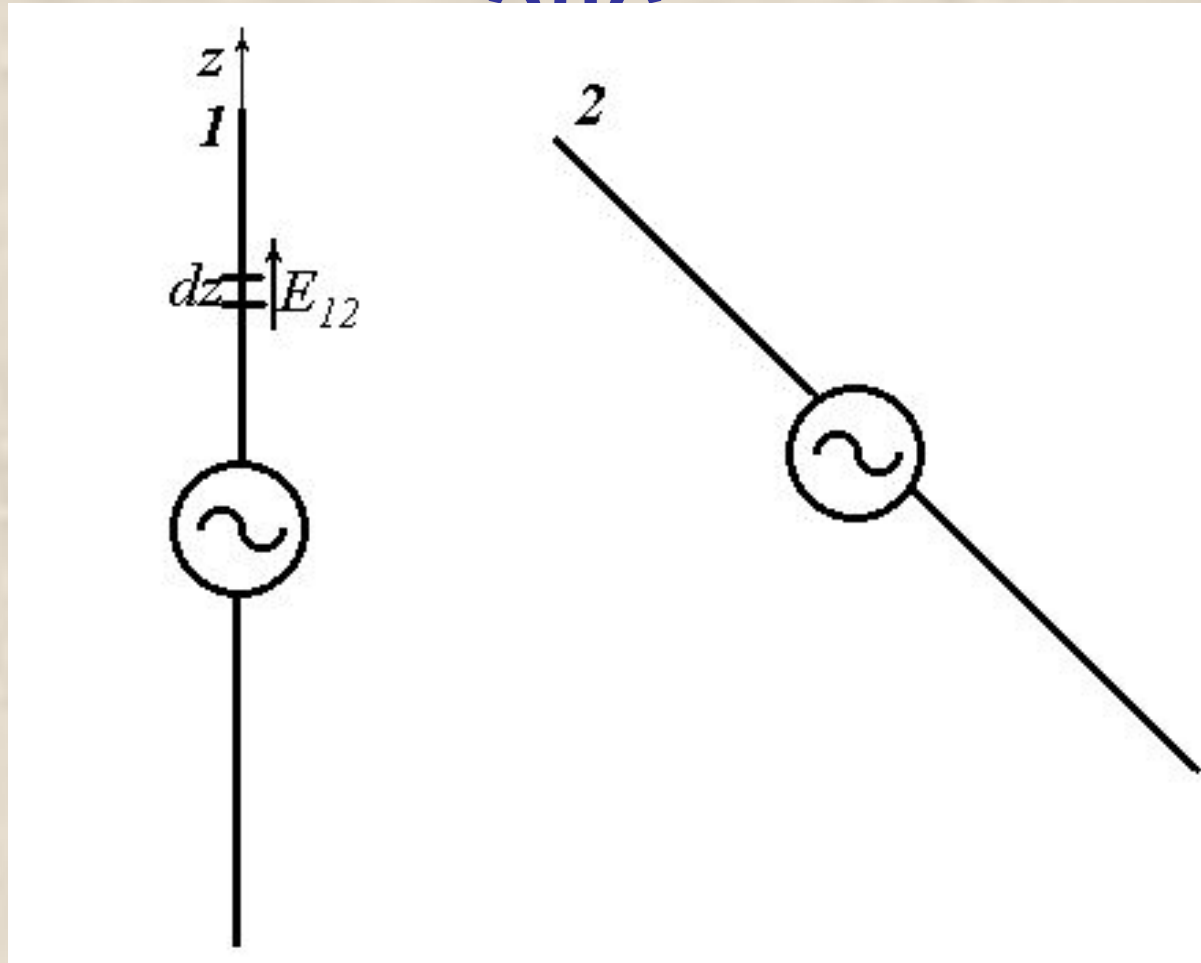


Рисунок 2 – К пояснению сущности метода наводимых ЭДС

**ЭДС, наведенная на элементе  $dz$  вибратора 1:**

$$d\varepsilon_{m_z} = E_{m_z} dz$$

**Собственная ЭДС вибратора 1, компенсирующая действие наведенной ЭДС:**

$$-d\varepsilon_{m_z} = -E_{m_z} dz$$

**Активная мощность, развиваемая на элементарном участке 1-го вибратора под действием поля 2-го вибратора  $j$**

$$dP_{\Sigma_{12}} = -I_{\partial_z} d\varepsilon_{\partial_z} \cos \varphi = -\frac{j}{2} I_{m_z} E_{m_z} \cos \varphi dz$$

**где  $I_{m_z}$  - амплитудное значение тока на элементе  $dz$ ;**

**$E_{m_z}$  - амплитуда поля вблизи элемента  $dz$ ;**

**$\varphi$  - сдвиг фаз между током и собственной ЭДС в элементе  $dz$**

**Активная мощность излучения 1-го вибратора под действием поля 2-го вибратора или наведенная**

**мощность излучения**

$$P_{\Sigma_{12}} = -\frac{1}{2} \int_0^{\ell} I_{m_z} E_{m_z} \cos \varphi dz$$

**Наведенное сопротивление излучения :**

$$R_{\Sigma_{12}} = -\frac{1}{I_m} \frac{1}{2} \int_0^{\ell} I_{m_z} E_{m_z} \cos \varphi dz$$

**Наведенное реактивное сопротивление:**

$$X_{\Sigma_{12}} = -\frac{1}{I_m} \frac{1}{2} \int_0^{\ell} I_{m_z} E_{m_z} \sin \varphi dz$$

