

УДК 621.396.677.8

**ВНЕПОЛОСНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛЕВИЗОННЫХ АНТЕНН ТИПА  
«ВОЛНОВОЙ КАНАЛ»**

ЦАЛИЕВ Т.А.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

**OUTSIDE OF BANDWIDTH CHARACTERISTICS OF « YAGI-UDA» TYPE  
TV ANTENNAS**

TSALIEV T.A.

Odessa national academy of telecommunications named after O.S. Popov

*Аннотация.* Рассмотрены и обсуждены результаты численного моделирования внеполосных характеристик пятиэлементной телевизионной (ТВ) антенны типа «волновой канал», основанные на решении интегрального уравнения методом моментов.

*Summary.* Results of numerical modeling on the basis of solution of integral equations characteristics of the five-element Yagi-Uda TV antenna by method of moments are considered and discussed.

Процесс развития мировой цивилизации повсеместно сопровождается появлением и внедрением новых цифровых технологий, новых видов модуляции, новых способов передачи сигналов и новых технических решений, повышающих роль и значение таких средств коммуникации, как радиоэлектронные средства (РЭС), что обостряет проблему электромагнитной совместимости ЭМС.

В телевизионных РЭС большое влияние на качественные показатели играют, в частности, характеристики радиопередающего (РПУ) и радиоприемного (РПрУ) устройств.

Основное функциональное назначение РПУ – это формирование и излучение с помощью передающей антенны полезного сигнала. Кроме основного (полезного) радиоизлучения, в излучении антенны РПУ присутствуют внеполосные (нежелательные) излучения. Эти излучения могут создавать непреднамеренные помехи другим РЭС, в частности, ухудшая условия приема ТВ сигналов в том числе сигналов цифрового ТВ вещания.

Аналогично этому антенны РпрУ функционально предназначенные для приема полезного сигнала и передаче его на вход приемного устройства наряду с полезным могут поступать интенсивные помехи, поскольку ТВ антенны способны принимать излучения вне основной (рабочей) полосы частот, что ухудшает условия ЭМС, приводит, в частности, к возникновению нелинейных эффектов в тракте приема.

Характеристики передающих и приемных антенн в рабочей полосе частот, такие как коэффициент усиления, диаграмма направленности (ДН) и ее параметры, степень согласования антенны с нагрузкой обычно приводятся в технической документации.

Подобные сведения о внеполосных (т.е. на частотах вне рабочей полосы) характеристиках антенн в подавляющем большинстве случаев отсутствуют. «Внеполосные характеристики антенн в настоящее время не нормируются, не контролируются при их производстве или сертификации и не приводятся в эксплуатационной и иной технической документации [1]».

В отдельно взятом конкретном случае такие характеристики, могут быть определены экспериментально с использованием известных методов измерения параметров антенн [2].

Гораздо более эффективным вариантом является расчет внеполосных характеристик антенны на основе компьютерного моделирования с использованием современных компьютерных программных пакетов, например таких, как MMANA [3], Microwave Studio (MWS) [4], High Frequency System Simulator (HFSS) [5], Feldberechnung bei Körpern mit beliebiger Oberfläche (FEKO) [6] в которых для расчета пространственных и импедансных характеристик антенн и антенных систем используются строгие электродинамические методы.

Однако имеющиеся в литературе сведения о внеполосных характеристиках антенн носят отрывочный и зачастую приближенный характер [1] и возникает необходимость более детального изучения таких характеристик с применением современных компьютерных технологий.

Целью данной работы является исследование свойств многоэлементных директорных антенн (в англоязычной терминологии – антенны Yagi-Uda [7,8]) вне рабочей полосы частот, что позволит в процессе анализа и обеспечения ЭМС в условиях цифрового ТВ вещания корректно учитывать электродинамические характеристики таких антенн.

### ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ АНТЕННЫ

Рассматриваемая модель директорной антенны содержит пять элементов: активный петлевой вибратор, рефлектор и три директора. Ориентация антенны в системе координат, относительные размеры элементов, а также расстояния между ними показаны на рис 1.

