

УДК 621.37-621.39(091)

Проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков и поиски их решения

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 29 апреля 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: *На рубеже 19 и 20 веков междугородная телефонная связь превратилась в серьезный бизнес, однако, стоимость линий была высокой, а практический коммерческий диапазон передачи телефонного сигнала ненамного превышал 1600 км. По мере увеличения длин междугородних телефонных линий возникло две проблемы, которые были признаны особенно актуальными, в частности, перекрестные помехи и затухание сигнала. Решением этих проблем занялись научные сотрудники компании AT&T. В данной статье рассмотрены работы ученых и инженеров, которые привели к реальным практическим решениям задач дальней телефонной связи, в частности, Оливера Хевисайда, Джона Стоуна и Джорджа Кэмпбелла.*

Ключевые слова: *дальняя телефонная связь, телеграфные уравнения, биметаллический телефонный кабель, уравнение Кэмпбелла, загрузочные катушки Кэмпбелла.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков и поиски их решения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 1. С. 117—151.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков и поиски их решения / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 117—151.

1. Введение

В серии статей [1, 2] исследованы причины, которые заставили ученых и инженеров обратить свой взор на совершенствование когерера, который являлся демоделирующим устройством в первых системах беспроводной телеграфии. Показан научный поиск, направленный на решение этой

проблемы в социуме с его удачами и просчетами. Рассмотрены два основных пути исследований, которые привели к желаемым, но не равнозначным результатам. Это исследование катодных лучей [3] и эффекта Эдисона [4]. Отмечены важные научные открытия и технические изобретения сделанные учеными на пути к поставленной цели. В разработке наиболее чувствительного детектирующего устройства преуспел американский радиотехник Ли де Форест, который в 1906 г. сумел изобрести трехэлектродную вакуумную лампу под названием «аудион». Долгое время, в течение пяти лет, эта лампа использовалась в качестве высокочувствительного детектора, а об ее способности усиливать электрический сигнал не предполагал даже сам изобретатель. Аудион не имел широкого применения и использовался в радиоприемниках наряду с электролитическим и кристаллическим детекторами. Что касается производства аудиона, то его изготовление осуществлялось в ограниченных количествах по контрактам в основном для военно-морского флота США и для продажи радиолюбителям [5].

Отношение к аудиону изменилась в 1912 году, когда Фриц Левенштейн разработал усилитель звуковой частоты на аудионе со смещением на сетке, а Ли де Форест — многокаскадные аудионные усилители с установкой режима работы аудиона [6]. С этого момента Ли де Форест предпринял титанические усилия, чтобы заинтересовать своим изобретением крупные промышленные компании. Благодаря своему другу, известному американскому радиотехнику Джону С. Стоуну, де Форест продал свое изобретение крупной американской телефонной компании AT&T, которой понадобился усилитель электрических сигналов для сверхдлинной телефонной линии Нью-Йорк — Сан-Франциско. Потребности дальней телефонии стали тем главным фактором, который заставил обратить внимание на изобретение Ли де Форестом трехэлектродной лампы.

Настоящая статья открывает серию статей, посвященных организации и проведению научного поиска ученых и инженеров для решения проблем, возникших при передаче информации по телефонным линиям дальней связи в начале 20 века. Эти проблемы в конце концов были решены с помощью телефонной трансляции (репитеров) на вакуумных лампах, разработанной компанией AT&T. Компания AT&T, получив права на аудион, довела его конструкцию до массового промышленного производства и тем самым открыла эпоху в использовании ламповой техники, которая продолжалась до 1948 года, пока ей на смену не пришла полупроводниковая эра.

2. Проблемы первых междугородних телефонных линий

Первые телефонные линии использовали тот же тип внешних цепей, что и телеграфные линии, а именно одиночный неизолированный желез-

ный или стальной провод, поддерживаемый деревянными столбами со стеклянными изоляторами. Поскольку для электрических сигналов требуется два провода, второй «провод» был заземлением через землю. В 1881 году по этой схеме в США была проложена первая в мире междугородняя воздушная телефонная линия между Провиденсом (англ. *Providence*, город на восточном побережье США) и Бостоном. Ее длина составила около 80 км. Линия работала плохо, поскольку были серьезные проблемы как из-за помех, так и из-за затухания сигнала. Устранение возникших проблем было поручено Джону Карти (*John Joseph Carty*, 14.04.1861—27.12.1932), молодому сотруднику компании *New England Telephone* в Бостоне. Он установил, что телефонная линия с использованием одного провода и цепи заземления удовлетворительно работает только на более коротких расстояниях, нежели построенная. Решение проблемы Карти нашел в замене однопроводной цепи на двухпроводную. В этой линии использовалось два металлических проводника для каждой цепи, что исключало заземление, которое в то время было источником большей части шума в телефонных соединениях.