**Полная мощность излучения 1-ого вибратора системы из двух вибраторов:**

$$P_{\Sigma_1} = P_{\Sigma_{11}} + P_{\Sigma_{12}}$$

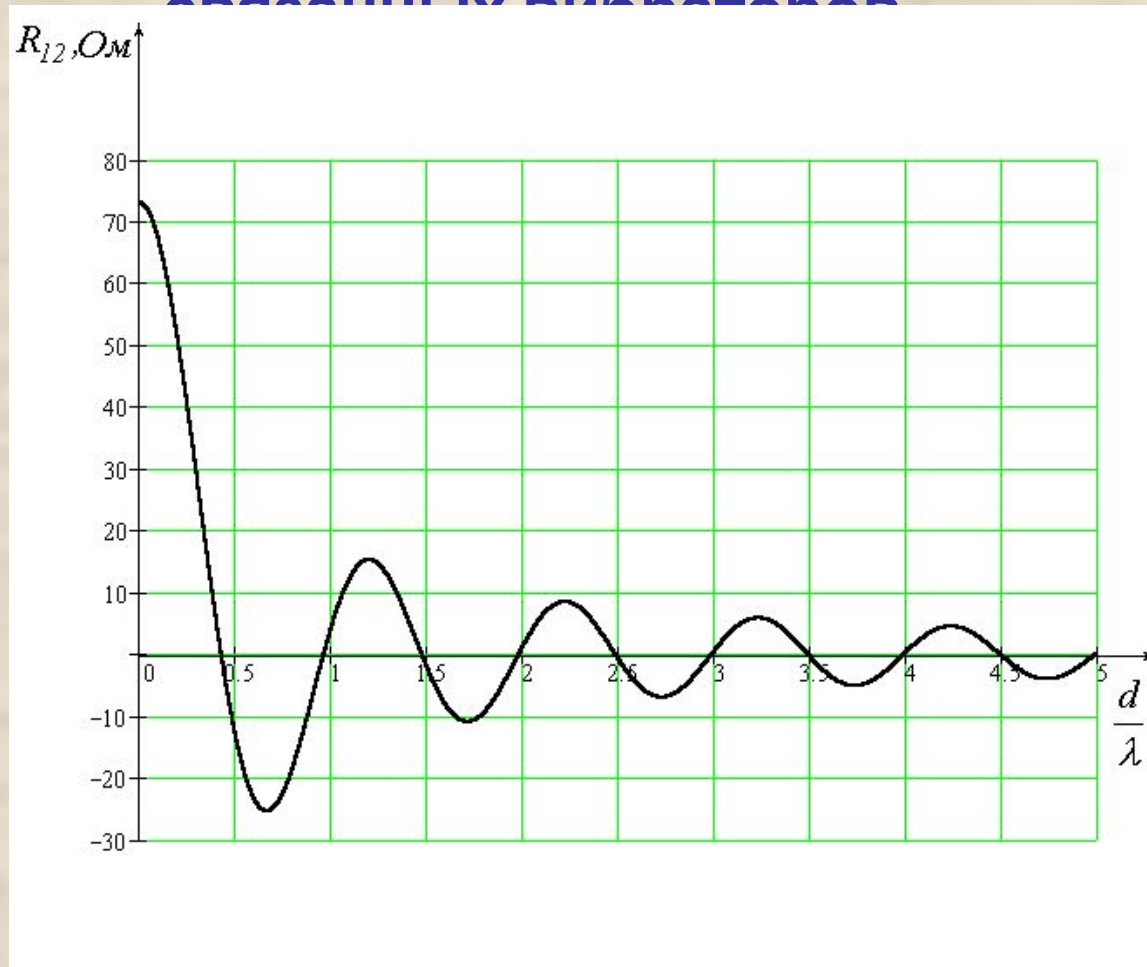


## Порядок расчета наведенных сопротивлений:

1. Задаются распределением токов вдоль рассматриваемых вибраторов.
2. Определяют в разных точках одного из вибраторов напряженность электрического поля, создаваемого током другого вибратора.
3. Находят касательные составляющие данной напряженности к проводу 1-го вибратора.
4. Определяют сдвиг фаз между током и касательной составляющей напряженности электрического поля на рассматриваемом вибраторе.
5. Находят значения активной и реактивной составляющих наведенного сопротивления.