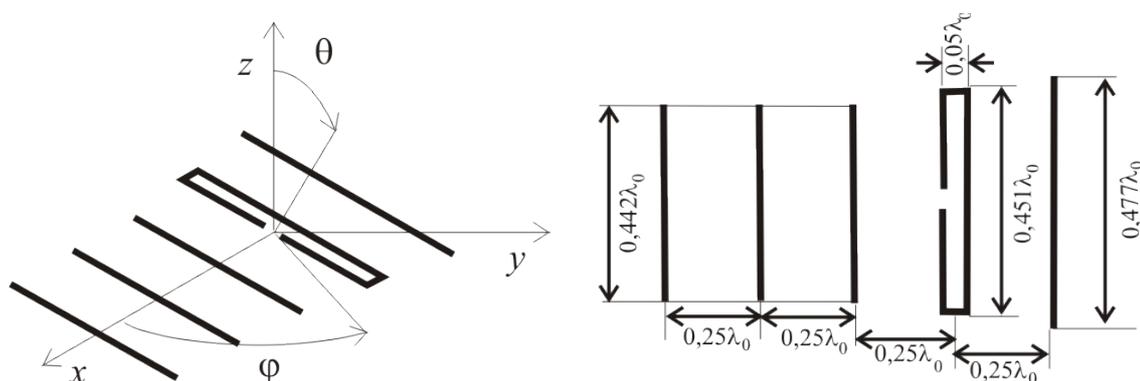


Рисунок 1 – Геометрические параметры антенны

Все проводники антенны имеют вид металлических круговых цилиндров диаметром  $0.01 \lambda_0$  и считаются идеально проводящими. Численные значения размеров антенны подобраны так, чтобы на исходной длине волны ( $\lambda_0 = 1 \text{ м}$ ,  $f_0 = 300 \text{ МГц}$ ), коэффициент направленного действия в осевом ( $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0$ ) направлении по возможности был наибольшим. Активный вибратор возбуждается источником сторонней ЭДС единичной амплитуды.

Компьютерное моделирование характеристик антенны осуществляется в пакете программ FEKO на основе метода моментов реализуемого в частотной области.

Этот метод состоит в том, что численное определение поля основано на аналитическом решении некоторой ключевой задачи, а именно задачи о возбуждении антенны элементарным источником, при этом рассматриваемая структура, состоящая из проводящих элементов, разделяется в процессе дискретизации на отдельные равные сегменты [6] и вычисляется распределение токов в этих сегментах.

Это позволяет определить далее такие характеристики антенны, как зависимости входного импеданса  $Z_{\text{вх}}$ , коэффициента направленного действия  $D(\theta, \varphi)$  и коэффициента отражения  $\rho$  от частоты.

Поскольку в рассматриваемом случае решение поставленной задачи осуществлялось в пятикратном диапазоне частот (300 МГц ... 1500 МГц), количество сегментов, приходящихся на единицу исходной длины волны и обеспечивающее сходимость решения на верхней частоте диапазона, выбрано равным 80.

