

УДК 621.396.677

М.И. Редин

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: max.redin@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ПО МИНИМУМУ ОТРАЖЁННОЙ ВОЛНЫ ТОКА

Исследован метод подавления отражённой волны тока в спиральных антеннах, что необходимо для повышения качества радиосвязи. В результате предложен модифицированный спиральный облучатель.

Развитие различных направлений в современной технике связи вызвало практическую потребность в антеннах, обеспечивающих излучение и приём эллиптически поляризованного поля в широком диапазоне частот. С этой точки зрения хорошо зарекомендовали себя спиральные антенны. При исследовании спиральных антенн всегда уделялось особое внимание поиску связи между формой и диапазоном спиральных антенн.

Спиральным антеннам до сих пор уделяется большое внимание. Однако в рассмотренных публикациях такие антенны работают в отдельных случаях малоэффективно. Такие характеристики поля их излучения, как уровень заднего излучения (УЗИ), коэффициент эллиптичности (КЭ), нестабильный во всей полосе частот Δf_1 , которую может обеспечить геометрия спирали. Другими словами, потенциально возможный диапазон рабочих частот, границы которого обеспечиваются геометрическими параметрами конической спиральной антенны (КСА), не достигается и не используется.

Подтверждение вышесказанному можно найти в выводах целой серии экспериментальных работ, посвящённых исследованию спиральных антенн. Опираясь на результаты проведённых экспериментальных исследований входных характеристик КСА [1, 2], можно говорить, что входные характеристики и характеристики излучения в полосе исследуемых частот имеют ярко выраженный неравномерный характер.

Поэтому актуальна задача повышения отдельных характеристик поля излучения (КЭ), их выравнивание в первоначальной полосе рабочих частот Δf_1 , получение их равномерности во всём диапазоне Δf_1 , и минимизации других – УЗИ, коэффициента стоячих волн (КСВ). При этом, расширение исходной полосы частот Δf_1 до Δf_2 , где указанные характеристики достигают своих наилучших значений, по сравнению с первоначальными в диапазоне Δf_1 . Таким образом необходимо получение $\Delta f_2 > \Delta f_1$ при сохранении предыдущих значений характеристик поля излучения и/или их улучшения.

Проблема связана с возможностями, допущениями и ограничениями того метода расчёта, который взят за основу при традиционном проектировании спиральных антенн различных типов. Так, используемые методы расчёта в [3] не учитывают некоторые важные особенности внутренних потенциальных свойств таких антенн.

Приближенная теория спиральных антенн приводится в работе [3]. Авторы рассматривают спиральные антенны как антенны поверхностных волн. Для расчета спиральных антенн авторы, исходя из анализа составленных дисперсионных уравнений, осуществили выбор типа собственной волны, определяющий заданный режим излучения, произвели определение геометрических параметров, обуславливающих существование нужного типа волны, а также установили, что в однозаходной бесконечной цилиндрической спиральной антенне в режиме осевого излучения преобладает собственная поверхностная волна поля T_1 . Также было установлено, что волна T_1 может существовать в однозаходной бесконечной цилиндрической спирали, если периметр витка составляет $0,7...1,35$ длины волны, т.е. значение ka составляет $0,7...1,35$ и сильно зависит от ka . Вместе с тем, в связи со сложностью аналитического решения задачи, авторы были вынуждены сделать ряд допущений. В частности, рассматривалась полубесконечная цилиндрическая спираль, и предполагалось, что в спирали отсутствует отражение волн тока от свободного конца проводника.

Аналогично и во многих других работах расчёты характеристик поля излучения спиральных антенн традиционно проводились в модельном представлении бегущей волны тока по проводнику спирали. При моделировании задавалось распределение тока бегущей волной с постоянной амплитудой и линейным набегом фазы по проводнику спирали, не учитывалось отражение волны тока от конца спирали.

Этот подход к определению функции тока вдоль проводника $I(l)$ является весьма приближенным и применяется для одиночных спиральных антенн. Однако в своё время позволял с заданной на тот период точностью и скоростью расчётов решать поставленные задачи расчёта поля спиральных антенн. Но даже в этом случае он не только не учитывает многие конструктивные особенности спирального излучателя, но и не позволяет определить его входное сопротивление.