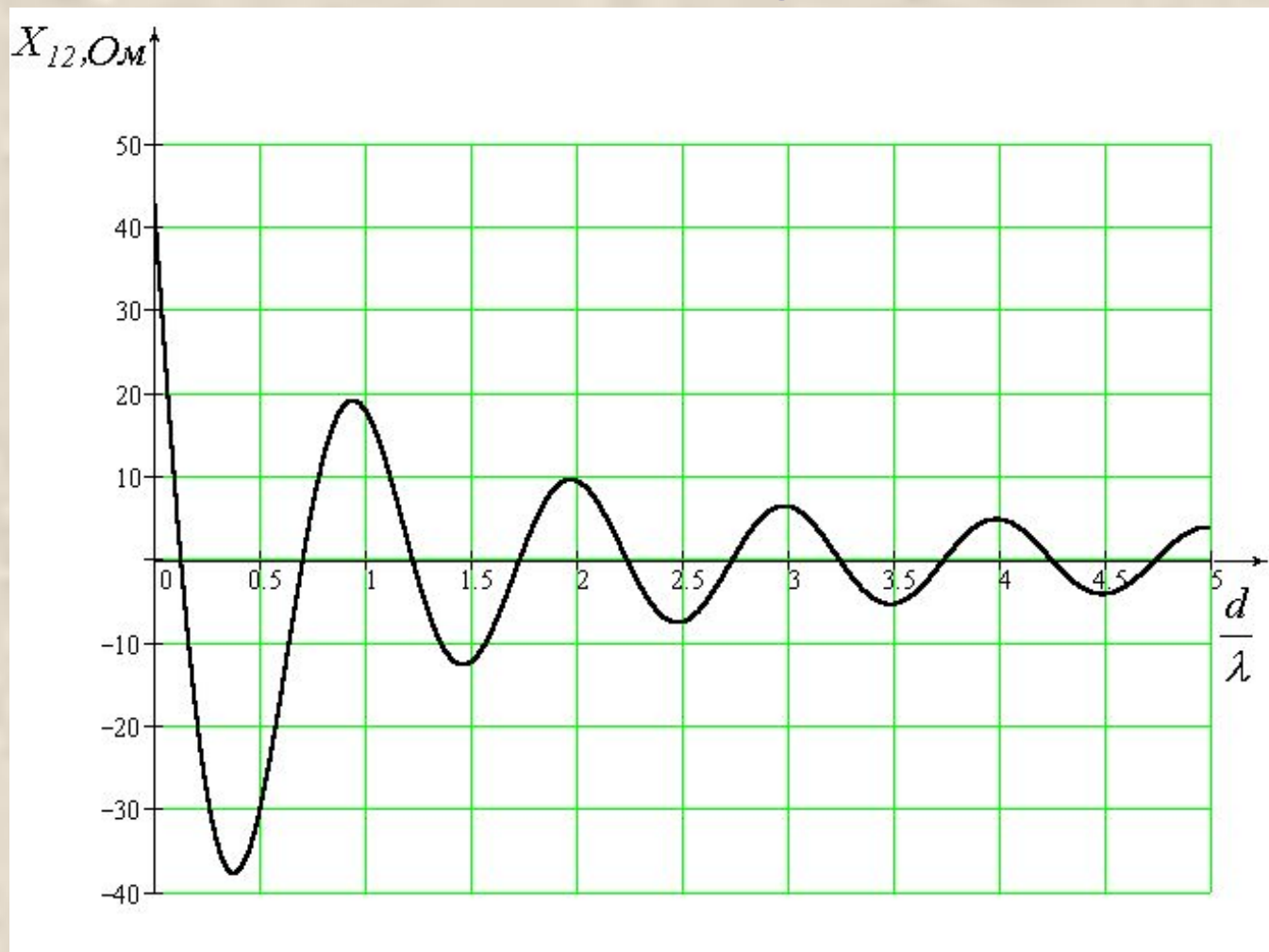


# Взаимные сопротивления двух параллельных связанных вибраторов



**Рисунок 3- Зависимость активной составляющей взаимного сопротивления двух полуволновых параллельных вибраторов от отношения расстояния**

## Взаимные сопротивления двух параллельных



**Рисунок 4- Зависимость реактивной составляющей взаимного сопротивления двух полуволновых параллельных вибраторов от отношения расстояния между вибраторами к длине волны**

### 3. Расчет полных активных сопротивлений многовибраторных антенн

Рассмотрим антенну, состоящую из  $n$ -вибраторов. Входное сопротивление 1-го вибратора:

$$Z_1 = Z_{11} + \frac{\dot{I}_{m2}}{\dot{I}_{m1}} Z_{12} + \dots + \frac{\dot{I}_{m_n}}{\dot{I}_{m1}} Z_{1n}$$

Сопротивления излучения вибраторов, находящихся в системе из  $n$ - связанных электромагнитной связью вибраторов:

$$R_{\Sigma 2} = R_{\Sigma 21} + R_{\Sigma 22} + \dots + R_{\Sigma 2n}$$

$$R_{\Sigma n} = R_{\Sigma n1} + R_{\Sigma n2} + \dots + R_{\Sigma nn}$$

Суммарная мощность излучения всей системы

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + \dots + P_{\Sigma n}$$

## Полное сопротивление излучения всей системы

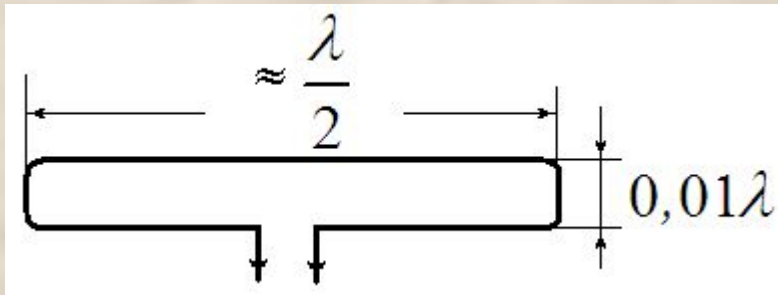
$$R_{\Sigma} = R_{\Sigma_1} + R_{\Sigma_2} + \dots + R_{\Sigma_n}$$

**Таким образом**, полное сопротивление излучения всей антенной системы определяется как сумма соответствующих сопротивлений излучения каждого из вибраторов, входящих в данную антенну и находящихся в электромагнитной связи с другими составными частями данной системы.

### **4. Конструкция, основные параметры и принцип действия директорных антенн**

**Директорная антенна** или антенна типа «волновой канал» относится к антеннам линейной поляризации. Директорная антенна предназначена как для излучения, так и приема радиоволн. Она представляет собой линейную систему излучателей, в которой один излучатель является **активным**, т.е. к нему подводится электрический сигнал в режиме излучения или с него снимается электрический