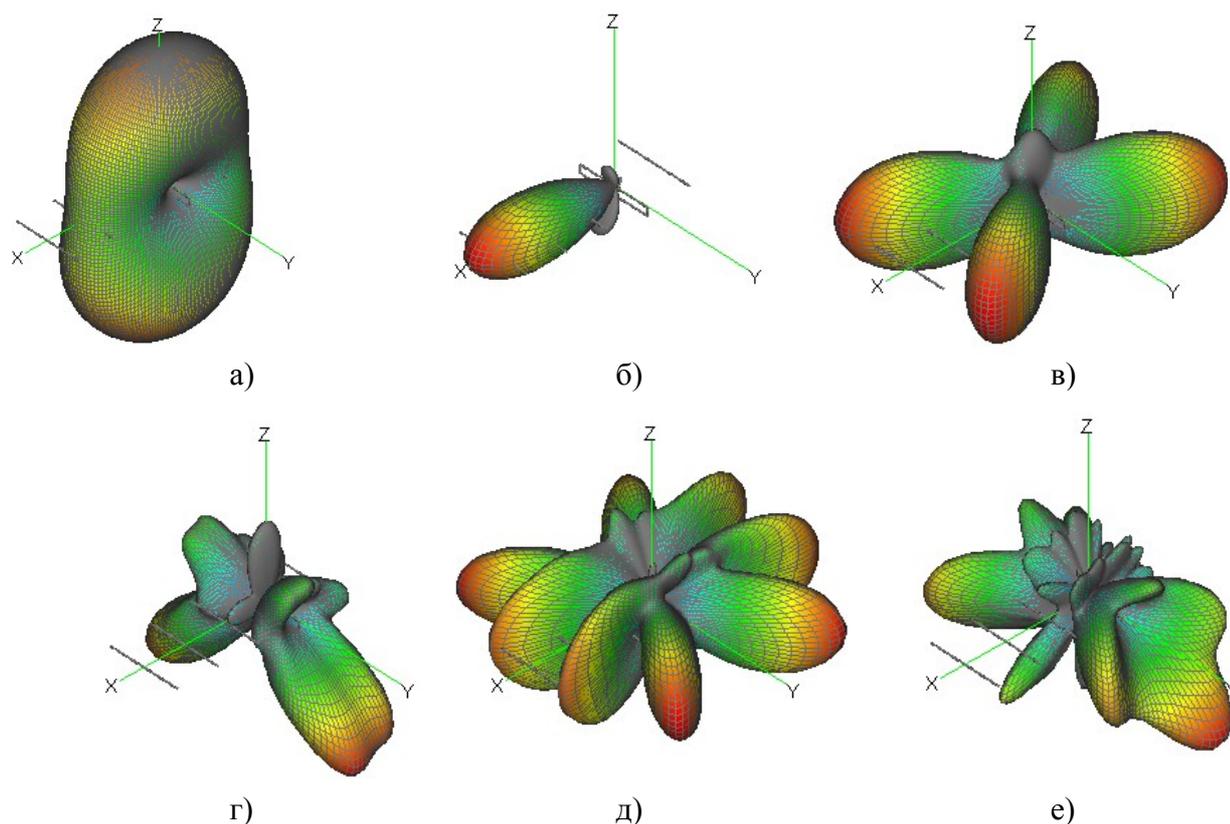


Рисунок 3 – Нормированные пространственные ДН антенны

На рисунке 3 показаны пространственные диаграммы направленности антенны, рассчитанные на частотах: 100 МГц (рис. 3, а), 300 МГц (рис. 3, б), 600 МГц (рис. 3, в), 900 МГц (рис. 3, г), 1200 МГц (рис. 3, д), 1500 МГц (рис. 3, е). Здесь каждая совокупность данных, по которым построена соответствующая диаграмма, нормирована к своему максимальному значению.

Полученные результаты показывают, что на частотах ниже частоты первого резонанса (300 МГц) ДН антенны подобна диаграмме одиночного вибратора. Об этом, в частности, свидетельствует рис. 3, а, где изображена ДН антенны на частоте 3-й субгармоники (100 МГц) исходной частоты. На частоте второй гармоники (600 МГц) излучение антенны в направлении оси  $x$  становится минимальным, при этом лепестки ДН ориентированы по нормали к плоскости  $xOy$ .

Отметим, что асимметрия диаграмм относительно плоскости  $xOy$ , наблюдаемая на этом и других рисунках, обусловлена, по-видимому, отличиями амплитудно-фазовых распределений токов на верхней и на нижней частях активного вибратора.

На частотах третьей (900 МГц) и более высоких гармоник в ДН антенны появляется несколько главных лепестков, которые ориентированы под различными углами по отношению к координатным осям. При этом интересно то, что на всех гармониках исходной частоты осевое излучение антенны оказывается минимальным.

