

## ВИБРАТОРЫ С НЕРАВНОМЕРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА

### Введение

В последнее десятилетие значительно возросла актуальность исследования электродинамических устройств в целом и антенн в частности, поверхностный импеданс которых обладает нелинейными свойствами. С одной стороны, это связано с интенсивными исследованиями и внедрениями в такие устройства новых материалов, например высокотемпературных сверхпроводников, обладающих нелинейными свойствами. С другой стороны, растет степень интеграции электродинамических устройств с различного рода сосредоточенными и распределенными в пространстве нелинейными элементами коммутации и управления параметрами (транзисторами, диодами, MEMS и т.п.), что обеспечивает появление многофункциональных блоков приема, обработки и передачи сигнала.

Отмеченные обстоятельства требуют тщательного анализа характеристик таких устройств, так как они приобретают специфические особенности в силу присутствия материалов с распределенным или квазираспределенным поверхностным импедансом.

### Постановка задачи

Ранее авторами при помощи программы WIRE [1] были проведен ряд исследований нелинейных эффектов, возникающих в тонкопроволочном четвертьволновом вибраторе, расположенном над идеально проводящим экраном (рис.1) [2, 3]. Диаметр вибратора  $2a$  составлял одну тысячную длины волны возбуждающего колебания  $\lambda_0$ . Исследования проводились на пяти гармониках при возбуждении излучателя источниками тока, ЭДС и мощности на частоте  $f_0 = 1 ГГц$ .

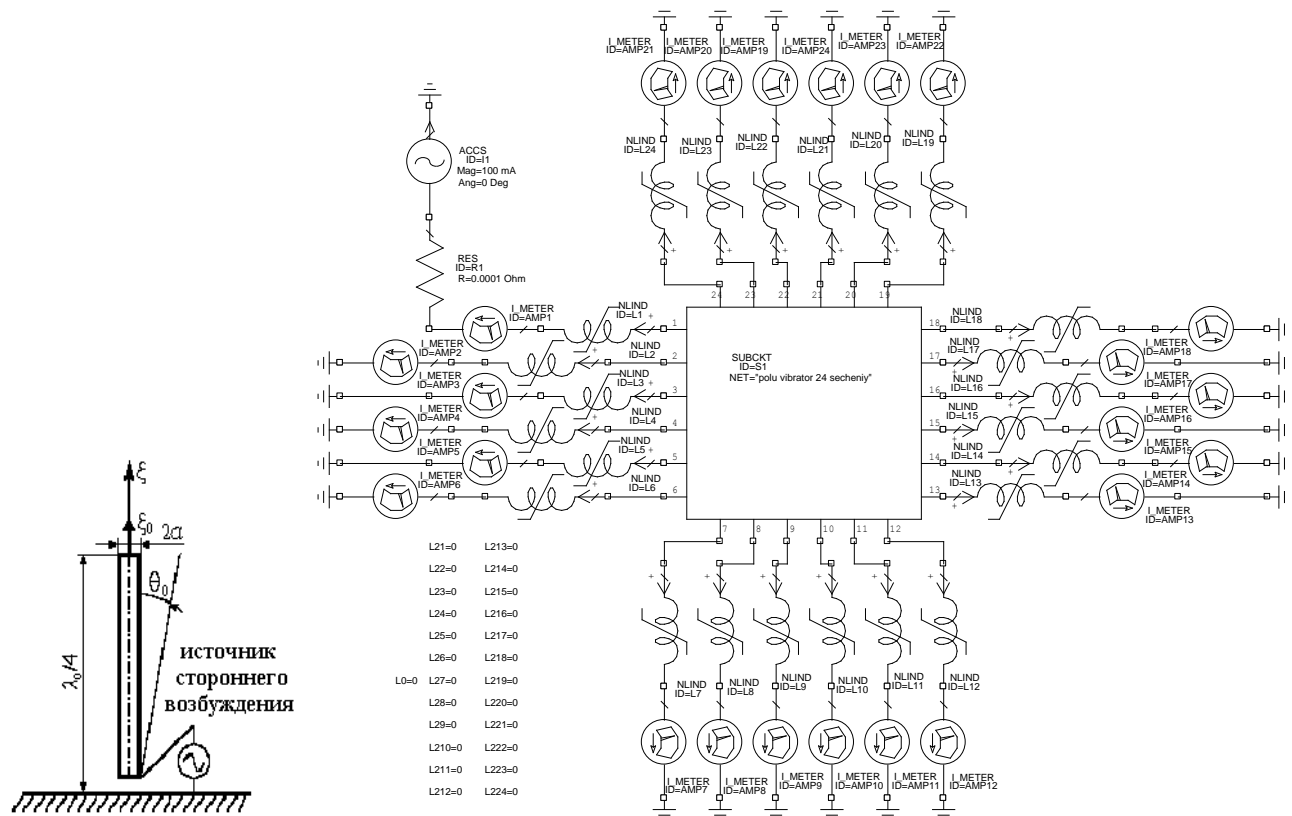


Рис. 1

При этом считалось, что в каждой точке поверхности излучателя выполняются нелинейные граничные условия [4, 5]:

$$\mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \hat{\mathbf{Z}}[\mathbf{n}(\mathbf{r}) \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)] \quad (1)$$

и в каждой точке излучателя поверхностный импеданс имеет нелинейные свойства, а усредненная величина эквивалентной нелинейной индуктивности описывается полиномиальной зависимостью следующего вида [3]:

$$L(\xi) = L_0(\xi) + L_2(\xi)I(\xi, t)^2, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  и  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$  – мгновенные значения тангенциальных составляющих векторов напряженности электрического и магнитного полей на поверхности проводника;  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$  – внешняя нормаль к поверхности проводника;  $\hat{\mathbf{Z}}[ ]$  – оператор, описывающий нелинейные свойства поверхностного импеданса;  $L_0(\xi)$  и  $L_2(\xi)$  – коэффициенты, описывающие линейную и нелинейную части индуктивности;  $I(\xi, t)$  – временная зависимость полного тока через поперечное сечение проводника с координатой  $\xi$ .

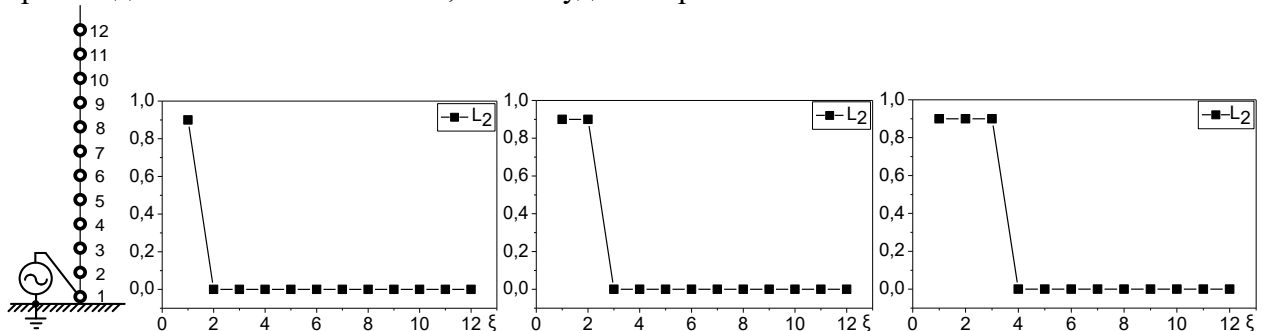
Здесь же авторы приводят результаты дальнейших исследований нелинейных эффектов возникающих в простейших излучающих структурах (четвертьволновых и полуволновых вибраторах). Однако акцент сделан на *неравномерном распределении нелинейности* поверхностного импеданса на поверхности таких структур. Размеры излучателей и параметры их возбуждения выбраны аналогичными ранее взятым.

Исследования проводились при помощи двух программ – WIRE и Microwave Office. При помощи первой из них на соответствующих частотах определялись матрицы собственных и взаимных сопротивлений вибраторов с линейным поверхностным импедансом (ЛПИ). В программе же Microwave Office, на базе полученных в WIRE данных, формировалась полная модель антенны с квазираспределенным нелинейный поверхностный импедансом (НПИ). Модель состояла из линейного и нелинейного многополюсников [4, 5], а также сторонних источников возбуждения (рис. 2).

Помимо матрицы собственных и взаимных сопротивлений линейного многополюсника SUBCKT, соответствующей излучателю с ЛПИ, нелинейных элементов NLIND, описываемых полиномиальной зависимостью (2) и источника тока ACCS, возбуждающего структуру, в схему включали измерительные приборы. При помощи амперметров I\_METER определялось распределение тока вдоль проводника излучателя. Найденные значения токов позволило при помощи WIRE определить также диаграммы направленности (ДН) таких структур.

### Результаты исследований

Первые исследования были связаны с изучением влияния формы распределения нелинейности импеданса (величины коэффициента  $L_2$ ) на ток вдоль *несимметричного четвертьволнового вибратора*. При этом значение  $L_2$  вдоль оси вибратора изменялось в 12 областях равноудаленных друг от друга на расстояние  $\lambda_0/48$  (рис. 3, а). Возбуждение производилось источником тока, амплитуда которого составляла 100 мА.



$L_2=0,9-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0$ 

а

 $L_2=0,9-0,9-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0$ 

б

 $L_2=0,9-0,9-0,9-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0 \dots$ 

Рис. 3

Сначала определили распределение модуля тока для случая, когда НПИ с  $L_0=0$  мкГн,  $L_2=0,9$  мкГн/мА<sup>2</sup> был лишь в области возбуждения (область 1 на рис. 3, а). В остальных местах излучатель обладал ЛПИ. Далее  $L_2=0,9$  мкГн/мА<sup>2</sup> установили в областях 1 и 2; 1, 2 и 3 и т.д. (рис. 3, б). Влияние «расширения зоны нелинейности» приведено на рис. 4, а, б, в. На этом и последующих рисунках индексы «В», «С» и «D» отвечают результатам расчета соответственно на первой, третьей и пятой гармониках. Номера же при таких индексах отвечают варианту распределения нелинейности. Например, запись С4 соответствует случаю, когда нелинейность отличалась от нуля в областях 1, 2, 3, и 4, то есть распределение нелинейности по координате  $\xi$  вибратора можно записать в виде  $L_2=0,9-0,9-0,9-0,9-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0$ .