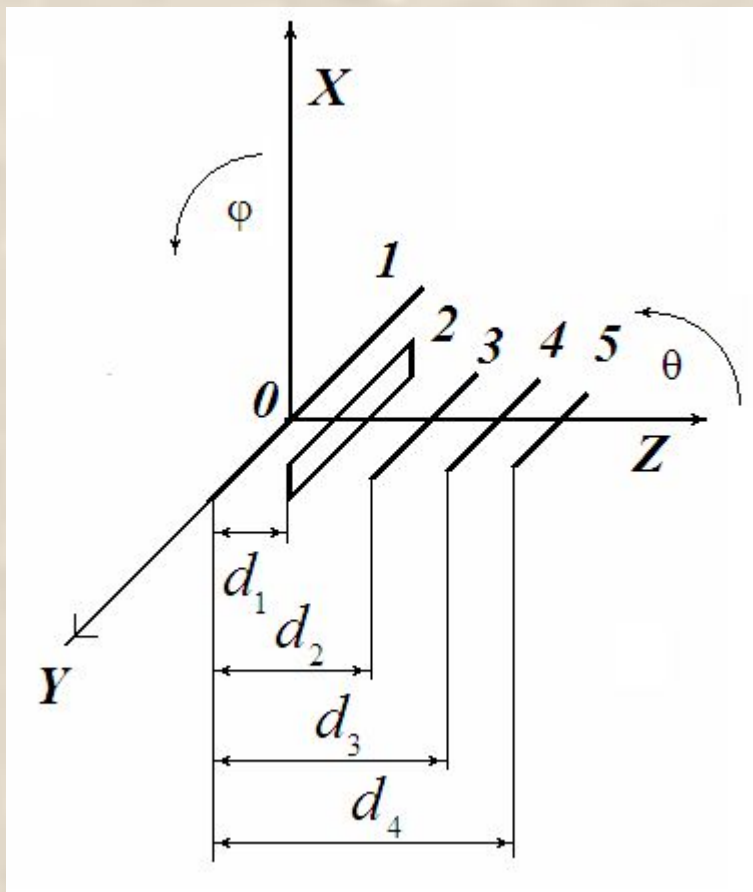
В качестве излучающих элементов используются симметричные вибраторы. Активный вибратор выполнен, чаще всего, в виде **петли Пистолькорса**. Это объясняется тем, что при настройке пассивных вибраторов падает сопротивление излучения активного вибратора. В директорной антенне под влиянием пассивных вибраторов сопротивление активного



**Рисунок 5 –  
Конструкция и  
размеры петлевого  
вибратора  
Пистолькорса**

В этом вибраторе падение сопротивления излучения компенсируется за счет более высокой добротности. Сопротивление фидерной линии 240-260 Ом, и поэтому при настройке директорной антенны остаётся довольно большим и приблизительно равным волновому сопротивлению фидерной линии.





**Рисунок 6**

**Возбуждение излучающих элементов происходит бегущей волной, излученной петлевым активным вибратором. Продольный размер активного элемента составляет . Длины директоров, элементов расположенных спереди от активного элемента на траверсе, выполняют на 5-10% короче в сравнении с длиной активного элемента для обеспечения запаздывания фаз токов в них, а длина рефлектора для обеспечения опережения фазы тока в нем должна быть больше на 3-5% чем длина активного элемента. При выполнении данных условий пассивных элементов**

**Нормированная ХН одиночного полуволнового вибратора директорной антенны в свободном пространстве:**

$$F_b(\theta, \varphi) = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta\right)}{\cos\theta} \right| = \left| \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta \cos\varphi\right)}{\sqrt{1 - [\sin\theta \cos\varphi]^2}} \right|$$

**Множитель системы определяется как:**

$$F_c(\theta, \varphi) = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I_{m_i}}{I_{m_1}} \exp\left[j(kd_i \cos\theta + \psi_i)\right] \right|, \quad N = 5$$

**По теореме перемножения ДН нормированная ХН директорной антенны задается выражением:**

$$F(\theta, \varphi) = \left| \frac{1}{N} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta \cos\varphi\right)}{\sqrt{1 - [\sin\theta \cos\varphi]^2}} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{I_{m_i}}{I_{m_1}} \exp\left[j(kd_i \cos\theta + \psi_i)\right] \right|, \quad N = 5$$



**Система уравнений, связывающих клеммные напряжения с клеммными токами в излучающих элементах директорной антенны :**

$$\begin{cases} 0 = \dot{I}_{m_1} Z_{11} + \dot{I}_{m_2} Z_{12} + \dot{I}_{m_3} Z_{13} + \dot{I}_{m_4} Z_{14} + \dot{I}_{m_5} Z_{15}; \\ \dot{U}_{m_2} = \dot{I}_{m_1} Z_{21} + \dot{I}_{m_2} Z_{22} + \dot{I}_{m_3} Z_{23} + \dot{I}_{m_4} Z_{24} + \dot{I}_{m_5} Z_{25}; \\ 0 = \dot{I}_{m_1} Z_{31} + \dot{I}_{m_2} Z_{32} + \dot{I}_{m_3} Z_{33} + \dot{I}_{m_4} Z_{34} + \dot{I}_{m_5} Z_{35}; \\ 0 = \dot{I}_{m_1} Z_{41} + \dot{I}_{m_2} Z_{42} + \dot{I}_{m_3} Z_{43} + \dot{I}_{m_4} Z_{44} + \dot{I}_{m_5} Z_{45}; \\ 0 = \dot{I}_{m_1} Z_{51} + \dot{I}_{m_2} Z_{52} + \dot{I}_{m_3} Z_{53} + \dot{I}_{m_4} Z_{54} + \dot{I}_{m_5} Z_{55}, \end{cases}$$

**Каждое из собственных и взаимных сопротивлений элементов директорной антенны может быть рассчитано по формулам:**

$$Z_{mn} = j60 \int_0^{\ell_n} \left[ \frac{e^{-jk\sqrt{a^2 + (\ell_n - z)^2}}}{\sqrt{a^2 + (\ell_n - z)^2}} + \frac{e^{-jk\sqrt{a^2 + (\ell_n + z)^2}}}{\sqrt{a^2 + (\ell_n + z)^2}} - 2\cos(k\ell_n) \frac{e^{-jk\sqrt{a^2 + z^2}}}{\sqrt{a^2 + z^2}} \right] \sin[k(\ell_n - z)] dz,$$