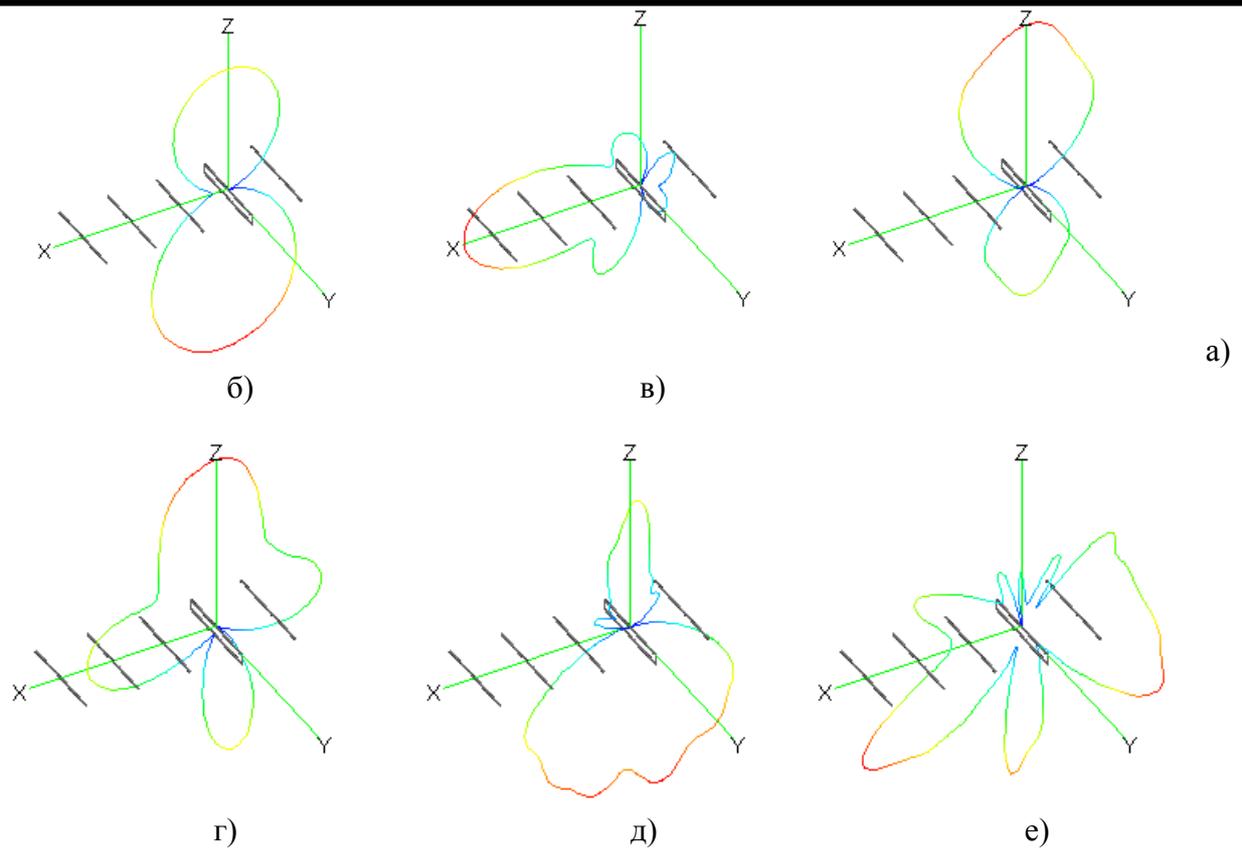


Рисунок 4 – Нормированные ДН антенны ( $\varphi = 0^\circ$ )