Использование медной проволоки вместо стальной значительно улучшило ситуацию, но технология ее производства была несовершенна, и медная проволока получалась низкой прочности и не могла быть самонесущей в воздушных линиях. Проблема была решена в 1877 году с изобретением твердотянутой медной проволоки. В 1884 году было проведено первое испытание жестких медных проводов на междугородной телефонной связи между Нью-Йорком и Бостоном (350 км).

Двухпроводные медные схемы, однако, не решили всех проблем междугородной телефонии. По мере увеличения количества линий помехи (или перекрестные помехи) от соседних линий на одной и той же траверсе телефонного столба становились значительными. Причина заключалась в том, что возмущающие провода не находились на одинаковом расстоянии от двух возмущающих проводов, и, следовательно, наведенные токи не гасились полностью.

В 1885 году компанией AT&T была построена линия связи между Нью-Йорком и Филадельфией (150 км). Линия состояла из 12 металлических цепей, что было первым случаем такого большого количества цепей на одной и той же дальней опорной линии. Вопреки предыдущему опыту с линиями с меньшим количеством цепей, характеристики перекрестных помех были почти такими же плохими, как и в цепях с заземлением. В том же году, сотруднику AT&T Джону А. Барретту (*John A. Barrett*) было поручено сбалансировать линию между Нью-Йорком и Филадельфией.

В то время была известна общая концепция снижения перекрестных помех за счет скручивания проводов, однако, отсутствовал опыт применения этого способа для открытых проводных линий поддерживаемым на столбах. В связи с этим Барретт разработал элементарную схему такого уравнивания, которая получила название схема «перестановки» (англ. *transposition*). В отечественной технической литературе эта технология носит название «скрещивание» телефонных цепей¹. Схема Барретта позже была запатентована [7]. Патент US392775A был выдан 13 ноября 1888 г. на перекрещивание (скрещивание) телефонных проводов для предотвращения перекрестных помех между параллельными линиями. Перестановка или перекрещивание воздушных проводов через определенные расчетные интервалы предотвращает перекрестные помехи между цепями на одной полюсной линии; если никаких перестановок не делается и провода просто идут параллельно, то разговор по любой одной цепи обычно можно услышать на любых параллельных линиях.

Сделанное изобретение относилось конкретно к столбовым линиям, независимо от их количества, когда они сгруппированы вместе. В патенте US392775A даны рекомендации о том, как расположить ряд металлических электрических цепей таким образом, чтобы каждая из них была избавлена от любых возмущающих воздействий других, рис. 1. В формуле изобретения патента US392775A сказано: «Три или более по существу параллельных металлических электрических цепей, прямые и обратные провода, два или более из которых разделены на секции путем пересечения в разных точках, чтобы быть индуктивно нейтральными по отношению к электрическим изменениям в каждой из других цепей».

В системе Барретта последовательные переставленные полюса расположены на расстоянии около 1300 футов (396,24 м). Эту систему несложно смонтировать из-за ее повторяющейся схемы, и она работает достаточно хорошо, когда количество цепей небольшое. Но позже было обнаружено, что она неадекватна при большом количестве цепей. Анализ системы перестановки телефонных проводов, представленной на рис. 1, показывает, что если длина цепи невелика, около 1 мили (1,6 км) или меньше, то каждая цепь будет индуктивно сбалансирована по отношению к каждой из других, и, таким образом, чрезмерные перекрестные помехи не возникнут.

Если задействовано много проводов, как, например, в линии с четырьмя ветвями с 40 проводами, то схемы перестановки становятся очень сложными. Это еще более осложняется с использованием фантомных це-

¹ Инструкция по скрещиванию телефонных цепей воздушных линий связи. Утверждена зам. начальника Главного научно-технического управления Министерства связи СССР Мамоновым Е.С. 16 декабря 1980 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200040472> (20.04.2022).

пей, поскольку нужно не только минимизировать перекрестные помехи между боковыми цепями, но также необходимо уменьшить перекрестные помехи, вызванные фантомами.