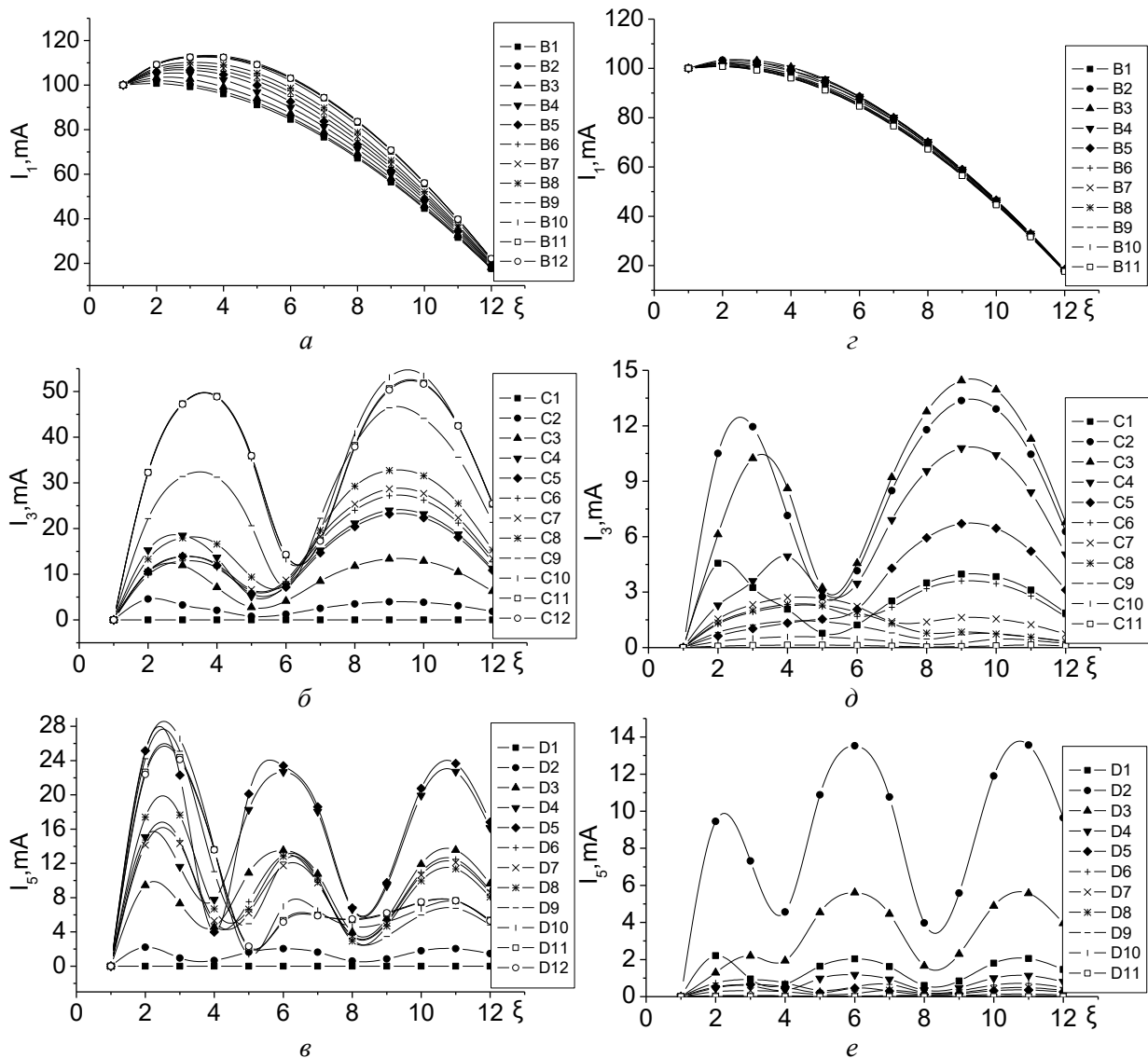


Рис. 4

Как можно заметить, такое изменение нелинейности вдоль вибратора практически не изменяет формы распределения модуля тока первой, третьей и пятой гармоник, однако приводит к существенному изменению амплитуды тока. Причем, в целом наблюдается тенденция роста амплитуды при «расширении нелинейности», что можно видеть на рис. 5, где отображена зависимость максимальной амплитуды распределения модуля первой, третьей и пятой гармоник тока от варианта N распределения нелинейности.

Следующим этапом было рассмотрение изменения распределения модуля тока при различном расположении «области НПИ» вдоль продольной координаты вибратора «смещение всплеска нелинейности» (рис. 4, г, д, е). В отличие от предыдущего варианта изменения распределения нелинейности вдоль вибратора, здесь в большей степени проявляется изменение формы распределения модуля тока высших гармоник, что можно увидеть, например, на рис. 7, где отображены распределения тока третьей гармоники для некоторых вариантов распределения НПИ. Также происходит изменение максимальной амплитуды тока гармоник. Причем при «смещении области нелинейности» существует такой вариант «расположения» области с НПИ на поверхности вибратора, при котором амплитуда тока максимальна (рис. 8). Изменение амплитуды первой гармоники относительно невелико.

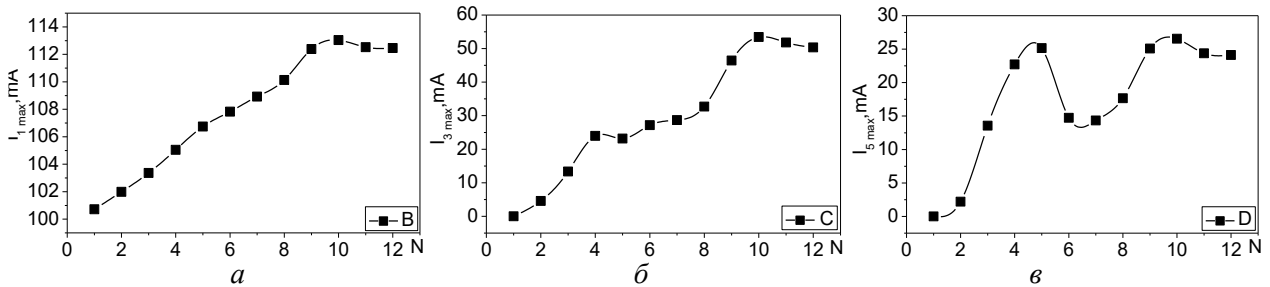


Рис.5

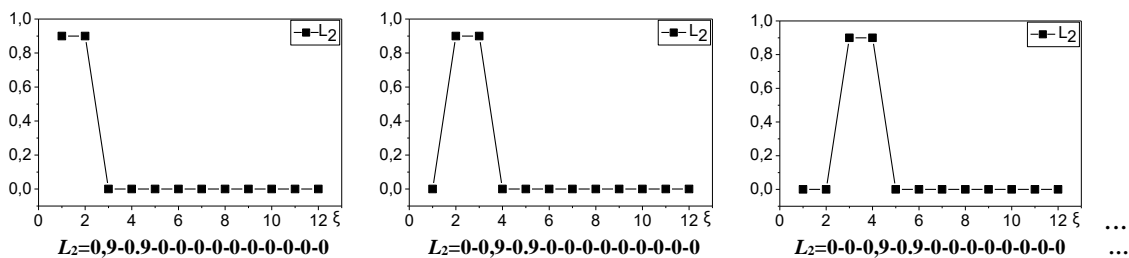


Рис.6

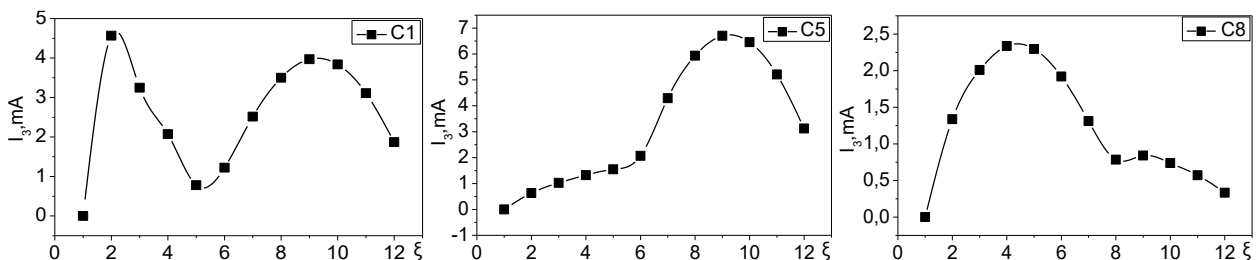


Рис.7

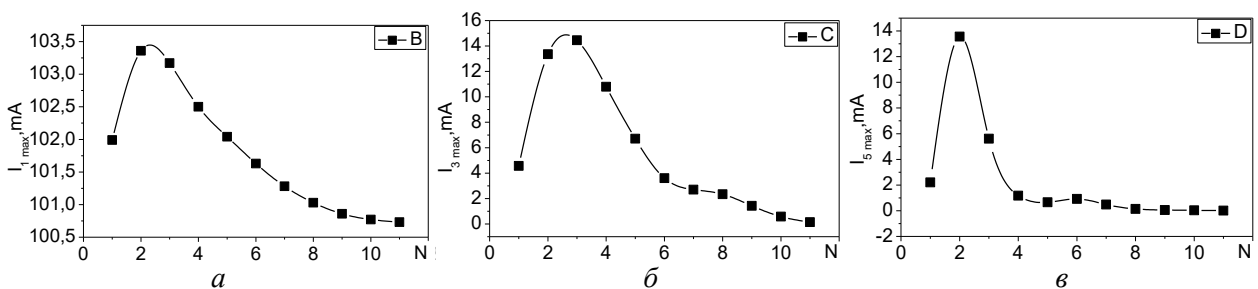


Рис. 8

Подобные вариации в распределении нелинейности можно провести и для случая возбуждения излучателя источником ЭДС, например, обладающего амплитудой 10 В. При этом оказалось, что вариант «смещения всплеска нелинейности» для данного случая в большей степени схож на вариант «расширения зоны нелинейности» при возбуждении источником тока – форма модуля тока вдоль вибратора практически не изменяется, а основной эффект в изменении распределения нелинейности заключается в изменении амплитуды тока (рис. 9, а, б, в), хотя и не имеет, за исключением первой гармоники, четко

выраженной тенденции, что видно из рис. 10, где отображены зависимости максимальной амплитуды гармоник тока от варианта распределения НПИ.

Четкая тенденция в изменении максимума прослеживается в случае возбуждения источником ЭДС и «расширения зоны нелинейности». Однако при этом в значительно большей степени происходит и изменение формы модуля тока (рис.9, з, д, е и рис. 11).