При использовании многозаходных спиральных излучателей, с одной стороны, в составе диаграммообразующей схемы (ДОС), с другой стороны, необходимо учитывать взаимное влияние соседних облучателей, заходов и их конструктивные особенности. Кроме того, соотношения для расчета поля излучения, получающиеся при использовании модельного распределения тока на проводнике спирального излучателя, весьма сложны и громоздки даже в простейшем случае двух однозаходных излучателей. Их анализ возможен только численными методами с привлечением ЭВМ и по трудоемкости (затратам машинного времени) не уступает расчету распределения тока любым существующим численным методом. Например, методом моментов, который является наиболее привлекательным для расчета распределения тока на проводнике спирального излучателя. Уровень развития современной вычислительной техники и реально достижимые скорости расчетов современных ЭВМ при постоянно повышающейся необходимости в точных расчетах требует высокого совпадения результатов экспериментальных измерений и расчетных данных. Следовательно, применение более точных методов расчетов тока, а значит и поля целесообразно.

Целью статьи является используя метод наводимых ЭДС, провести оптимизацию геометрических параметров конической спиральной антенны по критерию получения требуемых параметров поля излучения.

В данной работе распределение тока рассчитывалось обобщенным методом наводимых ЭДС, изложенным в [4], который ориентирован на численные методы решения. Это позволило исключить ряд допущений, сделанных в работе [3]. В результате было установлено, что в спирали, действительно устанавливается распределение тока, близкое к бегущей волне. Однако из-за существенного отражения волны тока от конца проводника, распределение тока на конечном участке спирали имеет вид, показанный на рисунке 1.

Существование отраженной волны, игнорируемой в предыдущих исследованиях, было замечено и исследовано авторами работы [1], и подтверждено проведенными экспериментами в их работе.

В экспериментальных работах [1, 2] обращено внимание на то, что в конической спирали устанавливается распределение тока, близкое к бегущей волне, хотя и в равношаговой конической спирали конечной длины имеется значительная по амплитуде волна тока, отраженная от конца спирали. Ее интерференция с падающей волной приводит к тому, что на последних двух – трех витках спирали токовое распределение приобретает характер стоячей волны.

Наличие переотраженной волны тока от конца спирали должно негативно сказываться и приводить к некоторым колебаниям входного сопротивления, которые будут наблюдаться как при изменении количества витков, угла конусности, так и при изменении частоты. Наиболее сильно этот эффект должен проявляться для коротких спиралей (с небольшим количеством витков), поскольку с увеличением количества витков амплитуда отраженной волны в точке питания будет быстро убывать ввиду её излучения.

На рисунке 1 жирными линиями показано амплитудное и фазовое распределение. По горизонтали сверху отложен номер текущего витка N , снизу – осевой размер, отнесенный к длине волны z/λ . Моделирование проведено для двухзаходной усеченной эквишаговой конической спирали с углом конусности при вершине 16° , количеством витков $N=5$, начальным радиусом 9,5 мм, постоянным шагом спирали 15 мм на частоте 4 ГГц. Сплошной тонкой, пунктирной и штрихпунктирной линиями показаны касательные к кривой фазового распределения, характеризующие различное замедление на разных участках спирали. В правом верхнем углу изображено искомое амплитудное и фазовое распределение на конце спирали, определяющее поляризационные свойства и входные характеристики. Целью оптимизации является достижение в распределении тока линейности в фазовой характеристике и огибающей амплитуды, плавно спадающей до нуля, без осцилляций.

При проведении анализа распределения тока (см. рисунок 1) обращает на себя внимание тот факт, что на начальном участке спирали длиной около 1...1,5 витков нормированная амплитуда тока резко спадает при удалении от точки питания («зона_1»). Фазовое распределение на этом участке линейное и угол наклона отличен от угла наклона для остальной части спирали. Помимо этого, фазовый набег волны на первых 1,5 витках совпадает с набегом её фаз в свободном пространстве. Различие в углах наклона касательной к кривой фазового распределения на первых 1,5 витках спирали и всеми последующими говорит об отсутствии замедления волны тока на начальном участке, характерном для остальной части спирали, т.е. коэффициент замедления $\xi=c/v_\phi$ равен 1. Данный факт позволил разделить всю спираль на две зоны, необходимых для дальнейшего анализа, значительно отличающиеся распределением амплитуд и фаз тока в её проводнике. Выделим первую часть спирали как зону 1.

