

## Создание коаксиального кабеля

Ю.В. Черников

Коаксиальный кабель (от лат. «со» – совместно и «axis» – ось), общий вид которого показан на **рис. 1**, состоит из расположенных соосно центрального проводника *D* и экранирующей оплетки *B*, разделенных изолирующим слоем *C*, а также внешней изоляции *A*, и предназначен для передачи высокочастотных сигналов в одну сторону через центральный проводник и обратно – через экран.

В данной статье излагается история создания коаксиального кабеля.

2 января 1892 г. знаменитый ученый Никола Тесла подал заявку и 6 февраля 1894 г. получил патент США № 514167 на изобретение «Электрический проводник» [1]. Целью этого изобретения было уменьшение потерь энергии в экранированном проводнике от вихревых токов при протекании через него «изменяющегося тока чрезмерно высокого потенциала или токов высокой частоты» [2]. Поставленная в изобретении цель достигалась за счет предложенного проводника (**рис. 2**), на котором обозначено: *A* – токопроводящая центральная жила

проводника; *B* – изолирующий слой; *C* – экран.

Экран *C* разделен на короткие секции, в конец предыдущей секции входит начало следующей, изолированной от конца предыдущей секции материалом *D*. Как указано в патенте, длина каждой секции экрана должна иметь величину значительно меньшую, чем длина волны протекающего тока. Каждая такая секция заземляется через конденсатор очень малой емкости.

Рассмотренный электрический проводник имеет конструкцию, похожую на конструкцию коаксиального кабеля, но это не коаксиальный кабель, так как экран у него не непрерывный и не используется в качестве обратного провода при передаче сигналов. Более корректно электрический проводник Тесла называть «концентрическим» кабелем.

Разработкой теории как симметричных, так и концентрических кабелей успешно занимался известный электротехник, профессор и ректор Петербургского электротехнического института Павел Дмитриевич Войнаровский. В 1912 г. вышла его книга «Теория электрического кабеля», посвященная силовым кабелям, передающим электроэнергию частотой 50 Гц.

Первый в мире кабель, который можно приближенно назвать коаксиальным, был низкочастотным (до 3800 Гц) и подводным. Его проложили в 1921 г. между Ки Уэст (Флорида, США) и Гаваной (Куба). В этом кабеле в качестве обратного провода вместо воды применили внешний проводник

из двух спирально навитых медных лент, благодаря чему уменьшилось его электрическое сопротивление.

23 мая 1929 г. Ллойд Эспеншид и Герман Эффель, сотрудники фирмы AT&T Bell Telephone Laboratories подали заявку и 8 декабря 1931 г. получили патент США № 1835031 на изобретение «Концентрическая проводящая система» [3], которая является первым современным коаксиальным кабелем. В пункте 1 формулы этого изобретения сказано: «В проводящей системе для передачи сообщений два проводника соединены таким образом, что один из них является обратным проводом для другого, каждый проводник имеет форму цилиндра из проводящего материала и оба проводника расположены концентрически (один внутри другого), для разделения проводников электрически и сохранения их концентрического взаимного расположения используется диэлектрик...». Всего формула этого изобретения содержит 41 пункт, касающийся характеристик концентрической проводящей системы и ее применения в системах передачи сообщений.

В 1934 г. сотрудник AT&T Bell Telephone Laboratories, русский по происхождению, Сергей Александрович Щелкунов создал электромагнитную теорию коаксиальных линий и цилиндрических экранов [4], основные положения которой сводятся к следующему:

1. Взаимодействие электромагнитных полей внутреннего и внешнего проводов коаксиального кабеля таково, что его внешнее поле равно

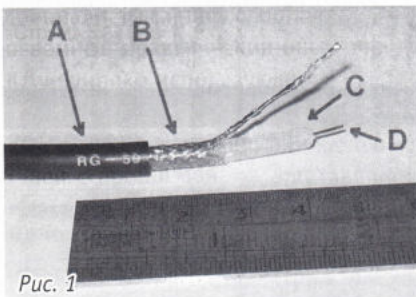


Рис. 1

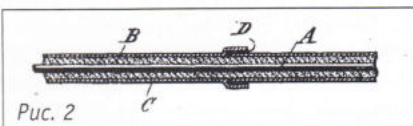


Рис. 2





нулю. Результирующее магнитное поле коаксиального кабеля представлено на **рис. 3**, где  $H_{\varphi}^a$  и  $H_{\varphi}^b$  – напряженности магнитного поля (в цилиндрических координатах) каждого проводника ( $a$  и  $b$ ) отдельно.

В металлической толще проводника  $a$  магнитное поле  $H_{\varphi}^a$  возрастает, а вне его – уменьшается по закону:

$$H_{\varphi}^a = \frac{I}{2\pi r},$$

где  $r$  – расстояние от центра проводника.

В соответствии с законами электротехники магнитное поле  $H_{\varphi}^b$  внутри полого цилиндра отсутствует, а вне его – выражается таким же уравнением, как и для сплошного проводника:

$$H_{\varphi}^b = \frac{I}{2\pi r},$$

где  $r$  – расстояние от центра полого цилиндра.