**где  $\ell_n; a$  - длина и радиус поперечного сечения одного плеча излучающего элемента**

$$Z_{nm} = j60 \int_0^{\ell_m} \left[ \frac{e^{-jk\sqrt{d^2 + (\ell_n - z)^2}}}{\sqrt{d^2 + (\ell_n - z)^2}} + \frac{e^{-jk\sqrt{d^2 + (\ell_n + z)^2}}}{\sqrt{d^2 + (\ell_n + z)^2}} - 2 \cos(k\ell_n) \frac{e^{-jk\sqrt{d^2 + z^2}}}{\sqrt{d^2 + z^2}} \right] \sin[k(\ell_m - z)] dz,$$

где  $n; m; \ell_n; \ell_m$  - номера и длины плеч соответствующей пары вибраторов;  
 $d$  - расстояние между рассматриваемыми вибраторами в паре;  
 $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число;

Каждое из взаимных сопротивлений носит комплексный характер и в общем виде может быть записано:

Теперь матрица комплексных сопротивлений, рассчитанных в соответствии с выражениями выше для директорной антенны в виде

$$\|Z\| = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} \end{vmatrix}$$

лена в виде

**Матрица комплексных амплитуд токов в пучности в излучающих элементах будет определена из решения приведенной системы уравнений в матричном виде как**

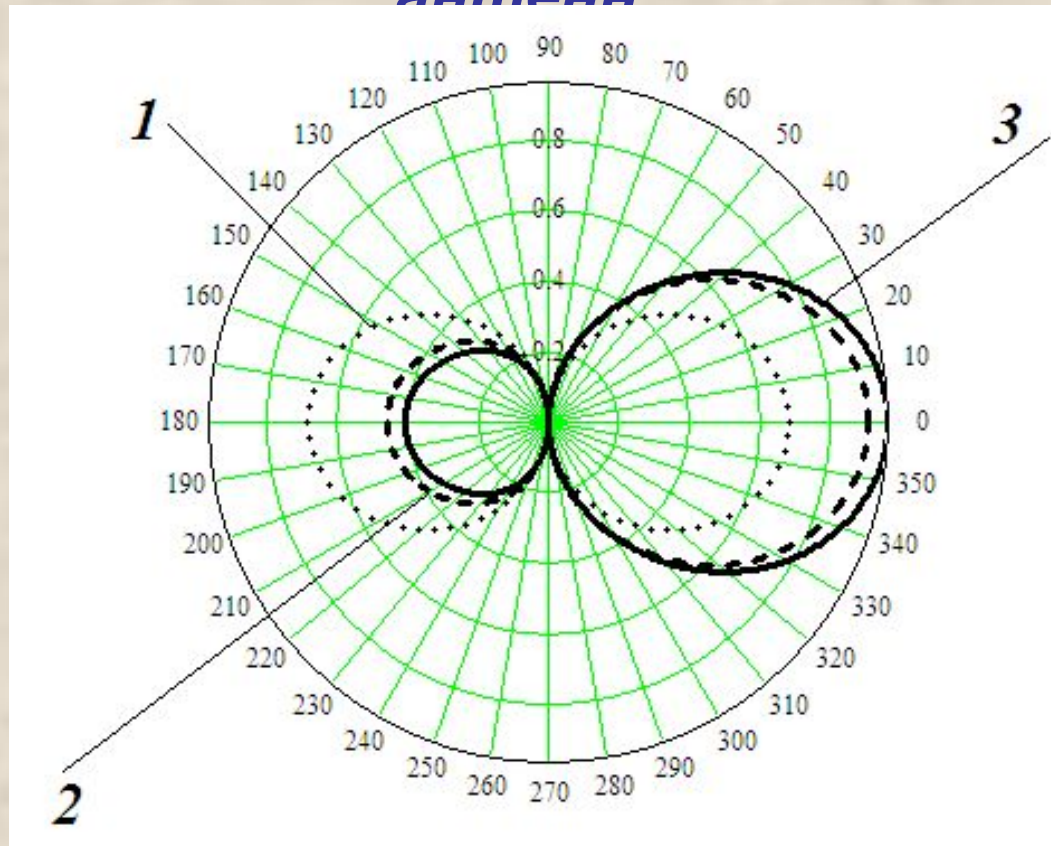
$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{m_1} \\ \dot{I}_{m_2} \\ \dot{I}_{m_3} \\ \dot{I}_{m_4} \\ \dot{I}_{m_5} \end{pmatrix} = \|Z\|^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{U}_{m_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

**Анализ амплитуд и начальных фаз токов показывает, что амплитуда тока в пассивных элементах убывает по сравнению с амплитудой тока в питаемом вибраторе Пистолькорса; ток в директорах отстает по фазе от тока активного элемента, ток в рефлекторе опережает по фазе ток в активном вибраторе.**

**Таким образом,** осуществляется компенсация в пространственном набеге волн при распространении их от рефлектора и активного вибратора в сторону директора, и директорная антенна формирует однонаправленное излучение, ориентированное в сторону директоров.

**Как было отмечено выше, с удалением от активного вибратора**

## Направленные свойства многовибраторных антенн



**Рисунок 7 – Нормированные диаграммы направленности: активного вибратора Пистолькорса (кривая 1), двухэлементной антенны, состоящей из активного элемента Пистолькорса и рефлектора (кривая 2) и трехэлементной**



# Основные параметры директорной антенны

Коэффициент направленного действия может быть ориентировочно оценен в направлении (в направлении оси антенны) по формуле вида:

где  $N$  - число и  $d_{cp}$  - среднее расстояние между соседними излучателями.

$$d_{cp} = \frac{d_p + d_{д1} + d_{д2} + \dots + d_{дN}}{N - 1}$$

где  $d_p$  - расстояние между активным элементом и рефлектором;  
 $d_{д1}$  - расстояние между активным элементом и 1-м директором;  
 $d_{дN}$  - расстояние между  $N-1$  и  $N$ -м директорами.