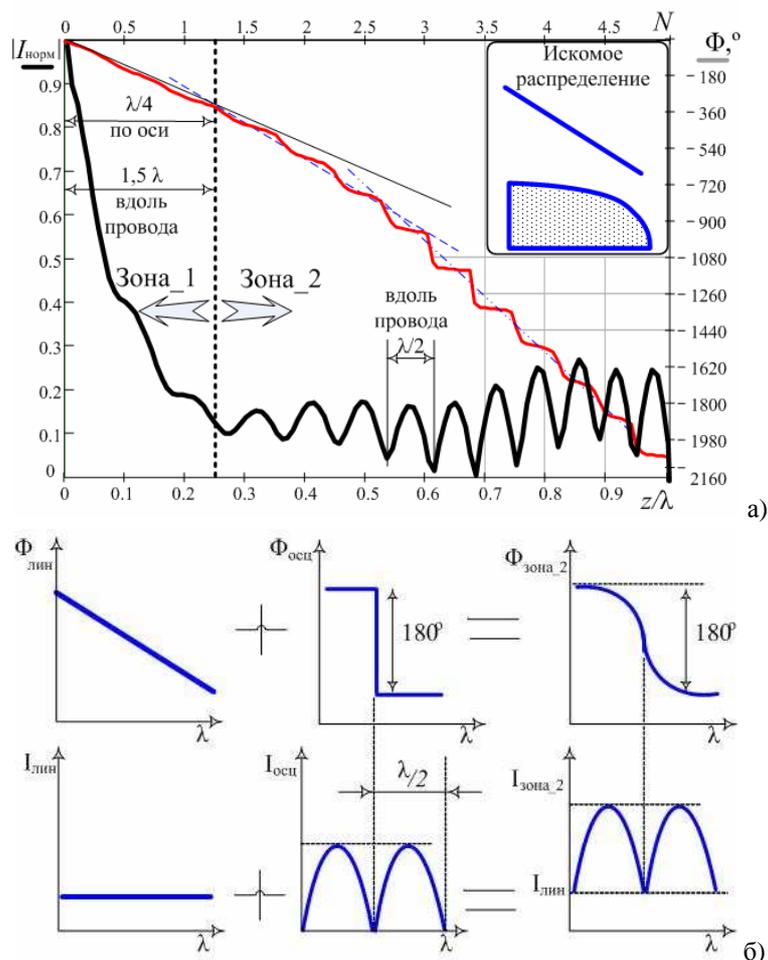


Рисунок 1 – Распределение амплитуды и фазы тока по проводнику спирали: а) для усечённой КСА на $f_{\text{ц}}=4$ ГГц; б) к объяснению структуры тока в зоне 2

Проведенное расчётное моделирование позволило установить, что зона 1 существует для всех исследуемых конических и цилиндрических спиралей. Важно отметить также то, что длина этого участка (зоны 1) остается примерно постоянной как при изменении геометрических параметров (числа витков) спирали, так и при изменении частоты. Тот факт, что размер зоны 1 вдоль геометрической оси спирали составляет $\lambda_0/4$ (λ_0 – длина волны на центральной частоте), а по длине проводника $1,5\lambda_0$ позволяет предположить о некоей трансформации на участке $\lambda_0/4$ по оси спирали. А так как по длине спирали эта зона занимает $1,5\lambda_0$ и не имеет периодического характера, то речь идёт не о трансформации сопротивления, как это имеет место в линии передач. Поэтому можно утверждать, что в зоне 1 происходит трансформация электромагнитной волны типа ТЕМ, распространяющейся в коаксиальном кабеле, в поверхностную волну, распространяющуюся вдоль проводника спиральной структуры.

Поэтому и характер распределения тока на данном участке связан не с наложением падающей и отраженной волн, как это имеет место на конце спирали, а с процессом возбуждения собственной поверхностной волны в спиральной структуре.