Учитывая, что токи в проводниках  $a$  и  $b$  равны по величине и противоположны по знаку, магнитные поля внутреннего и внешнего проводников  $H_{\varphi}^a$  и  $H_{\varphi}^b$  в любой точке пространства вне кабеля также будут равны по величине и направлены в разные стороны. Следовательно, результирующее магнитное поле вне кабеля равно нулю. Силовые линии магнитного поля коаксиального кабеля располагаются в виде концентрических окружностей внутри его. Электрическое поле коаксиальной пары замыкается по радиальным направлениям между проводниками  $a$  и  $b$ , а за ее пределами оно равно нулю.

Отсутствие внешнего электромагнитного поля обуславливает основные достоинства коаксиальных кабелей. В обычных симметричных цепях из-за наличия внешнего электромагнитного поля часть энергии рассеивается в виде потерь на тепло за счет вихревых токов в соседних цепях и окружающих кабель металлических массах (свинцовая оболочка, броня). В коаксиальном кабеле внешнее поле отсутствует, и никаких потерь в окру-

жающих его металлических частях нет. Поэтому вся энергия распространяется только внутри кабеля, что обеспечивает передачу очень широкого спектра частот при сравнительно малых потерях.

2. Благодаря своей конструкции коаксиальный кабель обеспечивает высокую помехозащищенность высокочастотной части передаваемого спектра частот. Это объясняется следующим образом. Силовые линии внутреннего магнитного поля, связанного с током, который протекает по проводнику  $a$ , пересекая толщу проводника, наводят в нем вихревые токи. Как показано на **рис. 4**, вихревые токи  $I_{в.т.}$  в центре проводника  $a$  имеют направление, обратное направлению основного тока, протекающего через него, а на периферии их направления совпадают. В результате взаимодействия вихревых токов с основным происходит перераспределение тока по сечению проводника, при котором плотность его возрастает к поверхности проводника. Данное явление, называемое явлением поверхностного эффекта, увеличивается с возрастанием частоты тока, магнитной проницаемости и диаметра проводника. При достаточно высокой частоте ток протекает лишь по поверхности проводника.

Одновременно переменное магнитное поле, создаваемое током в проводнике  $a$ , наводит в металлической толще проводника  $b$  вихревые токи  $I_{в.т.}$ , которые на внутренней поверхности этого проводника  $b$  совпадают по направлению с основным током  $(I + I_{в.т.})$ , а на наружной поверхности движутся против него  $(I - I_{в.т.})$ , как это показано на **рис. 5**. В результате ток в проводнике  $b$  перераспределяется так, что его плотность возрастает в направлении к внутренней поверхности (эффект близости). Следовательно, токи в проводниках  $a$  и  $b$  смещаются и концентрируются на взаимно обращенных поверхностях проводников. Чем выше частота

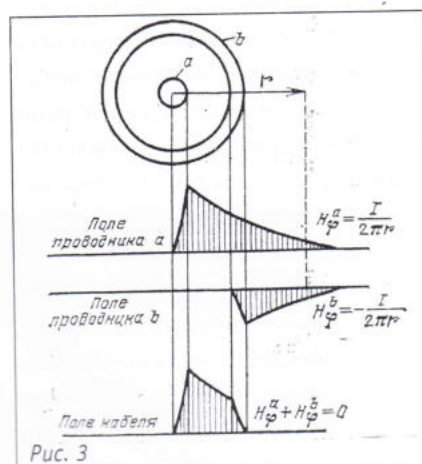


Рис. 3

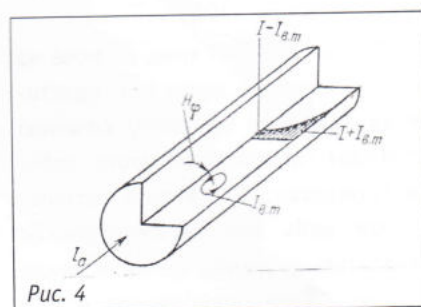


Рис. 4

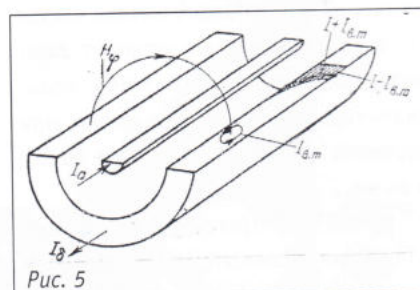


Рис. 5

тока, тем сильнее эффект смещения тока на внешнюю поверхность проводника  $a$  и внутреннюю поверхность проводника  $b$ . В результате энергия сосредотачивается внутри коаксиального кабеля в диэлектрике, а проводники лишь задают направление распространению волн электромагнитной энергии.

Мешающее электромагнитное поле высокой частоты, создаваемое соседними цепями передачи или другими источниками помех, действуя на внешний проводник коаксиальной пары, распространяется не по всему сечению, а лишь по его наружной поверхности.

