

Юрий Черников, г. Днепр

В данной статье излагается история создания коаксиального кабеля.

Коаксиальный кабель (от латинского «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, предназначен для передачи высокочастотных сигналов. Причем ток течёт в одну сторону через центральный проводник и обратно – через экран.

«Концентрический» кабель Н. Теслы



Рис. 2

2 января 1892 г. знаменитый ученый Никола Тесла (**рис. 2**) 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, показанного на **рис. 3**, где:

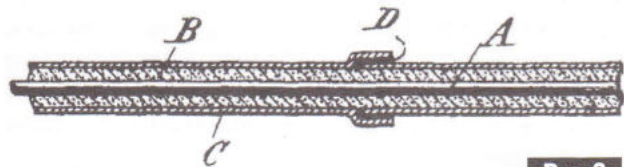


Рис. 3

A – центральная жила проводника, проводящая ток;

B – изолирующий слой;

C – экран.

Экран C разделен на короткие секции, при этом в конец предыдущей секции входит начало следующей, но оно изолировано от конца предыдущей секции материалом D. Как указано в патенте, длина каждой секции экрана должна иметь величину значительно меньшую, чем длины волн используемых токов. 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 Теслы назвать «концентрическим» кабелем.

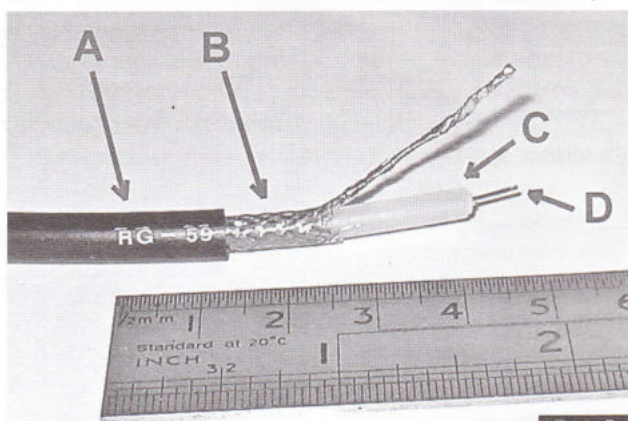


Рис. 1

Разработкой теории как симметричных так и концентрических кабелей успешно занимался известный электротехник, профессор и ректор Петербургского электротехнического института Павел Дмитриевич Войнаровский (**рис. 4**). В 1912 г. вышла его книга «Теория электрического кабеля», посвященная силовым кабелям, передающим электроэнергию частотой 50 Гц.



Рис. 4

Первый в мире кабель, который можно приближенно назвать коаксиальным был низкочастотным (до 3800 Гц) и подводным. Его проложили в 1921 г. между г. Ки Уэст (Флорида, США) и г. Гаваной (Куба). В этом кабеле в качестве обратного провода применили внешний проводник из двух спирально навитых медных лент, благодаря чему уменьшилось его электрическое сопротивление.

Коаксиальный кабель

Л. Эспеншида и Г. Эффеля

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 про-

водящей системы и ее применения в системах передачи сообщений.

Электромагнитная теория коаксиального кабеля С. А. Щелкунова



Рис.5

В 1934 г. сотрудник этой же фирмы AT&T Bell Telephone Laboratories, русский по происхождению, Сергей Александрович Щелкунов (рис.5), создал электромагнитную теорию коаксиальных линий и цилиндрических экранов [4]. Основные положения этой теории таковы:

1. Взаимодействие электромагнитных полей внутреннего и внешнего проводов коаксиального кабеля таково, что его внешнее поле равно нулю. Рассмотрим отдельно магнитное и электрическое поля коаксиальной цепи.

Результирующее магнитное поле коаксиального кабеля представлено на рис.6, где H_ϕ^a и H_ϕ^b – напряженности магнитного поля (в цилиндрических координатах) каждого провода (а и б) в отдельности.