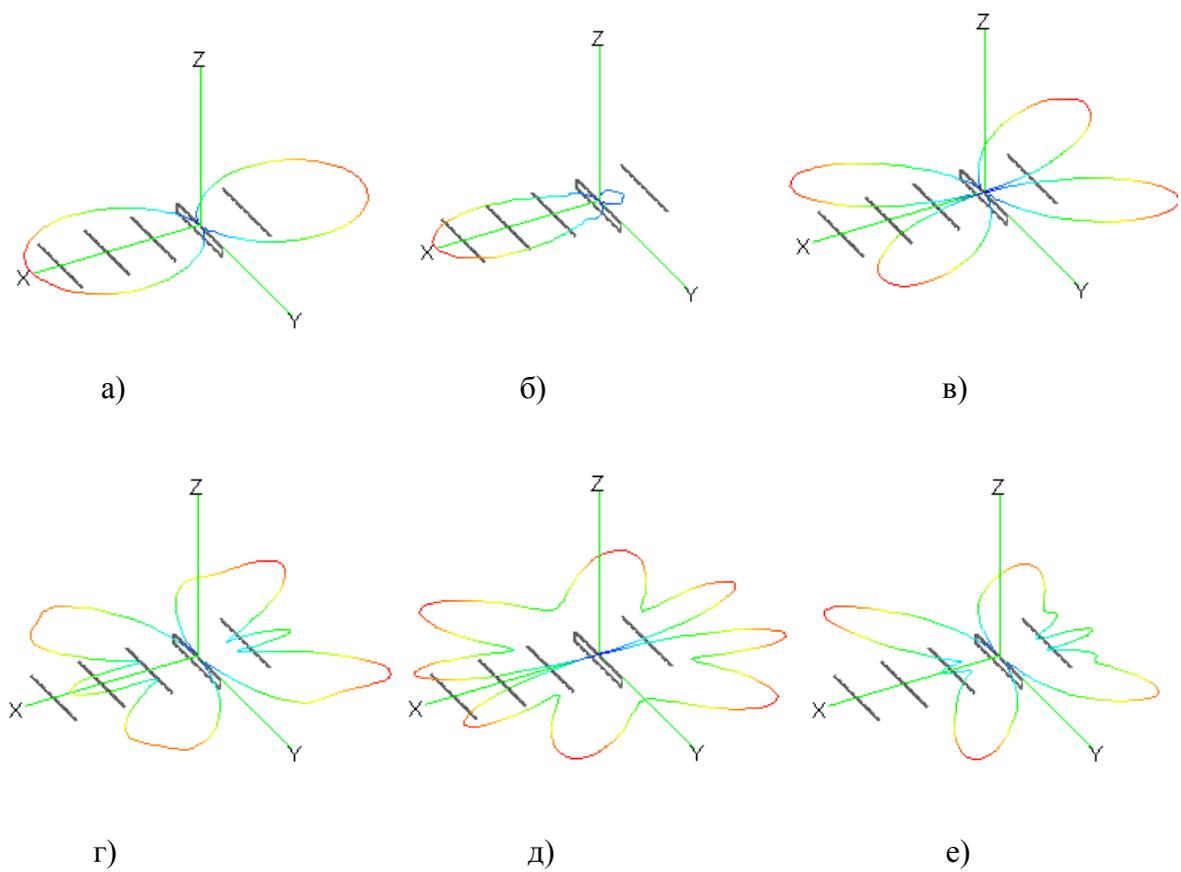


Рисунок 5 – Нормированные ДН антенны ( $\theta = 90^\circ$ )

Детальнее рассмотреть направленные свойства антенны можно на изображениях диаграмм, рассчитанных на тех же частотах (рис. 4 и рис. 5).

Рисунок 4 иллюстрирует направленные свойства рассматриваемой антенны в вертикальной плоскости, проходящей через ось антенны (плоскость  $xOz$ ). Видно, что вне рабочей полосы частот излучение антенны в этой плоскости направлено, в основном, «вверх» либо «вниз» относительно антенны.

На рисунке 5 изображены ДН рассматриваемой антенны иллюстрирующие особенности излучения, формируемого антенной в горизонтальной плоскости, проходящей через ось антенны (плоскость  $xOy$ ).