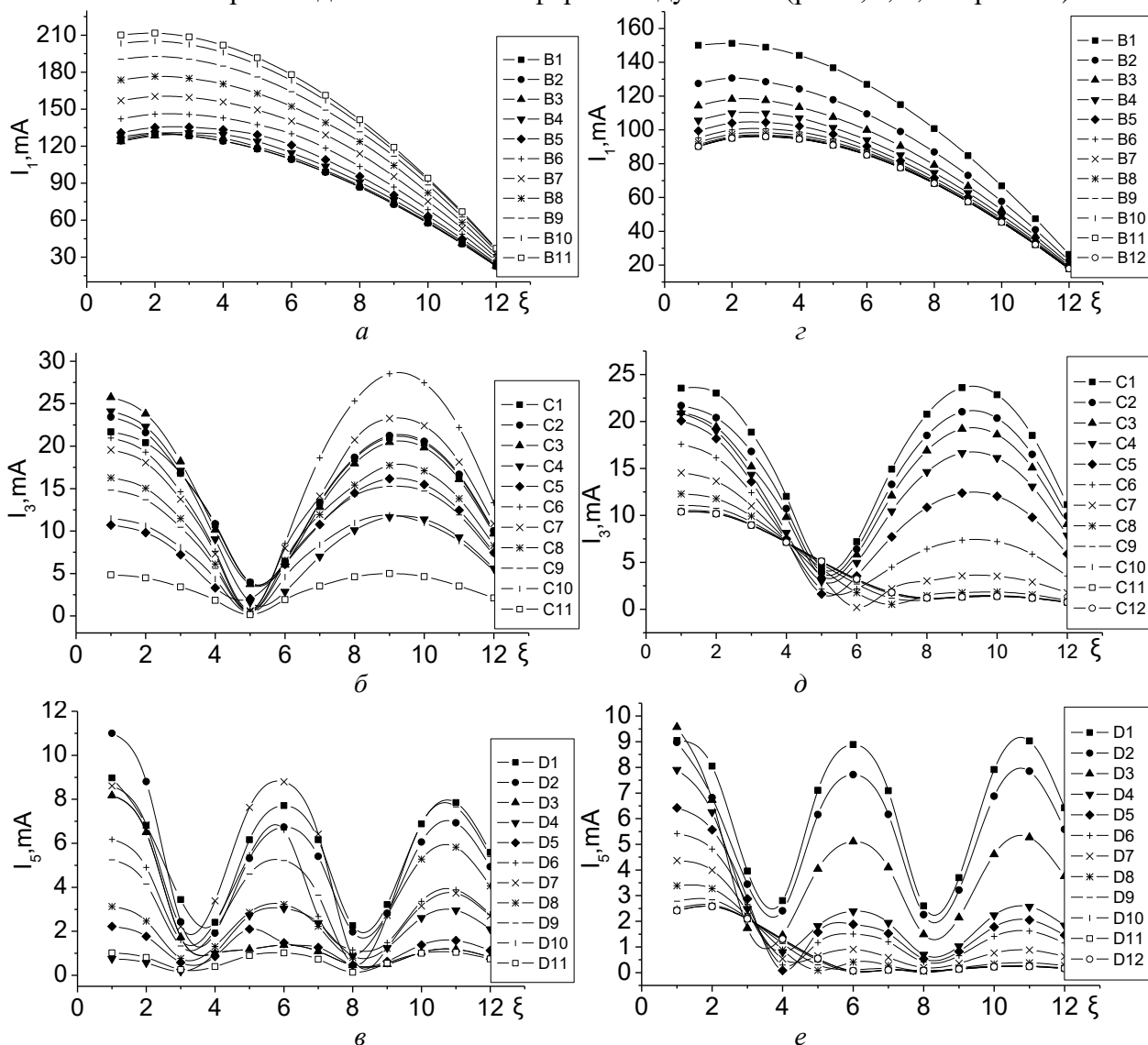


Рис. 9

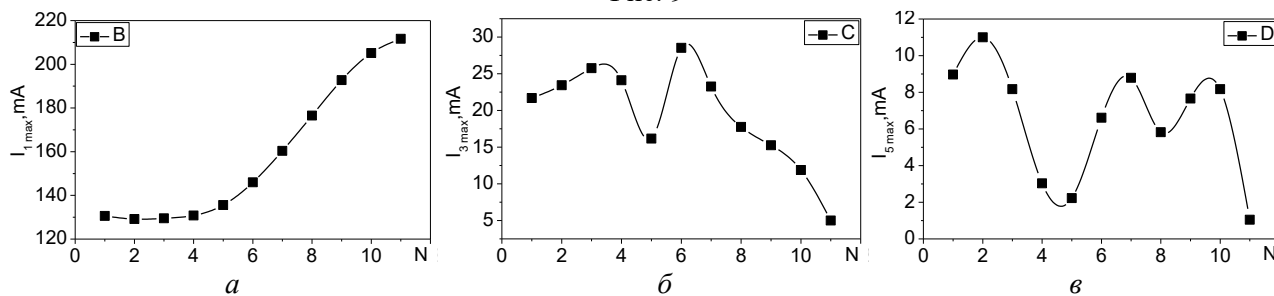


Рис. 10

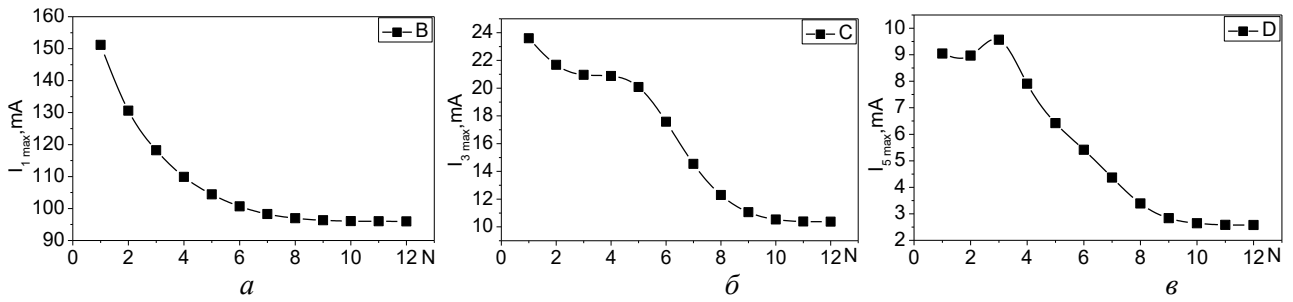


Рис. 11

Что же случится, когда для заданного распределения нелинейности вдоль излучателя мы изменим величину нелинейности? Ответ на данный вопрос для случая распределения нелинейности типа  $L_2=X-X-X-X-X-X-0-0-0-0-0-0$ , ( $X = 0,1; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5$  – для случая возбуждения источником тока с амплитудой  $100\text{ мА}$ , и  $X = 0,1; 0,9; 1,5; 3,0; 4,0; 5,0$  – для случая возбуждения источником ЭДС с амплитудой  $10\text{ В}$ ) показан на рис.12 – 14 (графики рис.12, а, б, в и рис. 13 соответствуют случаю возбуждения источником тока, графики рис. 12, г, д, е и рис.14 – возбуждению ЭДС). Из графиков видно, что при изменении лишь величины нелинейности форма распределения модуля тока также практически не изменяется, а происходит изменение амплитуды тока. Характер изменения тока для разных источников возбуждения разный. При возбуждении источником тока и росте коэффициента  $L_2$  амплитуда тока растет (рис. 14), а при возбуждении источником ЭДС – падает (рис.15), и наоборот.

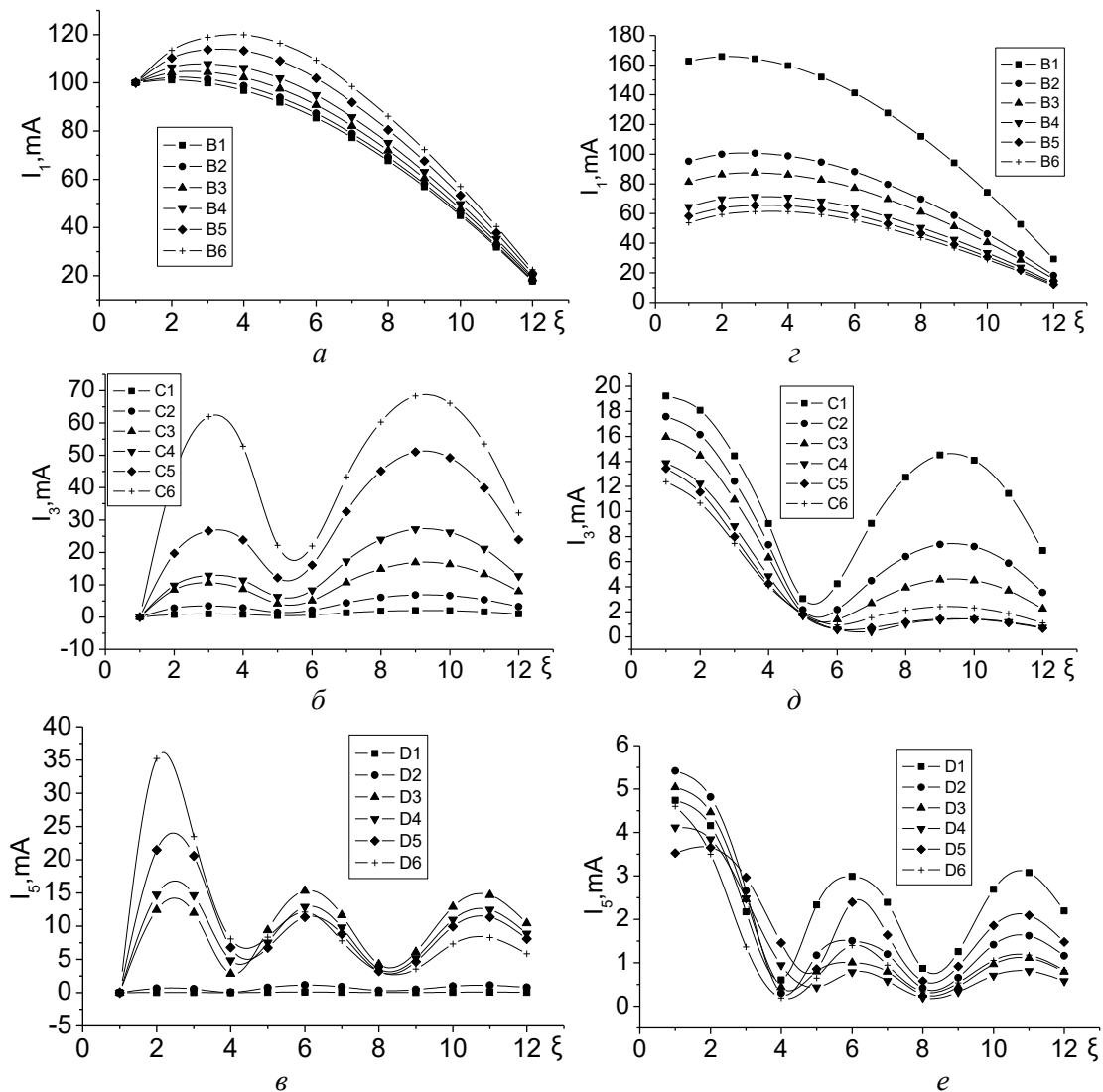


Рис.12

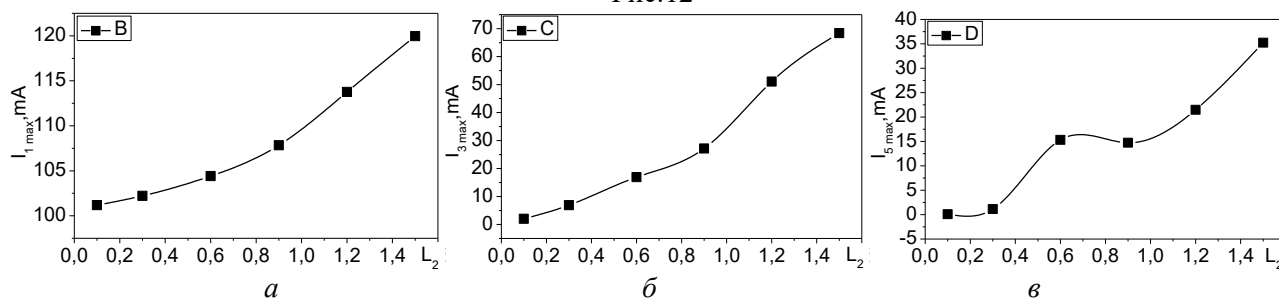


Рис.13

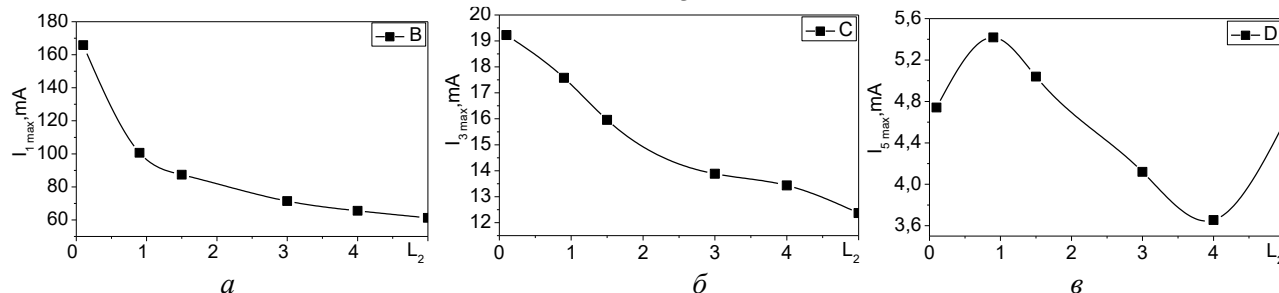
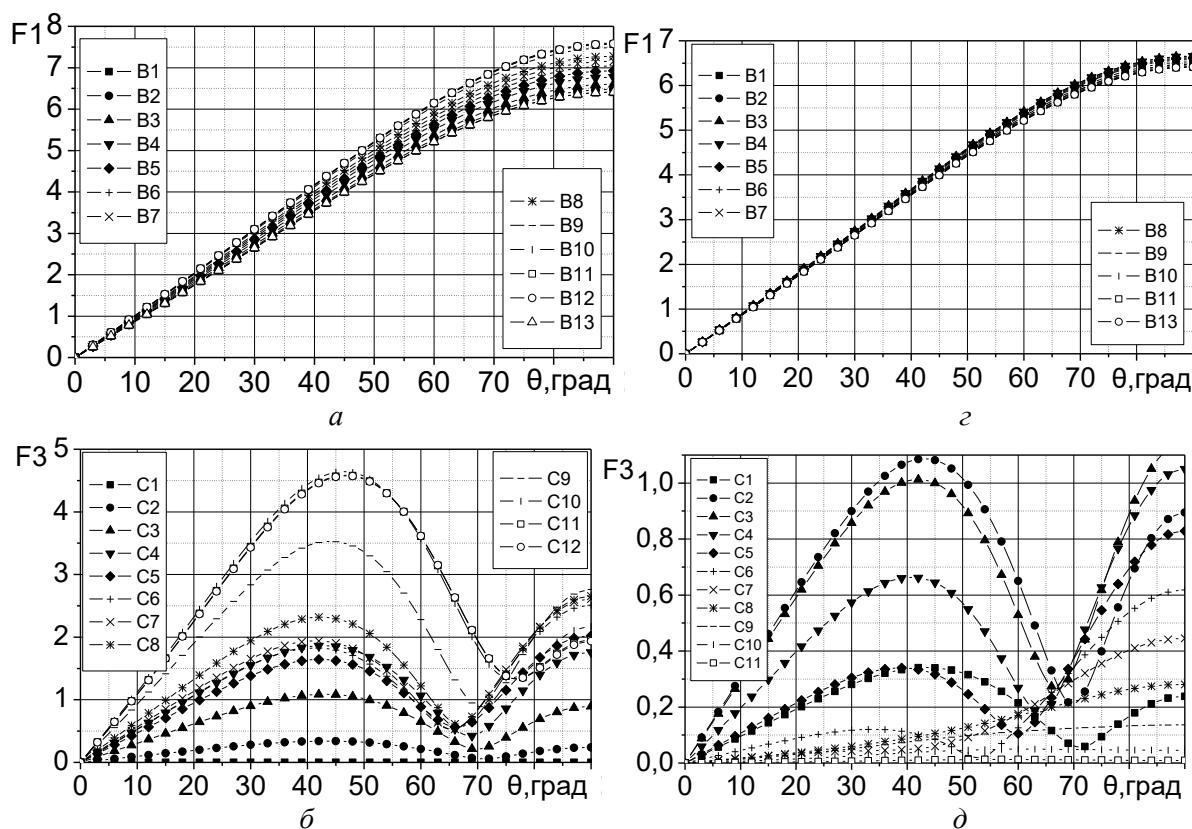