В металлической толще проводника а магнитное поле H_ϕ^a возрастает, а вне его уменьшается по закону:

$$H_\phi^a = I / 2\pi r$$

где r – расстояние от центра провода.

В соответствии с законами физики магнитное поле H_ϕ^b внутри полого цилиндра отсутствует, а вне его выражается таким же уравнением как и для сплошного проводника:

$$H_\phi^b = I / 2\pi r$$

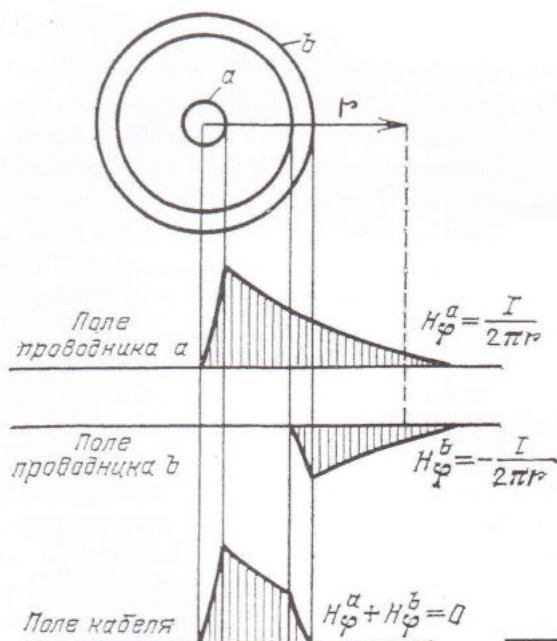


Рис.6

где r – расстояние от центра полого цилиндра.

Учитывая, что токи в проводах а и б равны по величине и противоположны по знаку, магнитные поля внутреннего и внешнего проводников H_ϕ^a и H_ϕ^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 него. Электрическое поле коаксиальной пары замыкается по радиальным направлениям между проводниками а и б, а за её 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 окружающих его металлических частях нет. Поэтому вся энергия распространяется только внутри кабеля, что обеспечивает передачу очень широкого спектра частот при сравнительно малых потерях.

2. Коаксиальный кабель благодаря своей конструкции обеспечивает высокую помехозащищенность высокочастотной части передаваемого спектра частот. Дело в том, что силовые линии внутреннего магнитного поля, связанного с током, который протекает по проводнику а, пересекая толщу проводника, наводят в нём вихревые токи. Как показано на рис.7, вихревые токи $I_{в.т.}$ в центре проводника 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 «поверхностным эффектом», увеличивается с возрастанием частоты тока, магнитной проницаемости и диаметра

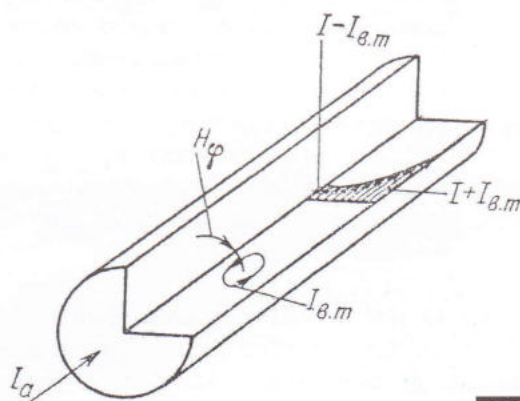


Рис.7

проводника. При достаточно высокой частоте ток протекает лишь по поверхности проводника.