Основываясь на приведенных рисунках можно заключить, что данная антенна формирует максимальное излучение в осевом направлении только в рабочей полосе частот (рис. 3, б и 4 б), при этом внеполосные ДН антенны имеют несколько главных лепестков. Как и следовало ожидать, количество этих лепестков и их направление определяется отношением  $l/\lambda$ .

При анализе интенсивности внеполосного излучения антенны важно наряду с особенностями ее направленных свойств учитывать особенности изменения КНД и коэффициента усиления антенны при вариации частоты (длины волны  $\lambda$ ).

Так, например, изменения максимального коэффициента направленного действия в вертикальной и горизонтальной плоскости при вариации отношения  $l/\lambda$  (где  $l$  – длина плеча активного элемента антенны, а интервал дискретизации при выборе частот составляет 5 МГц) иллюстрируют графики, изображенные на рисунке 6.

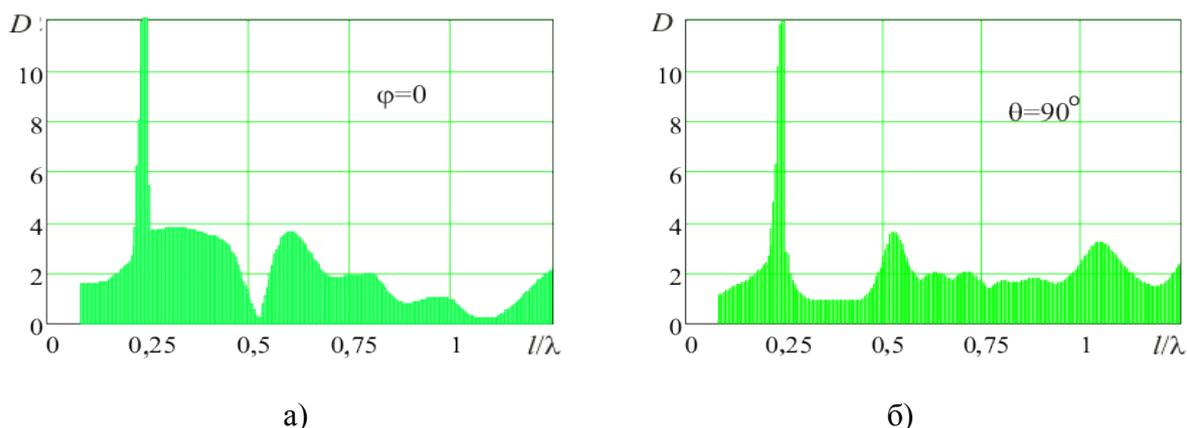


Рисунок 6 – Зависимости коэффициента направленного действия

И здесь можно отметить, что в вертикальной плоскости (рис. 6, а) наибольшее значение КНД  $D_{\max} = 12,1$  имеет место при  $l/\lambda = 0,245$ . В остальных случаях, например, при  $l/\lambda = 0,6$ , где  $D_{\max} = 3,58$  при  $l/\lambda = 1,24$ , где  $D_{\max} = 2,09$  значение КНД относительно невелико.

В отличие от этого в горизонтальной плоскости (рис. 6, б) заметные локальные максимумы КНД наблюдаются при  $l/\lambda = 0,525$ , где  $D_{\max} = 3,65$  и  $l/\lambda = 1,05$ , где  $D_{\max} = 3,26$ .

На внеполосный коэффициент усиления существенное влияние оказывает степень согласования антенны с нагрузкой, поскольку при отсутствии потерь в элементах антенны функциональная зависимость КУ от угловых координат определяется соотношением

$$G(\theta, \varphi) = (1 - |\rho|)D(\theta, \varphi).$$

На рисунке 7 изображены зависимости коэффициента усиления  $G(\theta, \varphi)$  антенны.

Сравнение данных, приводимых на рис. 6 и рис. 7, показывает, что вне рабочей полосы частот имеет место существенное рассогласование антенны с питающей линией. Это приводит к снижению внеполосного коэффициента усиления антенны примерно в 5...10 раз на частотах,

находящихся значительно ниже  $f_0$  ( $l/\lambda_0 = 0,25$ ), и, приблизительно, в 1,5...3 раза, на более высоких частотах.