Рис. 14

Как уже отмечалось, найденные распределения токов позволяют построить ДН для излучателей с соответствующими свойствами НПИ. Результаты расчетов для возбуждения четвертьволнового вибратора источником тока приведены на рис. 15, а, б, в (случай «расширения зоны нелинейности») и рис. 15, г, д, е (случай «смещения всплеска нелинейности»).



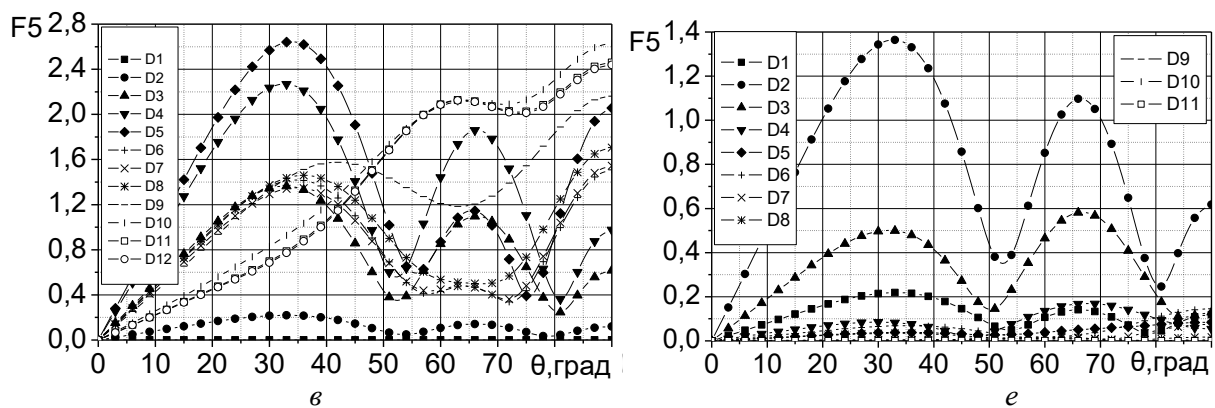
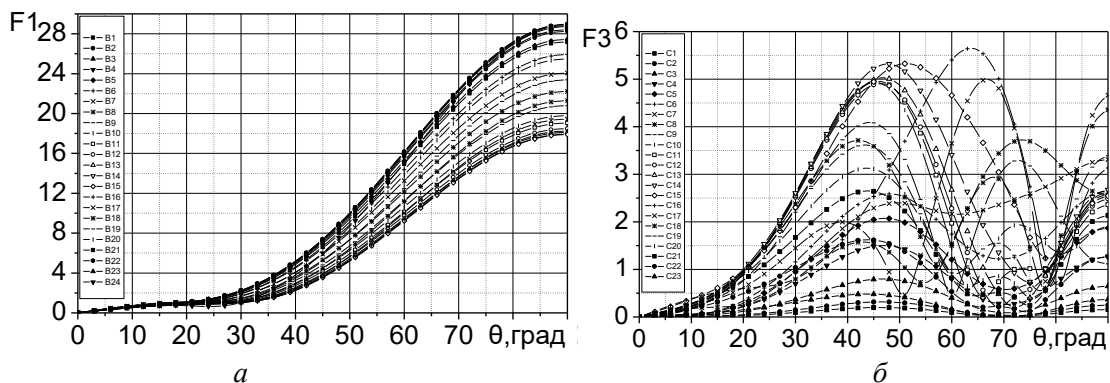


Рис. 15

Как следовало ожидать, при изменении распределения нелинейности вдоль излучателя изменяется не только распределение тока, но и ДН. Эти изменения схожи с выявленными выше изменениями тока. Так, при «расширении нелинейности» форма ДН на второй гармонике практически не изменяется, а изменение нелинейности в основном проявляется в изменении амплитуды диаграммы. Для варианта «смещения всплеска нелинейности» характерно помимо роста амплитуды и существенное изменение формы ДН, когда основное излучение с двух направлений ( $45^\circ$ , как у антенны бегущей волны, и  $90^\circ$  по углу  $\theta$  в сферической системе координат) меняется на одно ( $90^\circ$ ).

Проведя расчеты распределения тока и диаграмм направленности для четвертьволнового вибратора, авторы рассмотрели некоторые особенности поведения этих характеристик и для *несимметричного полуволнового вибратора*. Исходные данные для моделирования были взяты теми же самыми, за исключением соответственно длины излучателя и числа областей (взято 24), в которых изменялись параметры поверхностного импеданса.

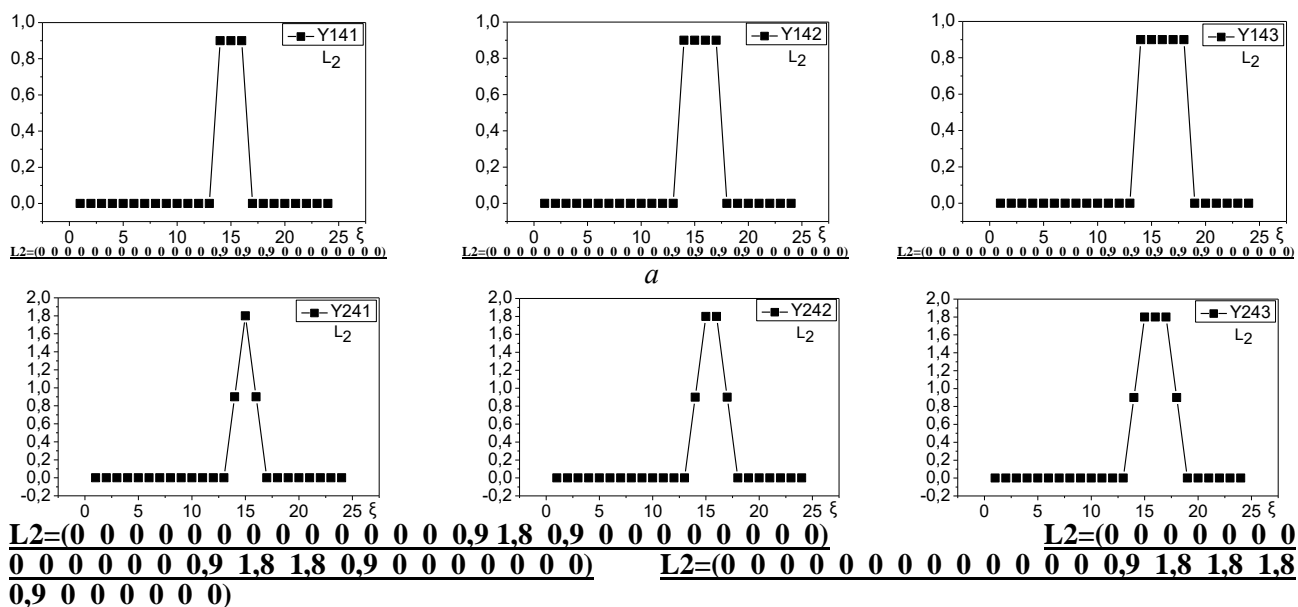
Так, результаты расчетов диаграмм направленности для случая возбуждения вибратора источником тока и «смещения всплеска нелинейности» представлены на рис. 16. Если из множества кривых третьей и пятой гармоник, представленных на этом рисунке, выделить соответствующие варианты зависимостей симметричные относительно «центральной» кривой (C12, D12, то есть расположение НПИ в 12 и 13 областях), то можно заметить, что наибольшее совпадение ДН будет для симметричных вариантов наиболее близко расположенных к центру (например, для 11 и 13; 10 и 14 – см. рис.17). Для «крайних» вариантов распределения нелинейности расхождение третьей и пятой гармоник будет максимальным. Для первой же гармоники все будет точно наоборот.











б

Рис. 19

Результаты расчетов приведены на рис. 20 (номера кривых ДН соответствуют номерам распределения НПИ на рис. 19). Из рисунка видно, что форма диаграммы направленности практически не изменяется при проведенной вариации распределением  $L_2$  вдоль излучателя. Заметно изменение амплитуды диаграмм на всех частотах, а также некоторое смещение положения максимума диаграммы для третьей гармоники (для нашего примера с 51 до 63 градусов). Можно также обратить внимание на практически полное совпадение ДН для различных вариантов распределения нелинейности: С141 и С 241, С142 и С242, С143 и С243.

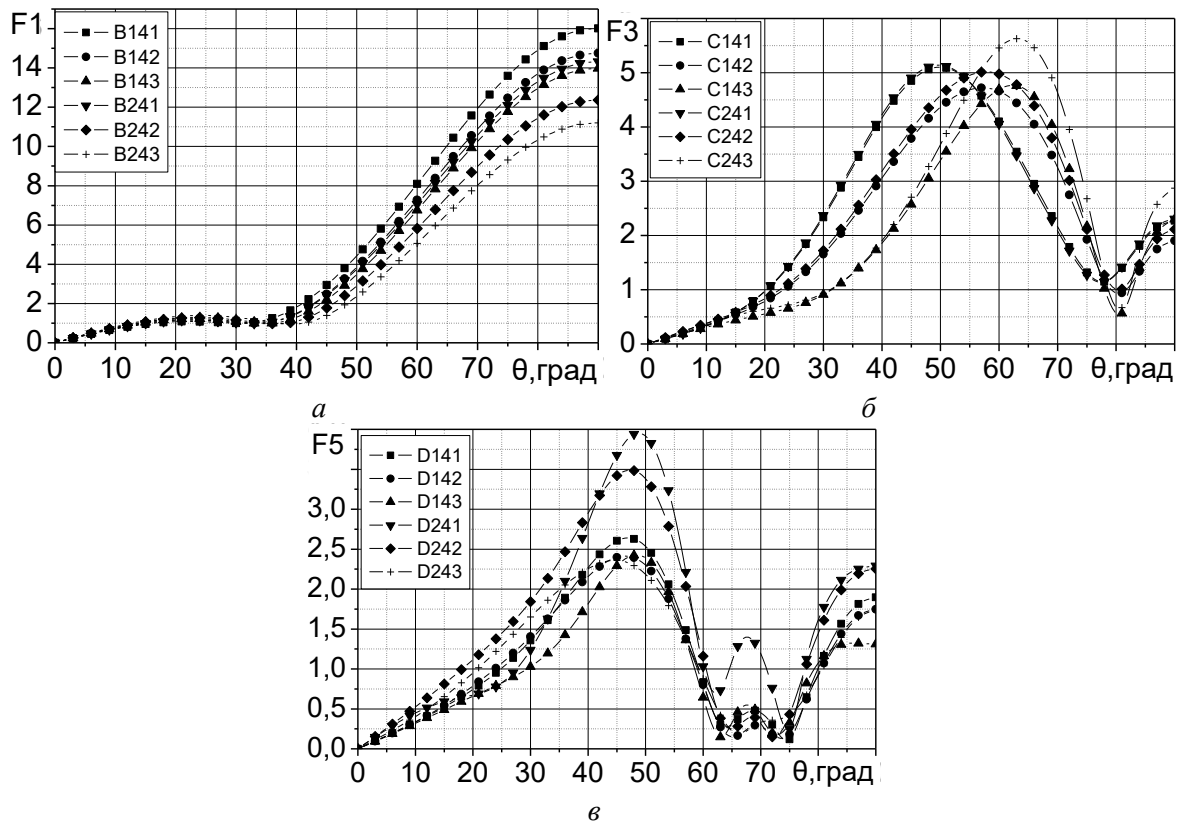


Рис. 20

Дальнейшие расчеты показывают, что увеличение коэффициента нелинейности  $L_2$  в выбранных выше рассечках 14 – 18 (рис. 19, б крайний правый график) приводит к существенному изменению формы ДН не только на основной частоте, но и на частотах высших гармоник (рис. 21). На графиках каждая кривая ДН имеет свой номер. При помощи таблицы можно установить соответствие между нужной кривой ДН и распределением НПИ по поверхности антенны, для которого и была построена ДН.