Различие в наклоне касательных, показанной сплошной линией (рисунок 1), пунктирной, штрихпунктирной линиями к кривой фазового распределения объясняется ростом замедления в структуре, непосредственно связанным с постепенным увеличением диаметра текущего витка при распространении по нему волны тока. Необходимо учесть следующую особенность: если откладывать по оси абсцисс, номер текущего витка N , линейный осевой размер антенны z или отнесённый к длине волны z/λ , то кривая фазового распределения приобретает дугообразную форму, характеризующую увеличение замедления волны при её распространении от малых витков к большим (см. рисунок 1). Если же откладывать по горизонтали линейный размер выпрямленного проводника l или l/λ , то фазовый набег примет линейный характер, как и показано на рисунках 2 – 4.

Совершенно другую структуру имеет зона 2 (см. рисунок 1), занимающая все оставшиеся витки до свободного конца спирали. Как видно из рисунка 1, а, б, распределение тока в этой зоне определяется суммой двух составляющих: монотонной и осциллирующей. Первая составляющая имеет примерно постоянную амплитуду $I_{\text{лин}}$ вдоль всей зоны 2, распределение фазы в ней линейное $\Phi_{\text{лин}}$, с

коэффициентом замедления $\xi > 1$, который зависит от геометрических параметров. Вторая составляющая, периодическая, имеет осциллирующий характер, с амплитудой $I_{\text{осц}}$ и фазой $\Phi_{\text{осц}}$, меняющейся скачком на 180° в минимуме $I_{\text{осц}}$ на границе соседних всплесков. При распространении от конца спирали к её началу амплитуда осциллирующей составляющей постепенно затухает. И при переходе через центральный виток, длина которого совпадает с длиной волны λ_0 , для которой ведётся расчёт, её амплитуда «проседает», т.к. здесь имеет место пространственный резонанс и её излучение. Дальнейшее распространение осциллирующей составляющей волны тока $I_{\text{осц}}$ в сторону зоны 1, к началу спирали, объясняется взаимовлиянием витков.

Как видно из приведённых рисунков, бегущая волна на конечном участке проводника трансформируется в стоячую, что приводит к ухудшению поляризационной чистоты поля излучения и входных характеристик. При изменении электрической длины спирали (зависящей от количества витков, угла намотки, угла конусности или частоты) наложение двух волн, падающей и отраженной от конца спирали, будет приводить к периодическим изменениям коэффициента эллиптичности и входного сопротивления.

Поэтому в конической спирали конечной длины путём оптимизации её геометрических параметров можно сделать следующее:

- повысить коэффициент эллиптичности (КЭ) без увеличения количества заходов, путем оптимизации геометрических параметров спирали по величине отражения от конца спирали;
- получить сниженный и равномерный КСВ в рабочей полосе частот Δf_1 , а в отдельных случаях в полосе Δf_2 .

Поскольку амплитуда отраженной волны зависит не только от коэффициента отражения, но и от амплитуды падающей волны, то для подавления отраженной волны нужно уменьшить амплитуду падающей волны на конечном участке проводника. Поэтому необходимо подавить как падающую волну, так и отражённую на конце спирали.

Предложен метод подавления отраженной волны тока путём использования конических антенн с включением активного сопротивления $R_{\text{акт}}$ в разрыв спирали на расстоянии $\lambda_0/4$ от её конца. В работе [2] приведены результаты экспериментальных исследований входных характеристик нагруженной конической спиральной антенны. Основные выводы экспериментальной работы [2] хорошо согласуются и с результатами при численном моделировании.

Для сравнения было проведено и исследование влияния $R_{\text{акт}}$ для семейства цилиндрической спирали с количеством витков 5...10, углом намотки β 7° ... 13° , периметром габаритной окружности 70...75 мм, что соответствует длине волны на частоте 4 ГГц. Особенностью цилиндрической спирали является её относительная узкополосность по сравнению с конической, ввиду равенства всех витков. Поэтому установка $R_{\text{акт}}$ на расстоянии $\lambda/4$ от конца спирали оказалась достаточной, чтобы подавлять отражённую волну тока во всём рабочем диапазоне.

Общим моментом для исследуемых конических и цилиндрических спиралей явилось степень подавления отражённой волны при изменении величины (номинала) нагрузочного сопротивления $R_{\text{акт}}$ и его места расположения на проводнике. В результате можно заключить следующие выводы: максимальное подавление отражённой волны тока наблюдалось при включении нагрузочного сопротивления $R_{\text{акт}}$ в разрыв спирали на расстоянии $\lambda_0/4$ от её конца. При этом номинал сопротивления выбирается из 50...150 Ом. При превышении рекомендованного номинала при моделировании на ЭВМ отмечалось увеличение отражения от самого сопротивления.