Длина директорной антенны определяется в виде:

**Ширину диаграммы направленности по нулевому уровню можно условно оценить по выражению:**

$$2\theta_0 \approx 2\sqrt{\frac{\lambda}{L}}$$

**Ширину диаграммы направленности по половинной мощности можно условно оценить по выражению:**

$$2\theta_{0,5} \approx B\sqrt{\frac{\lambda}{L}}$$

**где коэффициент  $B$  определяется из таблицы 1**

**Таблица 1**

$\frac{L}{\lambda}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$B$	11	6	4,5	4	4,2	4,5	4,8	5,2	5,9	6,4

**Директорная антенна относится к узкодиапазонным антеннам, поэтому нижняя или верхняя рабочие частоты не должны отличаться более чем на 10% от резонансной частоты антенны. Поляризация волн, излучаемых директорной антенной, - линейная, горизонтальная или вертикальная в зависимости от ориентации элементов**

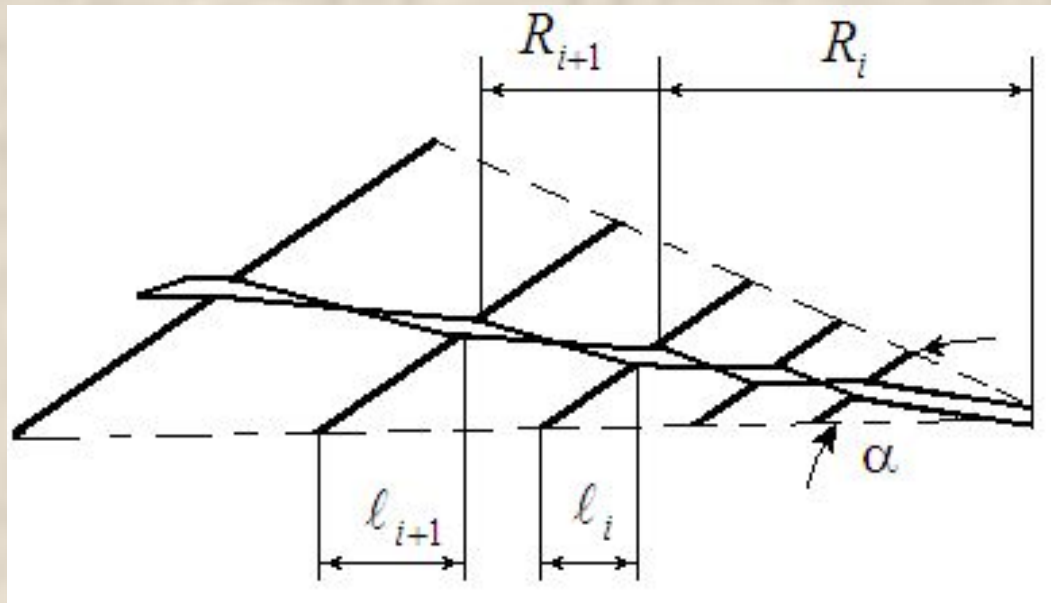
## 5. Логопериодическая антенна

Частотно-независимая антенна - антенна с практически постоянными электрическими параметрами и характеристиками излучения во всем рабочем диапазоне частот и высокой степенью согласования с фидером.

Такая антенна конструируется в соответствии с  $\lambda_1$   $\lambda_2$  с принципом электродинамического подобия, согласно которому две антенны на волнах с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и имеют одинаковые электрические характеристики, если их геометрические размеры пропорциональны отношению длин волн.

Логопериодическая антенна (ЛПА) представляет собой совокупность элементов, размеры и расстояния между которыми образуют геометрическую прогрессию со знаменателем,





**Рисунок 8- Конструкция  
ЛПВА**

$R_i$  - расстояние от вершины ЛПВА до  $i$ -ого элемента;

$l_i$  - половина продольного геометрического размера  $i$ -ого элемента.

Электрические характеристики ЛПА повторяются на частотах, которые задаются выражением

$$f_i = \nu f_0$$

где  $f_0; f_i$  - резонансные частоты самого длинного и  $i$ -

# Принцип действия ЛПВА

Пусть по фидерной линии к вершине ЛПВА подводится сигнал с частотой  $f_i$ , такой что данная частота является резонансной для  $i$ -ого элемента антенны. Длина плеча  $i$ -ого элемента  $l_i = \frac{c}{4f_i}$ . Расположенные в начале и в конце ЛПВА короткие и длинные в сравнении с длиной волны вибраторы практически не излучают, так как токи, ответвляющиеся в эти вибраторы малы по амплитуде в силу большой величины реактивной составляющей входного сопротивления элементов, определяемой в соответствии с выражением

Резонирующий  $i$ -ый элемент антенны возбуждается волной тока распределительного фидера наиболее интенсивно, так как величина его реактивной составляющей входного сопротивления элемента минимальна, а само входное сопротивление почти чисто активно. Соседние с резонирующим

**Таким образом**, существует так называемая **активная область** работы ЛПВА, в составе которой всегда присутствует от трех до пяти вибраторов. При этом токи в более длинных вибраторах должны опережать по фазе ток в резонирующем элементе, а токи в более коротких вибраторах отставать по фазе. Следовательно, более длинные вибраторы являются рефлекторами, а более короткие вибраторы являются директорами.