Распределение  $L_2$  по областям полуволнового вибратора

Номер кривой	Номер областей с НПИ и уровень $L_2$						
	1 – 3	14	15	16	17	18	19 – 24
243	0,0	0,9	1,8	1,8	1,8	0,9	0,0
246	0,0	2,2	4,5	4,5	4,5	2,2	0,0
252	0,0	5	9,9	9,9	9,9	5	0,0
255	0,0	6,2	12,6	12,6	12,6	6,2	0,0
258	0,0	7,7	15,3	15,3	15,3	7,7	0,0
260	0,0	10,7	20,7	20,7	20,7	10,7	0,0
261	0,0	12,3	23,4	23,4	23,4	12,3	0,0
263	0,0	15,5	28,8	28,8	28,8	15,5	0,0

Анализ характеристик (рис. 21) показывает, что варьированием параметра  $L_2$  можно не только изменять абсолютные значения диаграмм, но и изменять направления максимумов ее лепестков, что наглядно видно из рис. 22, где изображены зависимости максимумов ДН от коэффициента  $L_2$  на частотах первой, третьей и пятой гармоник.

Проанализируем, как ведет себя распределение тока вдоль вибратора при различной форме распределения величины нелинейности. В следующем эксперименте использовался полуволновый вибратор, находящийся в свободном пространстве и возбуждаемый в центре источником ЭДС равным 100 В. В вибраторе выделили 19 областей, в которых соответственно и изменялся коэффициент нелинейности  $L_2$  поверхностного импеданса. Коэффициент  $L_0$  был постоянным и равным 0,1 мкГн.

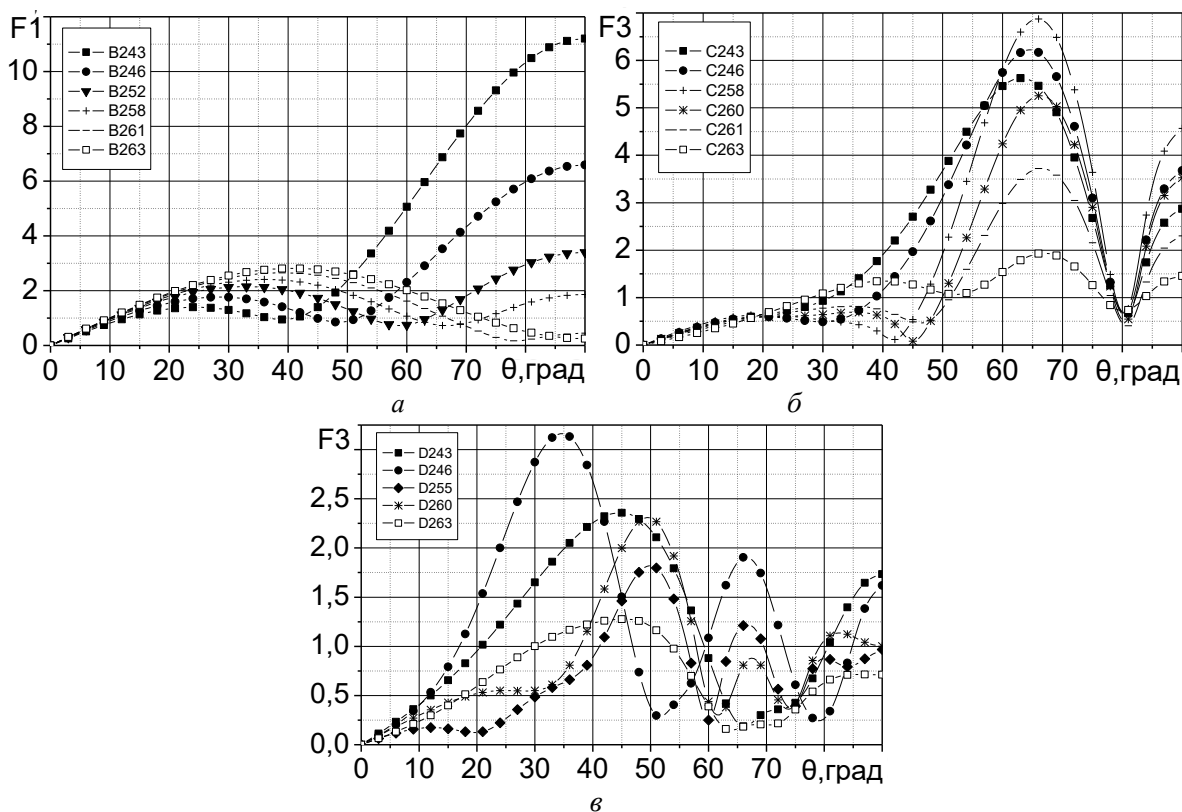


Рис.21

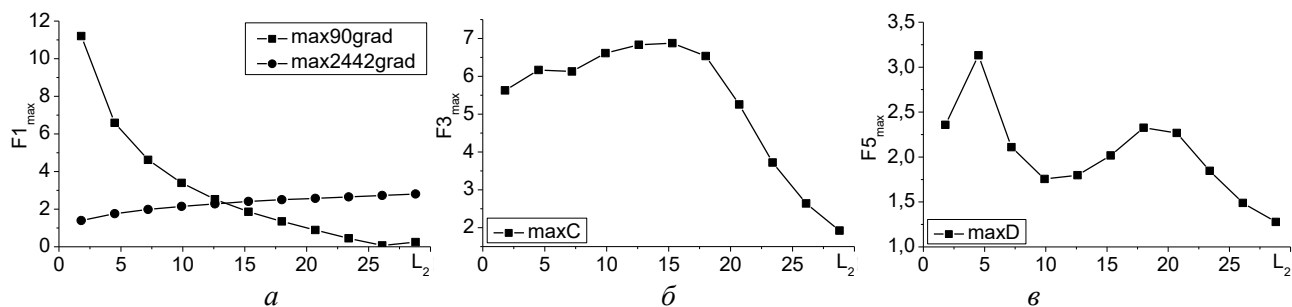


Рис. 22

Для сравнения использовались формы распределения нелинейности (рис. 23):

- 1) линейный рост нелинейности от центра к краям (рис. 23, а);
- 2) линейный спад нелинейности от центра к краям (рис. 23, б);
- 3) линейный спад нелинейности от одного края к другому (рис. 23, в);
- 4) широкий пьедестал (рис. 23, г);
- 5) узкий пьедестал (рис. 23, д).

Можно заметить, что изменения формы распределения нелинейности вдоль вибратора кардинально не сказывается на форме распределения тока (рис. 24). Однако также видно, что в областях вибратора, где НПИ имеет меньший коэффициент нелинейность, можно получить увеличение амплитуды тока. Это однозначно видно на приведенных графиках первой гармоники распределения тока и становится очевидным, если сравнить графики распределения гармоник тока (рис. 25, а, б, в) для двух одинаковых форм распределения нелинейности, но имеющих разный уровень (рис. 25, г). С ростом номера гармоники разница между амплитудами тока в сечениях при варьировании уровнем нелинейности становится значительно меньше. А в некоторых сечениях, например где установлен источник возбуждения, может наблюдаться некая «аномалия» в зависимости тока от уровня нелинейности. Заключается она в том, что малое значение нелинейности уже не обеспечивает максимальную амплитуду тока. Особенно это сильно проявляется на более высокой гармонике (рис. 24, в).