Установка сопротивления не приводит к значительным потерям в уровне излучаемых/принимаемых сигналов, так как оно находится в самом конце проводника на расстоянии 2...3 % его длины от свободного конца.

Для уменьшения величины замедления исследуемая двухзаходная спиральная антенна, выполненная на усечённом базовом конусе ($N=5$, $\Theta=16^\circ$) со стороны широкого основания, была дополнена цилиндрической спиралью. Причём, диаметр витка на цилиндре равен диаметру последнего витка конуса (большого основания). Намотка цилиндрической части – согласная, с тем же углом подъёма, что и на последнем участке конической части. Это не приведёт к заметным отражениям волны тока от неоднородности на стыке двух спиральных структур. В дальнейшем полученную спираль будем называть коническоцилиндрической (КЦ). Дополнение конической части цилиндрической позволяет снизить замедление волны на последнем участке, непосредственно перед свободным концом, а значит, и отражения тока от него.

Распределение нормированной амплитуды и фазы для этого случая показан на рисунке 2 тонкими чёрными линиями. При сравнении амплитудного распределения на рисунках 1, а и 2 заметно только небольшое уменьшение амплитуды осцилляций на коническом участке спирали, однако недостаточное для эффективной работы такой антенны. Это несильно сказалось и на фазовом распределении в проводнике. Поэтому необходимы дальнейшие действия, нацеленные на изменение структуры тока в проводнике КЦ спирали.

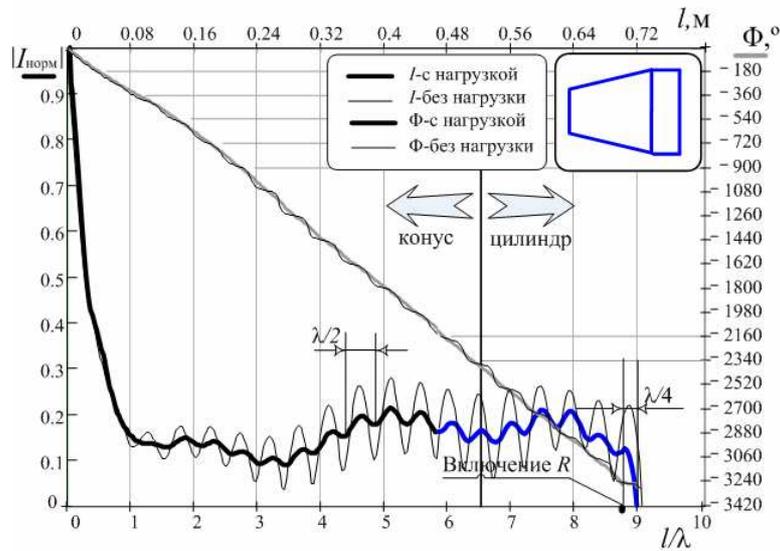


Рисунок 2 – Распределение амплитуды и фазы тока по проводнику спирали для КЦ с включением нагрузки $R = 150$ Ом и $R = 0$ на $f_0 = 4$ ГГц