Если теоретически переместить рабочую точку в резонирующем элементе, то максимум излучения окажется направленным в сторону вершины более длинный вибратор по отношению к ранее рассмотренному случаю и активная область переместится вдоль ЛПВА к ее концу. Напротив, при увеличении частоты как активная область сместится к вершине антенны.

$$2\ell_{\max} \approx \frac{\lambda_{\max}}{2}; 2\ell_{\min} \approx \frac{\lambda_{\min}}{3}$$

Размеры самого длинного и самого короткого

# Основные параметры ЛПВА

1. Коэффициент перекрытия рабочего диапазона по частоте определен в виде:

Между введенными ранее периодом структуры и углом раскрыва структуры  $\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1-\tau}{\tau}$  существует взаимосвязь вида

2. Междурядный коэффициент или относительное расстояние между элементами, который может быть определен по формуле  $\sigma = 0,25(1-\tau) \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$

3. Оптимальный междурядный коэффициент определен в виде :  $\sigma_{opt} = 0,258\tau - 0,066$

При значениях междурядного коэффициента меньших оптимального КУ уменьшается, а при превышении оптимального происходит ухудшение направленных свойств антенны, заключающееся в появлении боковых лепестков в диаграмме направленности. Значения



4. Ширина активной области антенны и структуры соответственно определены в виде:

5. Число вибраторов ЛПВА: 
$$N_{\text{виб}} := 1 + \frac{\lg B_s}{\lg \left( \frac{1}{\tau} \right)}$$

6. Геометрическая протяженность (длина) ЛПВА: 
$$\left( \frac{1}{B_s} \right) \left( \frac{4\sigma}{1-\tau} \right) \frac{\lambda_{\text{max}}}{4}$$

## Характеристики излучения ЛПВА

Комплексная амплитуда напряженности электрического поля отдельного элемента ЛПВА определена в виде:

$$E_i(\theta, \varphi) = \frac{60 j \cdot I_i}{\sin(k \cdot l_i)} \cdot \frac{\cos(k \cdot l_i \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\varphi)) - \cos(k \cdot l_i)}{\sqrt{1 - (\sin(\theta) \cdot \sin(\varphi))^2}} \cdot \frac{\exp(-j \cdot k \cdot R_1)}{R_1}$$

где  $R_1 = \sqrt{R^2 + r_i^2 - 2 \cdot R \cdot r_i \cdot \cos(\theta)}$  и  $r_i$  - расстояние от клемм самого длинного элемента до клемм  $i$ -ого элемента.  
 $R$  - расстояние от клемм самого длинного элемента до точки

**Комплексная амплитуда напряженности электрического поля ЛПВА в дальней зоне представляет собой сумму комплексных амплитуд полей, создаваемых в дальней зоне всеми элементами ЛПВА**

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{i=1}^N E_i(\theta, \varphi)$$

**Амплитудная характеристика направленности ЛПВА:**

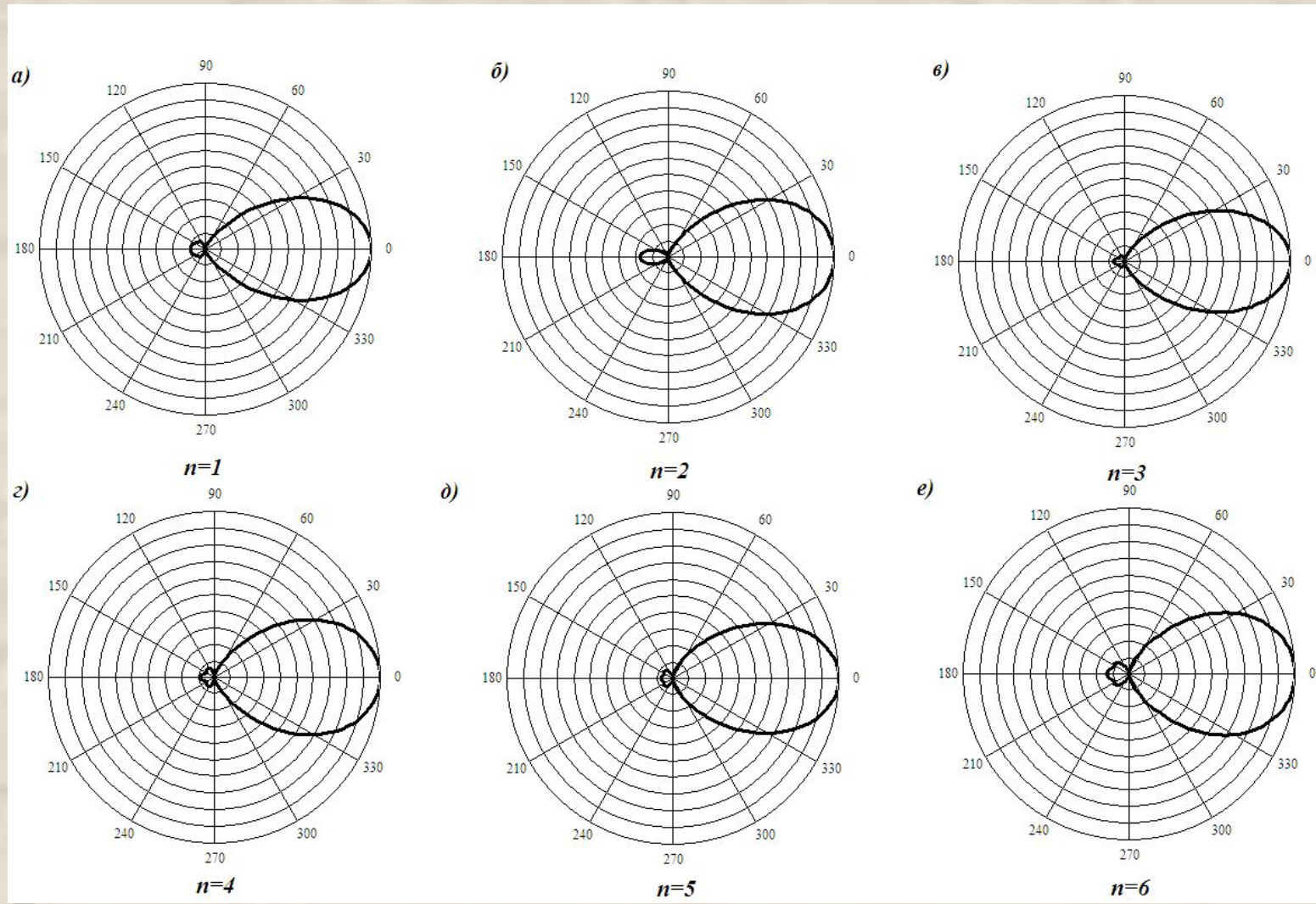
$$E(\theta, \varphi) = \left| \sum_{i=1}^N E_i(\theta, \varphi) \right|$$