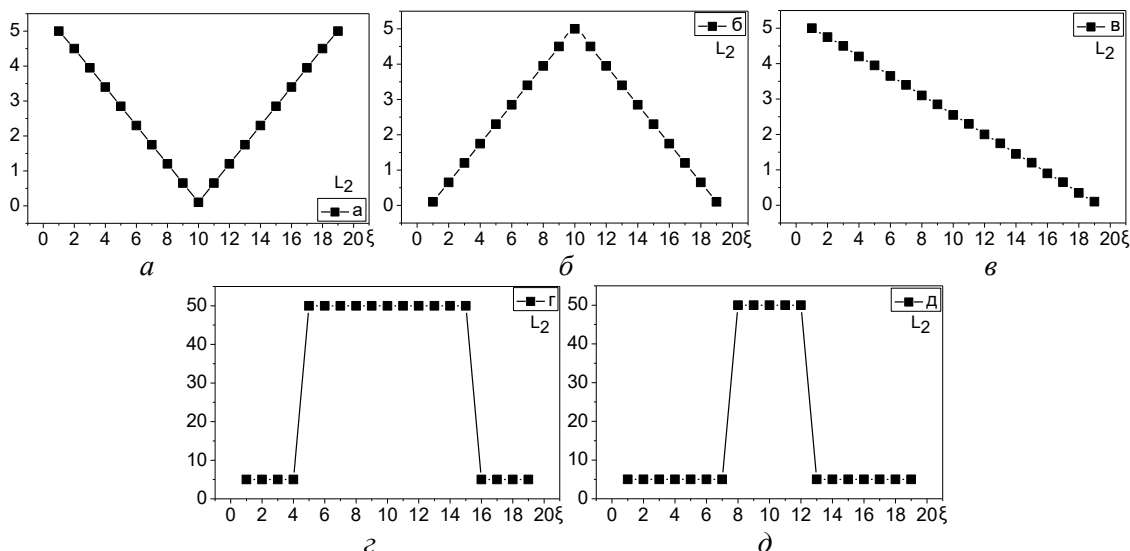


Рис. 23

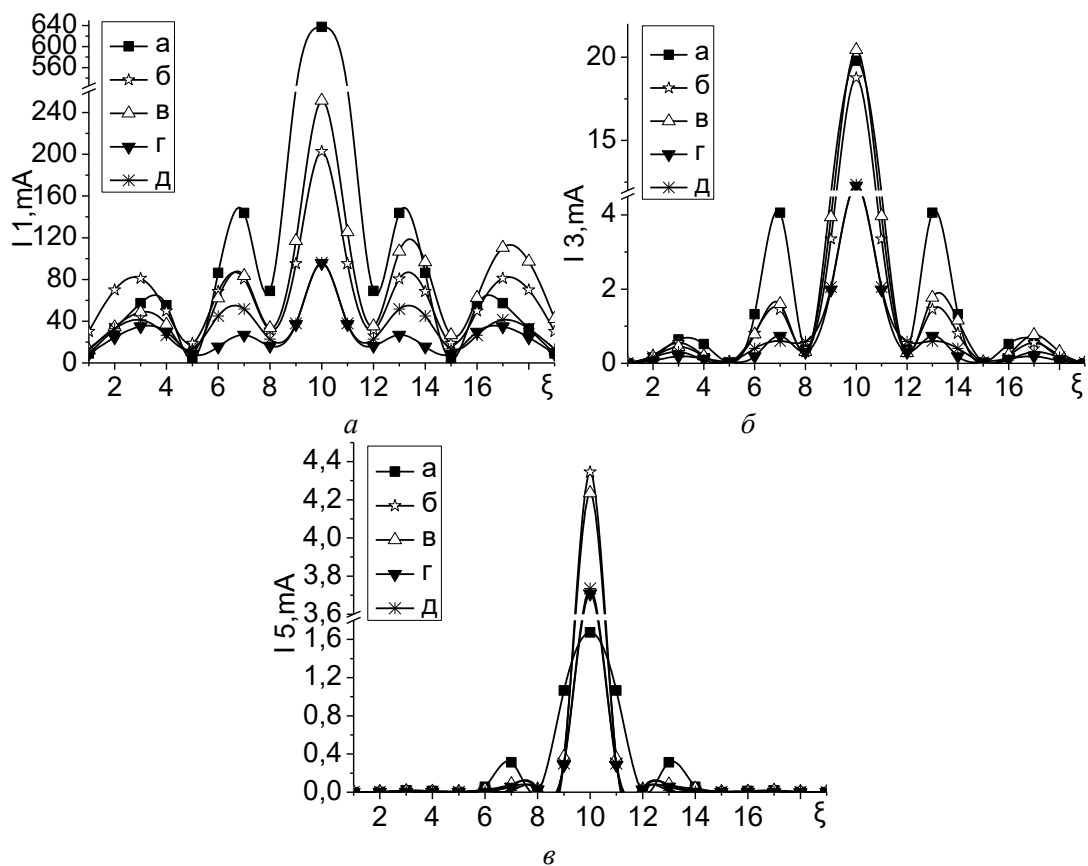
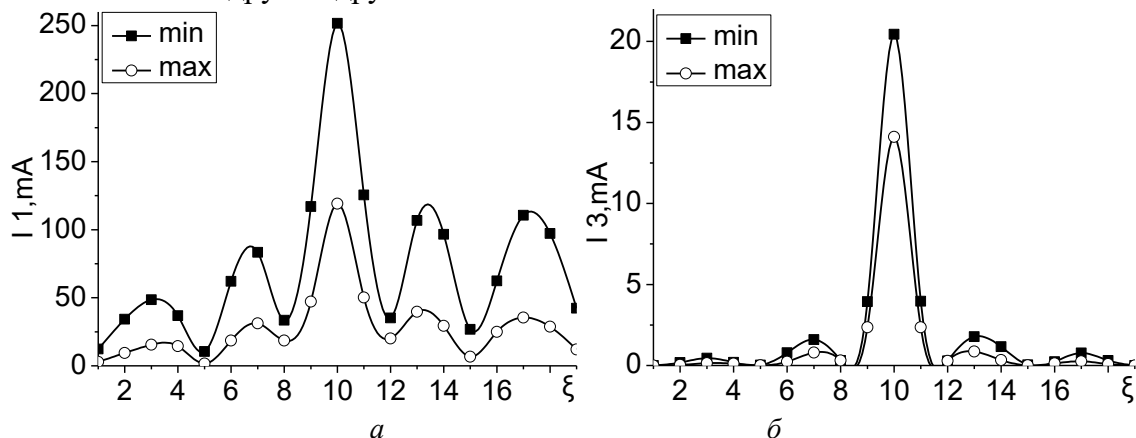


Рис. 24

Помимо этого на высших гармониках наблюдается некий резонанс амплитуды тока в зависимости от уровня нелинейности. Это четко видно на рис. 2б в зависимостях амплитуды третьей и пятой гармоник тока полувольтного вибратора в точке его возбуждения от коэффициента  $L_2$ . Графики строились для случая, когда нелинейность имела одинаковое значение  $L_2=0,9 \text{ мкГн/МА}^2$  во всех областях,  $L_0=0,1 \text{ мкГн}$ , а  $L_2$  в точке возбуждения менялась в широких пределах. Графики также показывают, что поведение зависимости величины тока от уровня нелинейности (крутизна спада, расположение максимума) для различных гармоник отличается друг от друга.



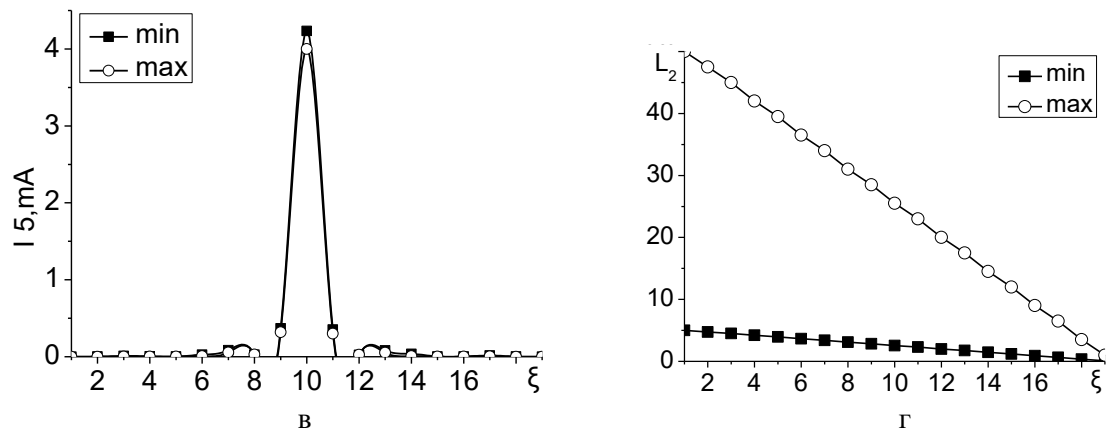


Рис. 25

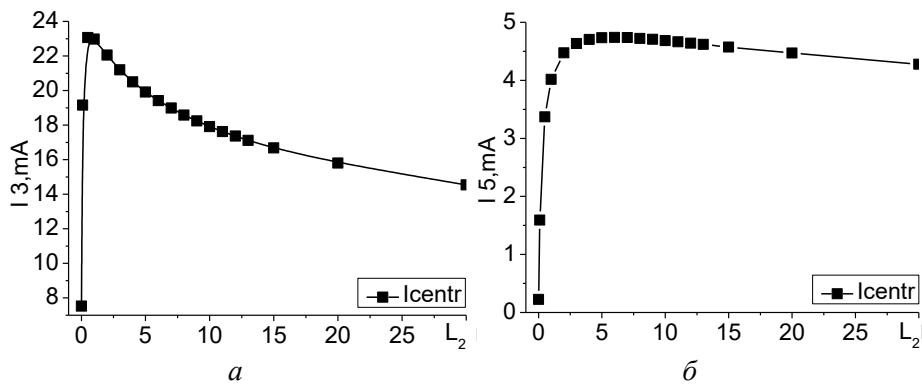
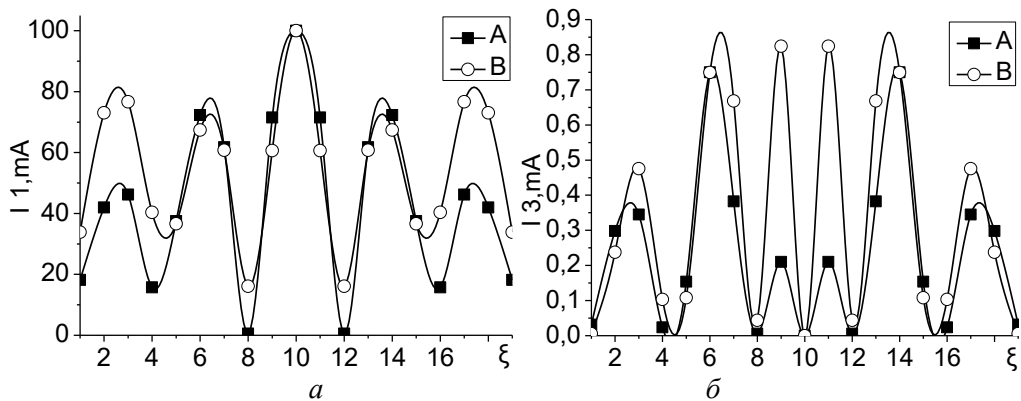


Рис. 26

Замена ЭДС источника возбуждения на источник тока приводит к сохранению в большинстве областей вибратора закономерности – меньшая нелинейность соответствует большей амплитуде тока. Это видно из рис. 27, где кривые обозначенные буквой «А» соответствуют линейному росту нелинейности от центра к краям (рис. 23, а). Буква «В» соответствует линейному уменьшению нелинейности от центра к краям (рис. 23, б).

Однако смена источника возбуждения кардинально изменяет распределение тока в районе точки питания. На основной частоте изменение уровня нелинейности не приводит к изменению амплитуды тока, как это было при возбуждении источником ЭДС, и она остается постоянной. На частотах же высших гармоник ток в точке возбуждения становится практически равным нулю и не соблюдается вышеотмеченная закономерность между уровнями нелинейности и тока.



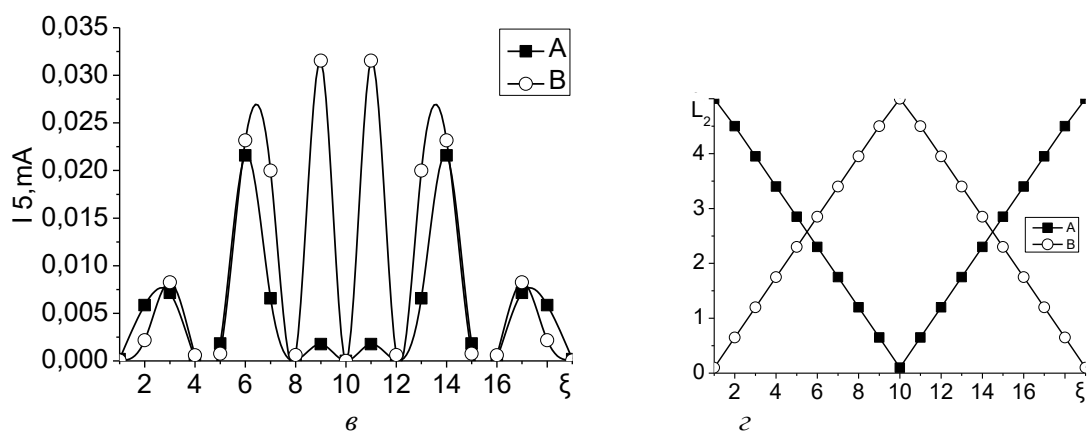


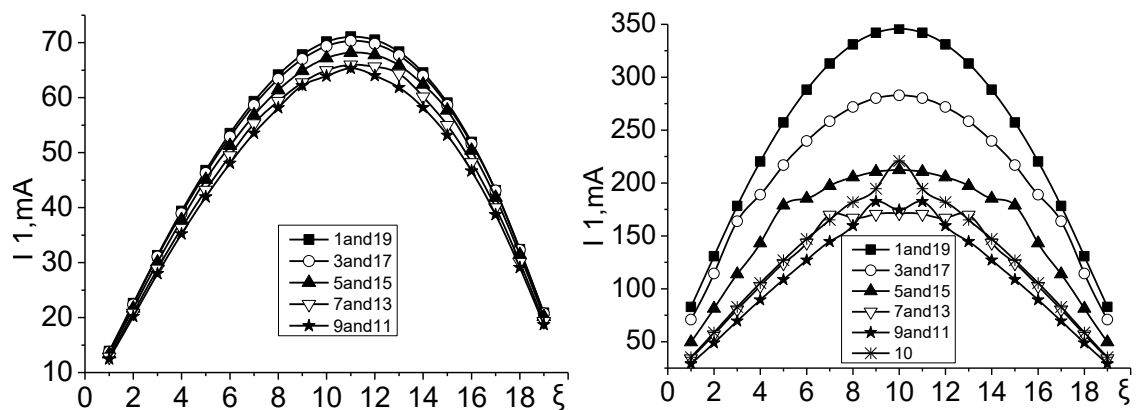
Рис. 27

Наконец, проанализируем влияние нелинейности на характеристики простейшего *рассеивателя*. В качестве последнего возьмем рассмотренный выше полуволновый вибратор, однако возбуждение его будем осуществлять падающей волной с различных направлений. Следует обратить внимание, что модель рассеивателя с НПИ, анализируемая в Microwave Office, изменится. Случай падения волны эквивалентен появлению в каждой рассматриваемой области поверхностного импеданса рассеивателя стороннего источника ЭДС с соответствующими амплитудой и фазой. Значения амплитуды и фазы будут различными в зависимости от угла падения электромагнитной волны на поверхность рассеивателя. Они определялись при помощи программы WIRE.