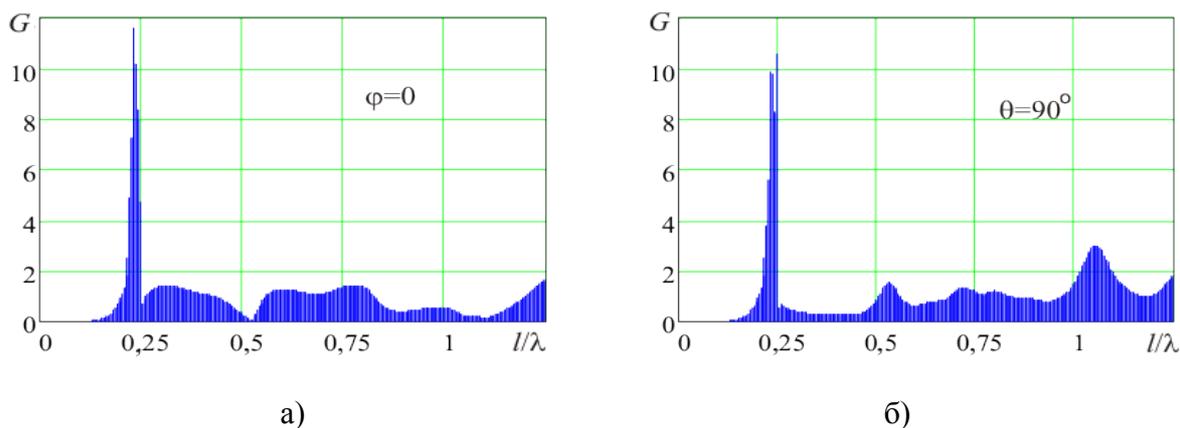


Рисунок 7 – Зависимости коэффициента усиления антенны

Интересно также проследить зависимости максимальных (из взятых по любому направлению) значений КНД и КУ при вариации отношения  $l/\lambda$ , которые иллюстрируют графики, изображенные на рисунке 8.

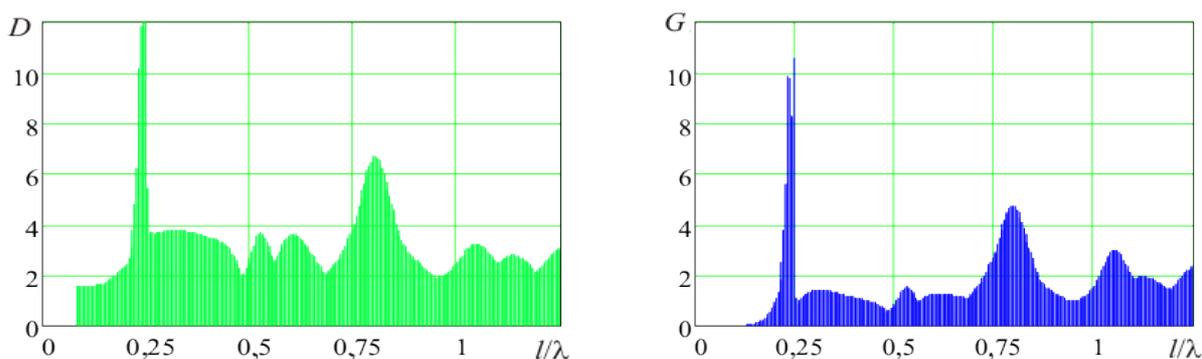


Рисунок 8 – Максимальные значения КНД и КУ антенны

Видно, что наиболее неблагоприятная область возможного внеполосного излучения антенны находится вблизи третьей гармоники исходной частоты (точнее, при  $l/\lambda \approx 0,81$ ), где КНД и КУ достигают значений 6,7 и 4,75, соответственно, что примерно лишь в два раза меньше максимальных значений этих величин на частоте  $f_0$ .