Одновременно переменное магнитное поле, создаваемое током в проводнике **а**, наводит в металлической толще проводника **б** вихревые токи $I_{в.т.}$, которые на внутренней поверхности этого проводника **б** совпадают по направлению с основным током $(I + I_{в.т.})$, а на наружной поверхности движутся против него $(I - I_{в.т.})$ (рис.8). В результате ток в проводнике **б** перераспределяется так, что его плотность возрастает в направлении к внутренней поверхности (эффект близости). Следовательно, токи в проводниках **а** и **б** смещаются и концентрируются на взаимно обращенных поверхностях проводников. Чем выше частота тока, тем сильнее эффект смещения тока на внешнюю поверхность проводника **а** и внутреннюю поверхность проводника **б**. 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 **б**, который концентрируется на его внутренней поверхности, и ток помех, который концентрируется на внешней поверхности проводника **б**. Таким образом, внешний проводник коаксиальной пары выполняет две функции:

- является обратным проводником цепи передачи;
- экранирует сигнал, передаваемый по кабелю, от мешающих влияний.

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 и 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 её проводов **а** и **б** различны) в диапазоне низких частот во всех отношениях уступает симметричным кабелям, поэтому коаксиальный кабель используется при передаче для частот 60 кГц и выше.

Первые применения коаксиального кабеля

В 1935 г. Щелкунов со своими коллегами Эспеншидом и Эффелем высказали предположение, что по коаксиальному кабелю можно передавать

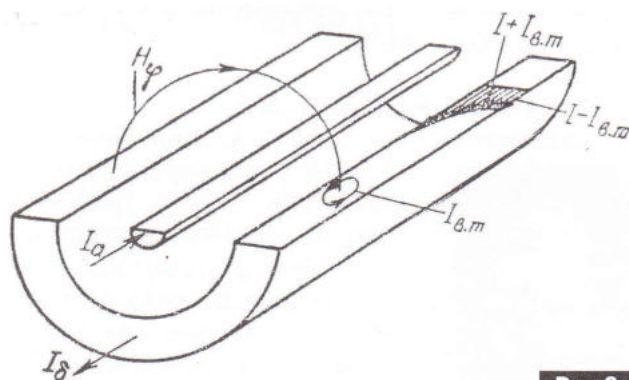


Рис.8

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 (где в числителе – диаметр внутреннего проводника в мм, а в знаменателе – внутренний диаметр внешнего проводника в мм), был проложен на экспериментальной линии Нью-Йорк – Филадельфия. По кабелю одновременно передавались 224 телефонных разговора в спектре частот шириной 1 МГц.

Далее началось широкое использование коаксиальных кабелей в технике связи. В 30 – 50 годы прошлого столетия следует отметить следующие, наиболее важные, применения коаксиального кабеля:

- 1936 г. – первая телепередача с Берлинских Олимпийских игр в г. Лейпциг;
- 1941 г. – первое коммерческое использование коаксиального кабеля компанией AT&T – в США – началась эксплуатация кабеля, между г. Миннеаполисом (штат Миннесота) и г. Стивен Пойнт (штат Висконсин), через который передавались ТВ-канал и 480 разговоров;
- 1956 г. – проложена первая трансатлантическая телефонная линия TAT-1.

Краткие сведения о С. А. Щелкунове

В Советском Союзе имя Щелкунова и его роль в создании теории коаксиального кабеля замалчивались долгие годы [5]. Его имя в отечественных учебниках и монографиях по коаксиальным кабелям и линиям связи (того времени) и 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. он 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 Bell Telephone Laboratories, проработав

в этой компании многие годы. Кроме создания теории коаксиальных линий и цилиндрических экранов Щелкунов внёс значительный вклад в развитие теории и практики антенной техники, 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.

Эпилог

Коаксиальные электрические кабели на протяжении полувека являлись основным типом кабеля на международных магистралях дальней связи во всем мире. 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. – С. 31.
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. – С. 47.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА промышленного оборудования, металлообработки, литья и энергетики



МАШПРОМ



ЛИТЭКС



ЭНЕРГОПРОМ

25-27 сентября 2019

Место проведения: ПР «ЛАВИНА» г. Днепр, ул. Космическая, 20

ООО Экспо-центр «Метеор», 49008, Украина, г. Днепр (0562) 357-357 litex@expometeor.com