Сначала реализуем в крайних областях рассеивателя (1 и 19) НПИ индуктивного характера с  $L_0=0$  мкГн,  $L_2=0,9$  мкГн/мА<sup>2</sup> и далее будем смещать их расположение к центру рассеивателя (области 2 – 18, 3 – 17 и т.д.). Изменения формы распределения модулей тока, в зависимости от расположения нелинейности, можно увидеть на рис. 28, а, б, в, где графики соответствуют первой, третьей и пятой гармонике тока при падении волны с направления  $\theta=15^\circ$ . Графики г, д, е – также первая, третья и пятая гармоники тока, но для  $\theta=90^\circ$ .

На представленных графиках можно заметить следующее. Направление прихода волны незначительно влияет на симметричность получаемых распределений тока. Для того чтобы это увидеть, на рис. 29 представлены нормированные распределения гармоник тока для углов падения волны 15, 45 и 90 градусов. Чтобы нелинейность в меньшей степени повлияла на характеристики, графики построены для случая включения нелинейности только в крайние области (1 и 19). Видно, что чем меньше угол падения  $\theta$ , тем больше сдвинута характеристика, больше отличие формы тока от «симметричной», характерной для угла  $\theta=90^\circ$ . Также присутствуют незначительные отличия по амплитуде токов на гармониках.

На рис. 28 можно увидеть, что смещение «узких» областей нелинейности от краев к центру практически не приводит к изменению формы распределения тока, а влияет в основном на амплитуду тока. Причем, чем ближе нелинейности к центру, тем меньше амплитуда основной частоты и выше амплитуда высших гармоник.





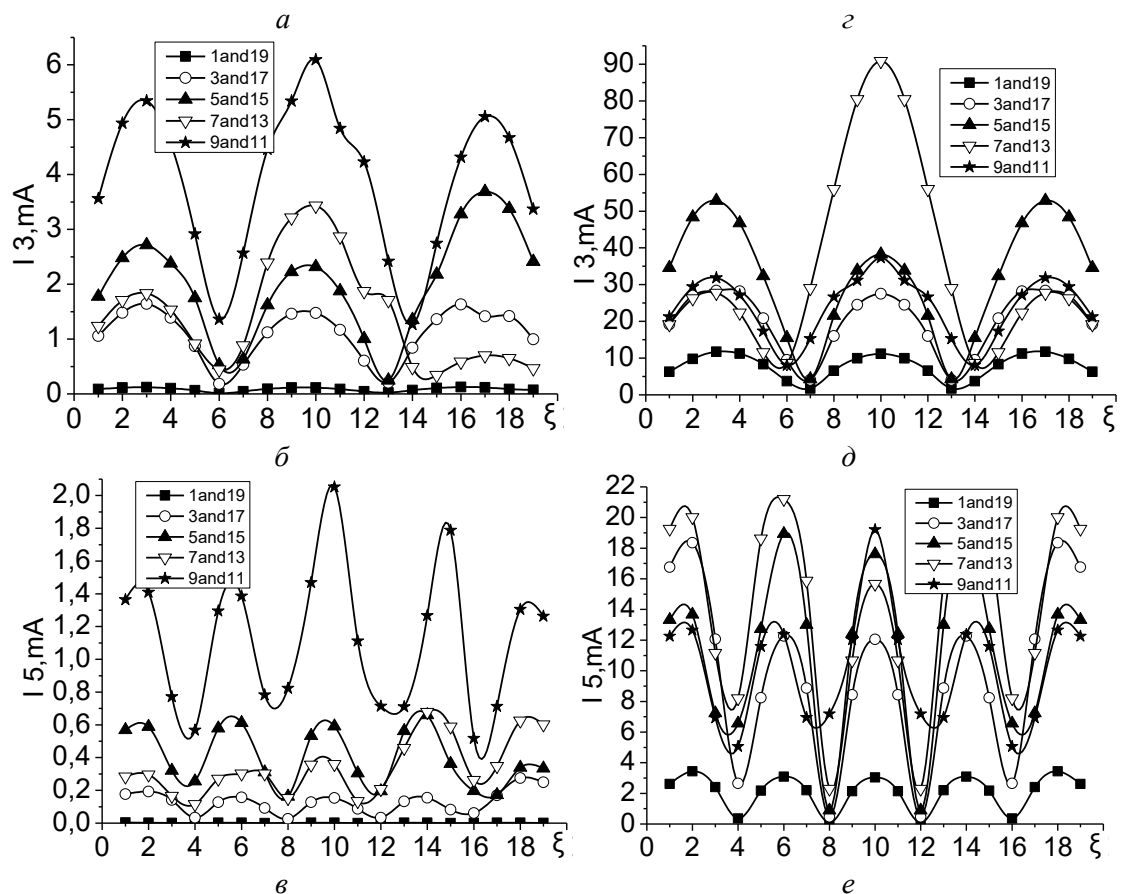
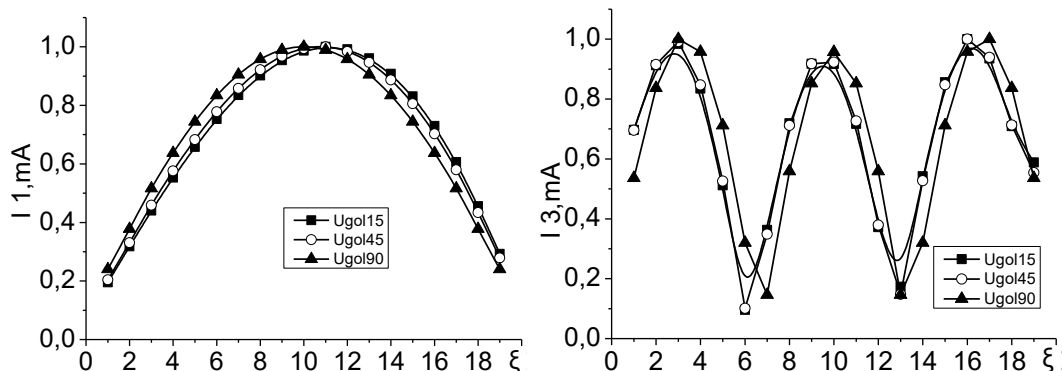


Рис. 28

Последнее достаточно строго справедливо для малых углов падения волны. Однако чем ближе угол падения к нормали, тем утверждение становится противоречивее. Так, для  $\theta=90^\circ$  (графики справа на рис. 28) уже можно указать другие области на поверхности рассеивателя, при которых амплитуды токов будут максимальными. Тем не менее, однозначным остается то, что возможный диапазон изменения амплитуд токов при сдвиге нелинейных элементов для меньшего угла падения волны меньше.

Обратите внимание, что при угле падения волны, близком к нормальному, за счет смещения нелинейности можно изменить форму распределения тока основной частоты с «полусинусоидальной» на близкую к «трапеции» или к «треугольной» рис. 28, г.

При детальном анализе графиков, представленных на рис. 28, можно заметить, что токи в областях с НПИ все же несколько изменяются по сравнению со случаем, когда нелинейности там нет. Например, на рис.28, д для случая  $\theta=90^\circ$  кривая 9and11 не получила амплитуду тока основного лепестка выше, чем кривая 7and13, за счет присутствия нелинейных элементов в сечениях, где формируется этот лепесток. Или, например, на рис. 28, б для случая  $\theta=15^\circ$  видны явные искажения формы для кривых 3and17 и 7and13.



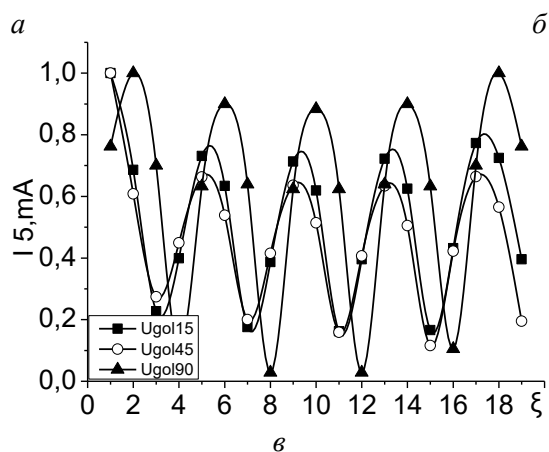


Рис. 29

Для более тщательного анализа этого явления посмотрим, какое влияние на распределение тока окажет закон распределения нелинейности по поверхности рассеивателя. На рис. 30 представлены распределения гармоник тока для нормального падения волны и следующих законов распределения нелинейности вдоль рассеивателя:

– rostL2centrkray (рис. 26, а)  
 $L_2=5;4.5;3.95;3.4;2.85;2.3;1.75;1.2;0.65;0.1;0.65;1.2;1.75;2.3;2.85;3.4;3.95;4.5;5$

– spadL2centrkray (рис. 26, б)  
 $L_2=0.1;0.65;1.2;1.75;2.3;2.85;3.4;3.95;4.5;5;4.5;3.95;3.4;2.85;2.3;1.75;1.2;0.65;0.1$

– spadL2kraykray (рис. 26, в)  
 $L_2=5;4.75;4.5;4.2;3.95;3.65;3.4;3.1;2.85;2.55;2.3;2;1.75;1.45;1.2;0.9;0.65;0.35;0.1$

– pedestal (рис. 26д)  $L_2=0.1;0.1;0.1;0.1; 0.1;0.1;0.1;5;5;5;5; 0.1;0.1;0.1;0.1;0.1;0.1$

Отметим (рис. 30), что в рассеивателе отсутствует выявленная ранее закономерность для полуволнового вибратора возбуждаемого источником ЭДС (рис. 24), где большей нелинейности соответствовали меньшие токи. В рассеивателе большей нелинейности соответствуют большие токи. За счет такой зависимости можно в некоторой степени изменять характеристики антенны, увеличивать или уменьшать амплитуды тока, делать распределение тока несимметричным и т.д. Хотя при этом придется учитывать, что «узкая» область НПИ не влияет на характеристики «точечно», а оказывает воздействие на «широкие» области в распределении тока. Поэтому иногда строго различные по форме распределения нелинейности дают схожие по форме токи (см. кривые spadL2centrkray и pedestal на рис. 28, а).

Амплитуды токов на рис. 28 для разных углов падения различны. Максимальна она для угла падения волны  $\theta=90^\circ$ . Связано это с тем, что разному направлению падения волны соответствуют разные амплитуды наведенной ЭДС на поверхности рассеивателя (рис. 30, з). В связи с этим, изменяя ориентацию рассеивателя в пространстве, можно изменять его характеристики. Причем, для основной частоты изменения будут не просто в пропорциональном изменении абсолютных величин, а и в изменении формы. Так, из рис. 31 видно, как существенно может изменяться распределение гармоник тока в рассеивателе в зависимости от уровня стороннего возбуждения. Предполагалось, что волна падает нормально к поверхности рассеивателя, а НПИ ( $L_0=0$  мкГн,  $L_2=0,9$  мкГн/мА<sup>2</sup>) был в 5 и 15 областях рассеивателя. Уровень наведенной ЭДС изменялся от 2 до 21 В.