**КНД в направлении максимального излучения ЛПВА:**

$$D_{max} = \frac{4\pi \cdot E_{max}^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E(\theta, \varphi)|^2 \sin(\theta) d\theta d\varphi}$$

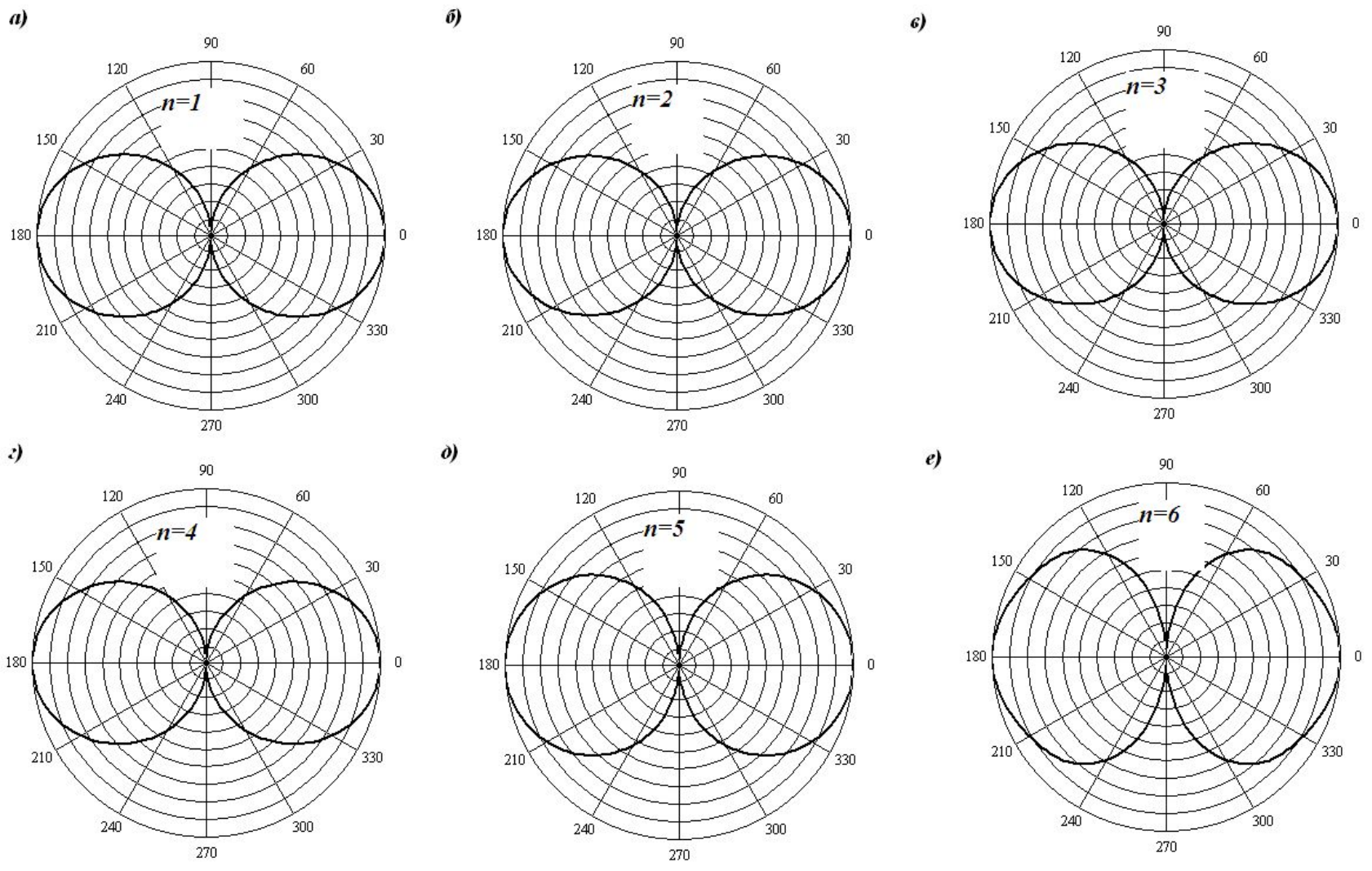
**Поляризационная диаграмма и коэффициент эллиптичности ЛПВА:**

$$P(\phi) = \left| E\left(\frac{\pi}{2}, \phi\right) \right|; K_{эл} = P\left(\frac{\pi}{2}\right) / P(0)$$



**Рисунок 9 – Нормированные ДН 12-ти элементной ЛПВА при изменении рабочей частоты с резонансной частоты 1-ого по резонансную частоту 6-ого элементов**





**Рисунок 10 – Поляризационные диаграммы 12-ти элементной ЛПВА при изменении рабочей частоты с резонансной частоты 1-ого по резонансную частоту 6-ого элементов**