Чем выше частота, тем больше отдаляются друг от друга основной ток в проводнике  $b$ , который концентрируется на его внутренней поверх-





ности, и ток помех, который концентрируется на внешней поверхности проводника  $b$ . Таким образом, внешний проводник коаксиальной пары выполняет две функции: является обратным проводником цепи передачи и экранирует передачу, ведущуюся по кабелю, от возникающих помех.

В отличие от других типов кабелей, требующих для защиты от помех специальных мер (симметрирование, экранирование и т.д.), в коаксиальных кабелях на высоких частотах это обеспечивается самой их конструкцией.

При постоянном токе, а также на низких частотах, когда ток практически проходит по всему сечению проводов, достоинства этого кабеля пропадают. Более того, коаксиальная цепь как несимметричная относительно других цепей и земли (параметры ее проводников  $a$  и  $b$  различны) в диапазоне низких частот во всех отношениях уступает симметричным кабелям, поэтому коаксиальный кабель используется при передаче сигналов на частоте 60 кГц и выше.

В 1935 г. Щелкунов со своими коллегами Эспеншидом и Эффелем высказали предположение, что по коаксиальному кабелю можно передавать телевизионные сигналы или 200 телефонных разговоров одновременно. Действительность полностью подтвердила этот прогноз. Первый в мире высокочастотный коаксиальный кабель, состоящий из двух пар 1,83/6,7 (диаметр внутреннего проводника, мм / внутренний диаметр внешнего проводника, мм), был проложен на экспериментальной линии «Нью-Йорк – Филадельфия». По кабелю одновременно передавались 224 телефонных разговора в спектре частот шириной 1 МГц.

Впоследствии началось широкое использование коаксиальных кабелей в технике связи. В середине XX века следует отметить следующие, наиболее важные применения коаксиального кабеля:

- 1936 г. – первая телепередача с Берлинских Олимпийских игр в Лейпциг;

- 1941 г. – первое коммерческое использование коаксиального кабеля компанией AT&T в США и начало эксплуатации кабеля между Миннеаполисом (Миннесота) и Стивен Пойнт (Висконсин), через который передавались ТВ-канал и 480 разговоров;

- 1956 г. – проложена первая трансатлантическая телефонная линия.

В Советском Союзе имя Щелкунова и его роль в создании теории коаксиального кабеля долгие годы замалчивались [5]. Его имя в отечественных учебниках и монографиях по коаксиальным кабелям и линиям связи, а также в Большой Советской Энциклопедии не упоминается. Причина заключалась в том, что Щелкунов был белоэмигрантом.

В 1917 г. студент Московского университета Щелкунов был мобилизован в белую армию, с которой прошел всю Сибирь. Затем он перебрался в Японию, а в 1921 г. оказался в США. Изучив английский язык, он продолжил образование в Вашингтонском университете, где и получил ученую степень магистра математики. Докторскую диссертацию Щелкунов защитил в 1928 г. в Колумбийском университете и в этом же году он начал работать в AT&T Bell Telephone Laboratories, где и проработал многие годы. Кроме создания теории коаксиальных линий и цилиндрических экранов, Щелкунов стоял у истоков создания волноводов, разработал математическую теорию электромагнитного поля в них. В годы Второй мировой войны Щелкунов был техническим консультантом Национального комитета оборонных исследований США. Уйдя в 1960 г. из Bell Telephone Laboratories, Щелкунов преподавал в Колумбийском университете. Умер Сергей Александрович Щелкунов 2 мая 1992 г. в возрасте 95 лет.

Коаксиальные электрические кабели на протяжении полувека во

всем мире являлись основным типом кабеля для международных магистралей дальней связи. Они обеспечили экономичность этих систем, поскольку, чем шире эффективно пропускаемый линией связи спектр частот, тем большее количество различных передач можно организовать по данной линии и тем лучшими технико-экономическими показателями она обладает. Однако по мере повышения передаваемой частоты увеличивалось затухание сигналов, что служило причиной укорачивания длины участков между соседними усилителями и значительному увеличению их количества.

В конце 70-х, начале 80-х годов прошлого столетия появились принципиально новые волоконно-оптические средства связи, позволившие передавать многие миллионы телефонных разговоров по одному кабелю.

В настоящее время коаксиальные кабели, благодаря своим уникальным характеристикам, широко используются для передачи высокочастотных сигналов в различных областях техники: в системах связи, в кабельном телевидении, компьютерных сетях, в автоматизированных системах управления и др.

#### Литература:

1. Tesla H. *Electrical conductor. Patent USA № 514167, dated February 6, 1894.*
2. Ионов А.Д., Попов Б.В. *Линии связи: Учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1990.*
3. Espenshied L., Affel H. *Concentric conducting system, Patent USA № 1835031, dated Dec. 8, 1931.*
4. Schelkunoff S.A. *The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shields. – Bell System Technical Journal, vol. 13, p.p. 532 – 579, oct., 1934.*
5. Шарле Д.Л. *Сергей Щелкунов – вернуть из забвения имя изобретателя коаксиального кабеля. – Электросвязь, 1994, № 7.*