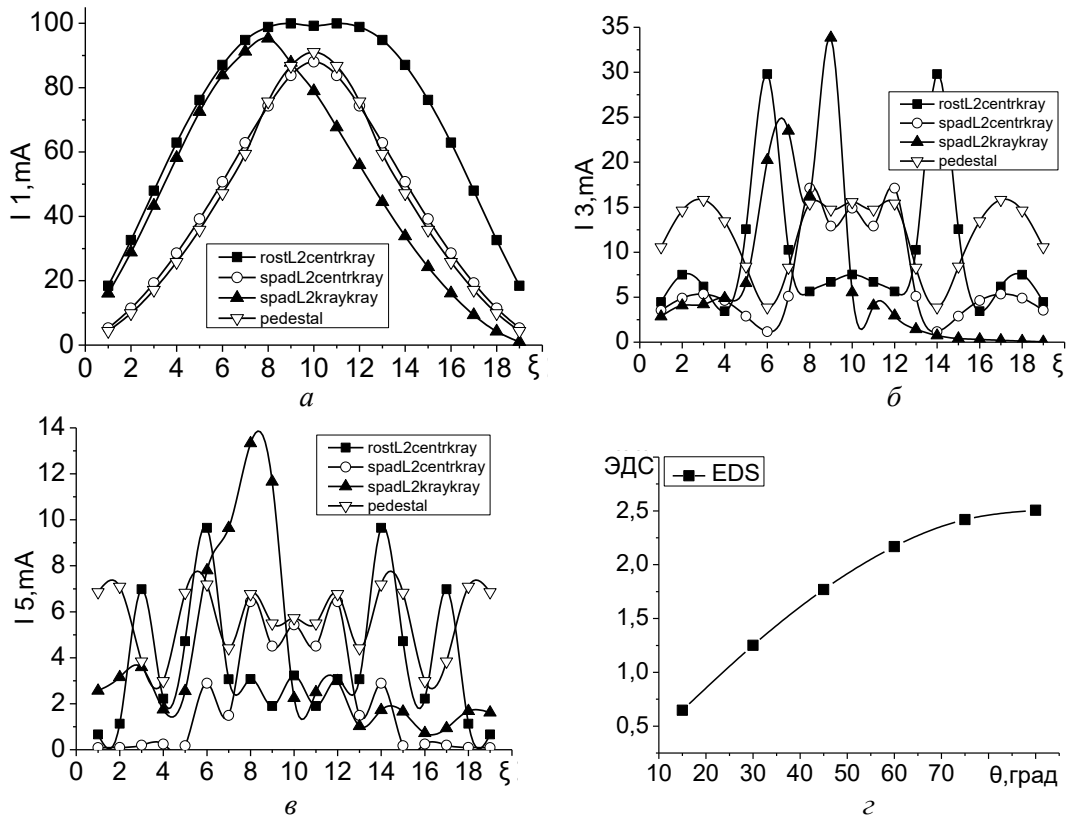


Рис. 30

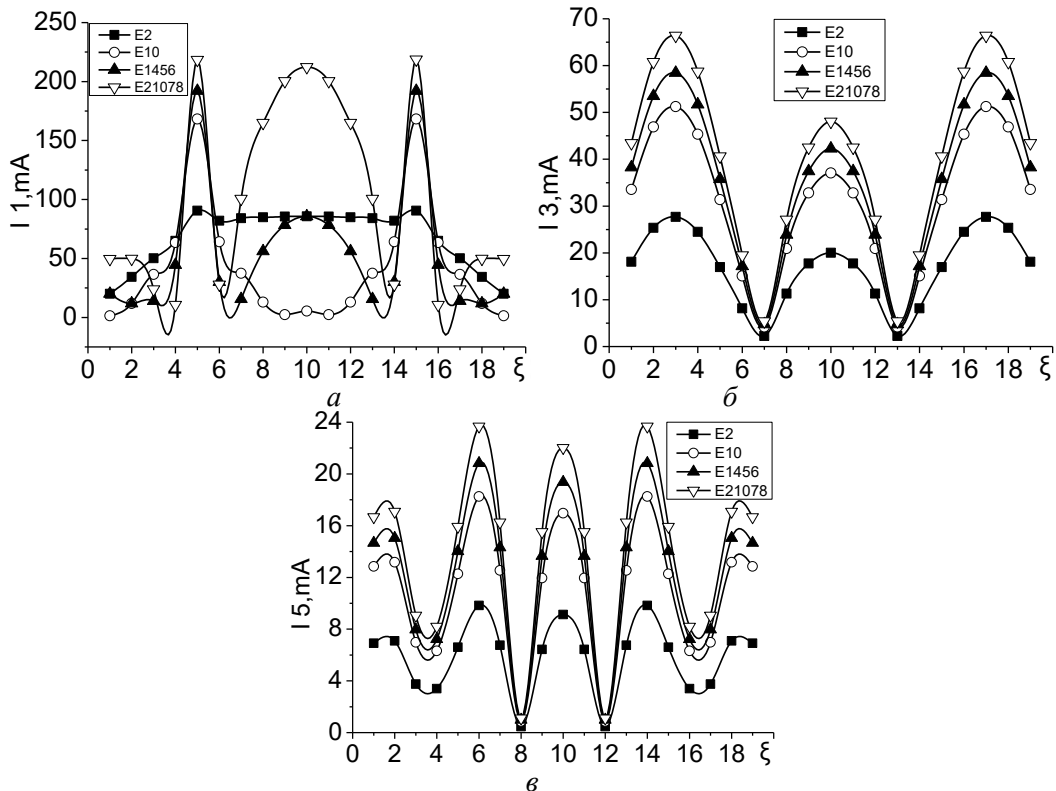


Рис. 31

Для частот высших гармоник изменение в распределении тока в зависимости от изменения уровня возбуждения можно с некоторой степенью точности прогнозировать, так как форма распределения практически не изменяется, а закон роста амплитуды имеет плавный и нарастающий характер (рис. 32, б, в). Спрогнозировать поведение распределения тока для основной частоты сложнее, так как уже было отмечено, что помимо изменения

амплитуды по более сложному закону (рис. 32, а), меняется и форма распределения тока (рис. 28, з, рис. 31, а).

Еще один параметр, который влияет на характеристики электродинамической структуры, – это уровень нелинейности поверхностного импеданса. Влияние этого фактора можно определить по рис. 33, где представлены распределения гармоник тока для рассеивателя с различным НПИ в 5 и 15 областях вибратора. Падение волны по нормали к рассеивателю, модуль амплитуды наведенной ЭДС равен 2.5052 В. Как видим (рис. 33), увеличение нелинейности эквивалентно увеличению уровня возбуждения, т.е. с ростом коэффициента  $L_2$  уменьшается амплитуда тока с сохранением формы распределения тока на высших гармониках и возможностью изменения формы на основной частоте. При сравнении рис. 31 и 33 видно, что можно подобрать такие значения нелинейности и уровня возбуждения, когда будут совпадать распределения тока для двух случаев – малой нелинейности и большого уровня возбуждения, а также большой нелинейности и малого уровня стороннего воздействия.

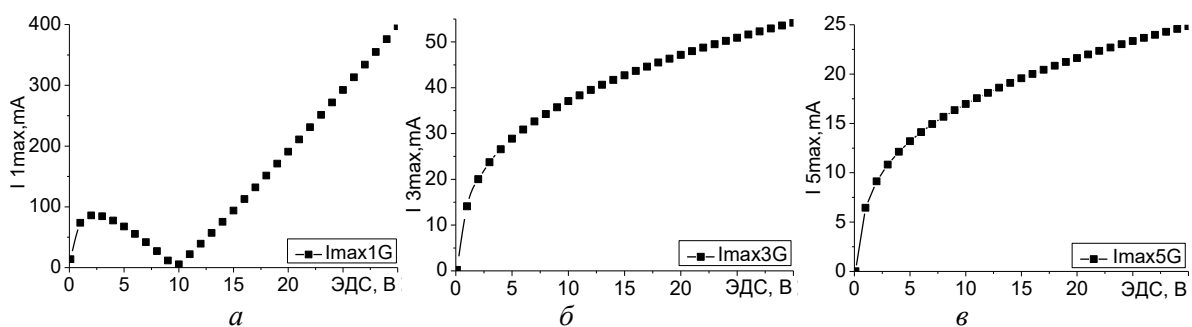


Рис. 32

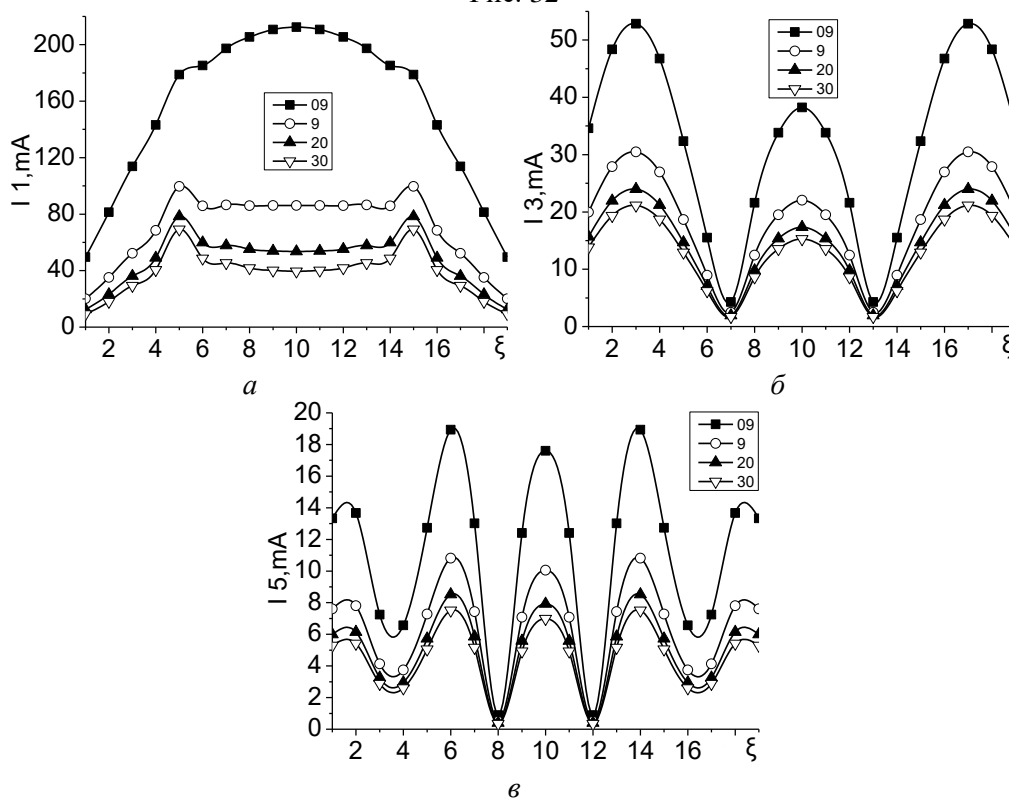


Рис. 33

## Выводы

Показано, что нелинейность поверхностного импеданса антенны или включение в антенну квазираспределенных нелинейных элементов может значительно повлиять на ее

характеристики. Варьируя абсолютными значениями и формой распределения нелинейности импеданса, можно изменять форму распределения тока на поверхности антенны, а соответственно и форму диаграммы направленности. Это касается как основной рабочей частоты антенны, так и ее высших гармоник. Немаловажным также оказывается и тип источника возбуждения антенны, от которого в значительной степени зависят ее характеристики на частотах гармоник.

**Список литературы:** 1. *Лучанинов А.И.* Пакет программ "WIRE" для моделирования тонкопроволочных антенн произвольной конфигурации с линейным и нелинейным свойствами поверхностного импеданса / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, М.А. Омаров // Прикладная радиоэлектроника. – 2002. – Т. 1, № 2. – С. 225 – 230. 2. *Luchaninov A.I.* Non-Linear Effects in Wire Antennas with Non-Linear Surface Impedance / A.I. Luchaninov, D.S. Gavva // Telecommunications and Radio Engineering. – 2006. – Vol. 65, No. 14. – Pp. 1257 – 1265. 3. *Гавва Д.С.* Характеристики проволочных электродинамических структур, возбуждаемых источниками различных типов / Д.С. Гавва, А.И. Лучанинов, М.А. Омаров // Радиотехника. – 2003. – Вып. 134. – С. 256 – 260. 4. *Лучанинов А.И.* Выбор базисных и весовых функций в задаче анализа антенн с нелинейным поверхностным импедансом методом моментов / А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва, М.А. Омаров // Радиотехника. – 2002. – Вып. 124. – С. 213 – 218. 5. *Гавва Д.С.* Идентификация параметров распределенных нелинейных элементов в задачах анализа проволочных излучающих структур / Д.С. Гавва // Радиотехника. – 2003. – Вып. 133. – С. 118 – 124.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 23.03.2014*