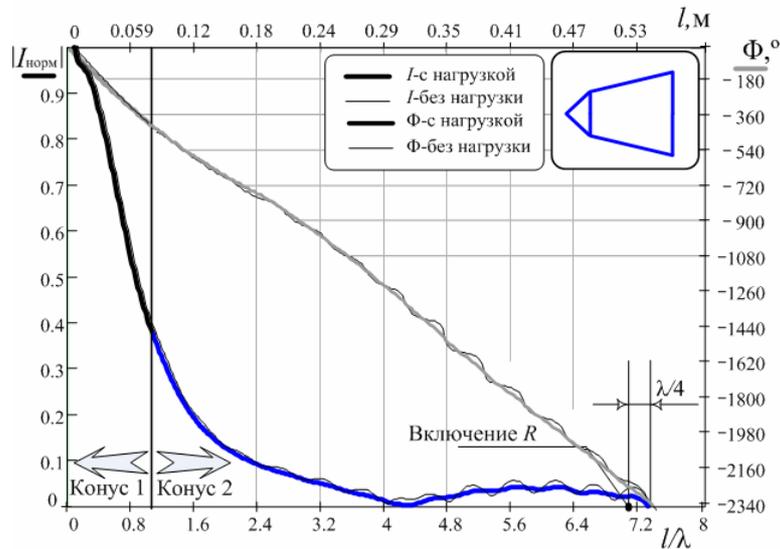


Рисунок 3 – Распределение амплитуды и фазы тока по проводнику спирали для КК с включением нагрузки $R = 150$ Ом и $R = 0$ на $f_0 = 4$ ГГц

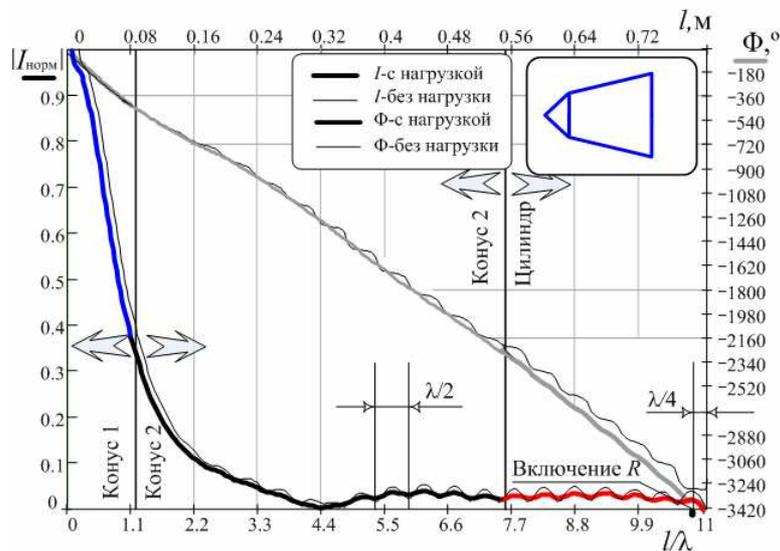


Рисунок 4 – Распределение амплитуды и фазы тока по проводнику спирали для КЦ с включением нагрузки $R = 150$ Ом и $R = 0$ на $f_0 = 4$ ГГц

На рисунке 2 жирными линиями показано распределение тока при включении $R_{\text{акт}}=150$ Ом в спираль, состоящую из основного конуса ($N=5$), переходящего в цилиндр ($N=2$). При этом нагрузочное сопротивление включалось на расстоянии $\lambda_0/4$ от свободного конца, что составляет 8 % от длины проводника двухвитковой цилиндрической части и 4,5 % от суммарной длины проводника КЦ антенны. По сравнению с предыдущим вариантом (тонкими линиями), амплитуда осцилляций в распределении значительно уменьшилась, а фазовое распределение приобрело линейный характер.

Из теории длинных линий известно, что резкое изменение параметров линии передачи, которое имеет место в равношаговой спирали, выполненной на усечённом конусе, в точке соединения коаксиального кабеля с проводником спирали, приводит к переотражениям от этой неоднородности. А это проявляется в увеличении реактивной составляющей сопротивления. Для ослабления этого негативного эффекта в зоне 1 необходимо делать переход с линейным изменением параметров по длине.

Однако, как упоминалось выше, необходимо принять меры для улучшения согласования предложенной базовой конической спиральной структуры ($N=5$, $\Theta=16^\circ$) с линией передач. Для реализации этой идеи предложено начальный участок базового конуса дополнить неусечённым конусом с большим углом конусности, но меньшим количеством витков ($N=2$, $\Theta=30^\circ$). Полученная в этом случае спиральная структура имеет вид конуса с изломом образующей у его начала, тогда будем её называть конус, переходящий на конус (КК).

Распределение тока вдоль проводника в этом случае показано на рисунке 3 тонкими линиями. Как видно из рисунка 3, зона 1 для КК-структуры вытянулась. Примечательно, что на участке, принадлежащем базовому конусу ($N=5$, $\Theta=16^\circ$) амплитудное распределение в зоне 1 приобрело пологий характер, спадающий по экспоненте, а фаза – линейный. Другими словами, признаки режима бегущих волн. Тем не менее, в зоне 2 никаких положительных изменений не обнаружено, наблюдается отражённая составляющая тока. Значит, перейдём к следующему этапу оптимизации.