В промежутке от  $l/\lambda \approx 0,26$  и вплоть до  $l/\lambda \approx 0,75$  эффект рассогласования приводит к снижению максимального внеполосного КУ примерно в два раза. При  $l/\lambda > 1$  этот эффект не столь заметен и максимальное значение КУ мало отличается от КНД.

Характер изменений нормированного модуля коэффициента отражения при вариации отношения  $l/\lambda$  для рассматриваемой антенны, иллюстрирует кривая, показанная на рисунке 9. Для сравнения на этом же рисунке приведена аналогичная зависимость для одиночного петлевого вибратора. При выбранных геометрических параметрах антенны минимальное значение  $|\dot{p}|$  достигается при величине активного сопротивления нагрузки равной 110 Ом, а для одиночного петлевого вибратора – примерно равной 292 Ом.

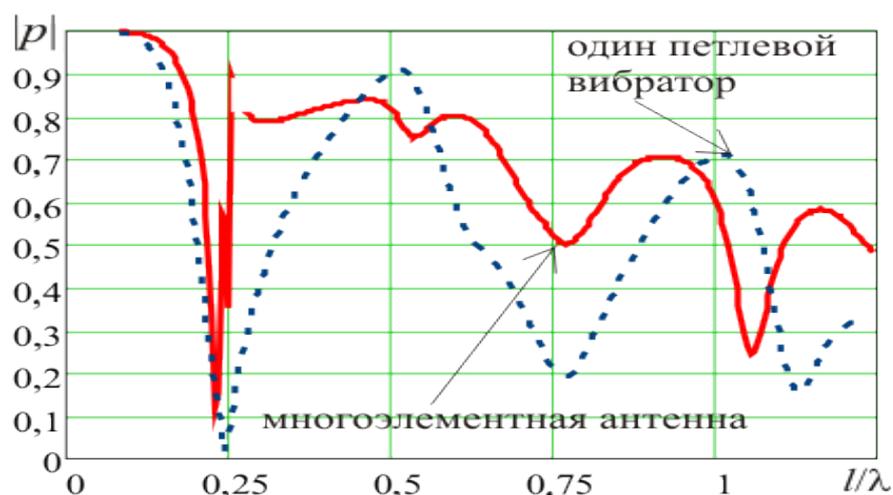


Рисунок 9 – Зависимости входного импеданса и модуля коэффициента отражения

Видно, что наличие пассивных вибраторов в многоэлементной антенне резко изменяет частотную зависимость модуля коэффициента отражения, что, в свою очередь приводит к изменениям внеполосного максимального КУ.

В заключение можно сказать, что результаты, приведенные в данной работе, позволили наглядно продемонстрировать особенности направленных свойств ТВ антенны типа «волновой канал», установить численные значения КНД и коэффициента усиления антенн и характер изменений этих характеристик вне рабочего диапазона частот, что представляет особый интерес при рассмотрении задач ЭМС.

Результаты данной работы могут послужить основой дальнейших исследований внеполосных характеристик более сложных антенных систем, а также определить направление исследований по оптимизации этих характеристик.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. Учебн. пособие / Под ред. д.т.н. проф. М.А. Быховского. – М.: Эко-Трендз, 2006. – 376 с.
2. Фрадин А.З. Измерения параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В.Рыжков. – М. Связьиздат, 1962. – 316 с.
3. Гончаренко. И. В. Компьютерное моделирование антенн / И. В. Гончаренко. – М.: Радиософт, 2002. – 41 с.
4. Банков С.Е. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: 2008. – 276 с.
5. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS. Изд.2, доп. / С.Е. Банков, А.А. Курушин, В.Д. Радзевиг – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 216 с.
6. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.
7. IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas [Электронный ресурс] / The institute of Electrical and Electronics Engineers – Режим доступа : www. – URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/145-1993.html>
8. Balanis C. A. Modern antenna handbook / C. A. Balanis. – John Wiley & Sons, Canada, 2008. – 1680 с.