Применив к полученной КК спиральной структуре метод подавления отражённой волны с помощью включения активного сопротивления $R_{\text{акт}}=150$ Ом, получим токовое распределение, приведённое на рисунке 3 жирными линиями. При анализе полученных зависимостей на рисунке 3 отмечаем отсутствие характерного режима стоячих волн в распределении. Огибающая амплитуды плавно спадает к нулю на конце спирали при линейном фазовом набеге.

Особое внимание следует уделить следующему общему моменту для всех исследуемых спиралей на базе конической ($N=5$, $\Theta=16^\circ$). На центральном витке, соответствующему центральной частоте f_0 , расположенного посередине базовой конической спирали, наблюдается «прогиб» огибающей амплитуды тока, связанный с излучением энергии данной длины волны λ_0 на этом витке. Превышающий средний уровень амплитуды тока на оставшихся витках объясняется существенным взаимовлиянием.

Теперь объединим два рассмотренных выше варианта, соответствующих рисункам 2, 3 (изображённых тонкими линиями). Базовый усечённый конус дополним со стороны малого основания двухвитковой конической спиралью ($N=2$, $\Theta=30^\circ$), а со стороны большого основания базового конуса добавим 2 витка цилиндра, соответствующего радиуса. Образованную таким образом спиральную антенну назовём коническоцилиндрической спиральной антенной с коническим переходом (ККЦ).

Распределение тока вдоль такой спиральной антенны показано на рисунке 4 (тонкими чёрными линиями). Данный вариант спиральной антенны совместил в себе положительные свойства от двух предыдущих модификаций. Как следствие, улучшилось согласование полученной спиральной антенны с питающим кабелем, несколько уменьшено замедление на конце спирали, приводящее к меньшему отражению тока от свободного конца проводника. Другими словами улучшено согласование спирали со свободным пространством. Однако, как и в случае с КЦ спиральной антенной, в зоне 2 наблюдается всё ещё существенная отражённая составляющая.

На последнем этапе оптимизации включим в разрыв проводника ККЦ спиральной структуры нагрузочное сопротивление $R_{\text{акт}}=150$ Ом. Зависимости показаны жирными линиями. Как видно, при сравнении распределения амплитуд и фаз токов, приведённых на рисунках 7, 8, практически полностью отсутствует стоячая волна. А это в свою очередь положительно сказывается на КЭ и КСВ.

Полученную спираль с искомым токовым распределением по проводнику за её отличительные признаки назовём модифицированной гибридноспиральной антенной.

Таким образом, на основании моделирования методом наведённых ЭДС установлен характер распределения тока вдоль проводника конической спирали. Точный расчёт позволил выявить влияние дополнительных спиральных частей на вид токового распределения исследуемой КСА. А это в свою очередь положительно сказалось на стабильности диаграммных свойств и равномерности КСВ в рабочем диапазоне частот. Анализ распределения амплитуд и фаз тока вдоль проводника позволил создать модифицированную спиральную антенну, в которой устанавливается бегущая волна тока. Данные исследования могут быть положены в основу оптимизации геометрических параметров спиральных антенн, что составит предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Чужков Ю.П. Распространение электромагнитных волн в конических равношаговых спиральных антеннах с малой осевой длиной / Ю.П. Чужков, В.А. Филоненко // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. — 1980. — Т. 23, № 9. — С. 64 – 67.
2. Lobkova L.M. Experimental research of loaded conical spirals input impedance characteristics / L.M. Lobkova, M.I. Redin, V.S. Semov // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 18 – 22 Sept. 2006: Proceedings of Third International Conference. — Kharkov: KNURE, 2006. — P. 169 – 171.
3. Юрцев О.А. Спиральные антенны / А.В. Рунов, А.Н. Казарин — М.: Сов. радио, 1974. — 216 с.
4. Кляцкин И.Г. Основы теории линейных антенн / И.Г. Кляцкин. — Ленинград: Изд-во «Ленинград» 1966. — 64 с.

Поступила в редакцию 29.03.2007 г.