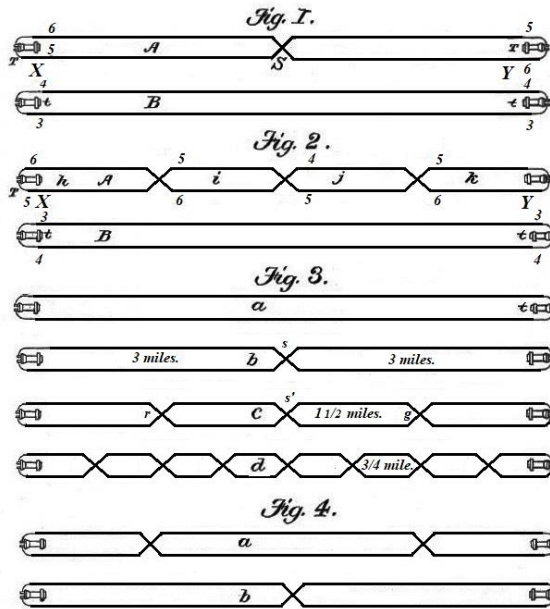


Рис. 1. Система перестановки проводов, была первой коммерческой разработкой, созданной в результате изобретения Барретта. Рисунок из патента US392775А Дж. Барретта.
 Fig. 1. The wire swapping system was the first commercial development resulting from Barrett's invention. Drawings from US392775A patent J. Barrett

Более сложные и более эффективные системы перестановки были разработаны после того, как сотрудник АТ&Т Эдвин Х. Колпиттс (*Edwin H. Colpitts*) в 1904 году провел сложную серию измерений их прямой емкости с использованием оборудования, разработанного его коллегой Кэмпбеллом. Его работа привела к современной конструкции перестановок. Два метода перестановок показаны на рис. 2. Расположение скобок наиболее широко использовалось из-за простоты до появления передачи несущей на высоких частотах, когда преобразование точечного типа стало широко использоваться из-за более точного баланса, которого можно было достичь.

Таким образом, к последнему десятилетию 19 века развился отчетливо «телефонный» тип открытых проводных линий и были установлены стандарты для столбовых линий. Эти линии, использующие перестановочные металлические цепи из твердотянутой меди, в течение многих лет

составляли основу линии междугородной связи. Даже сегодня они являются экономичными и общепринятой средой для проводных телефонных линий в малонаселенных регионах, где имеется лишь несколько линий.

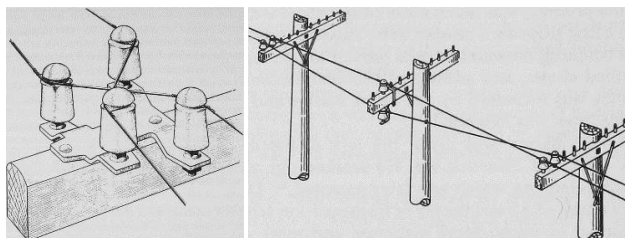


Рис. 2. Два стандартных метода перестановок на воздушных линиях телефонной связи: слева — точечный тип и справа — тип скобки [8].

Fig. 2. Two standard methods for transposition on pole lines: on the left — point type, and on the right — drop-bracket type [8]

В 1886 году президент АТ&Т Теодор Н. Вейл² (*Theodore Newton Vail*, 16.07.1845—16.04.1920) сделал следующее заявление [8, р. 204]:

«Мы обнаружили, что между металлическими цепями с прямым соединением проводов присутствуют очень значительные перекрестные помехи, возможно, не такие сильные, как в заземленных цепях, но существенно не меньше. Мы полностью устранили это, обеспечив баланс между схемами».

Этот так называемый баланс был достигнут системой перестановки проводов каждой пары таким образом, что каждая сторона провода была сбалансирована не только по отношению к земле, но и по отношению к проводам других пар на линии.

В марте 1891 г. Джон Карти представил разработанную им теорию перестановки телефонных проводов, которую предполагалось использовать в течение ряда лет [9]. Карти установил, что основной причиной перекрестных помех между телефонными цепями является электростатическая, а не электромагнитная индукция. Одним из методов устранения перекрестных помех стала установка витых пар через определенные интервалы в телефонные линии, рис. 2. Сделанное Карти открытие и разработанные методы соответствующего построения смежных металлических телефонных линий стали после этого использоваться повсеместно. В статье [9], опубликованной Карти, даны методы для определения «тихой» или нейтральной точки, в которой нельзя услышать перекрестные разговоры, а также описаны оригинальные эксперименты, показывающие, как различить электростатическую и электромагнитную индукцию в телефонных линиях.

² Теодор Н. Вейл был два раза президентом АТ&Т (*American Telephone & Telegraph*) с 1885 по 1889 гг., и снова с 1907 по 1919 гг.

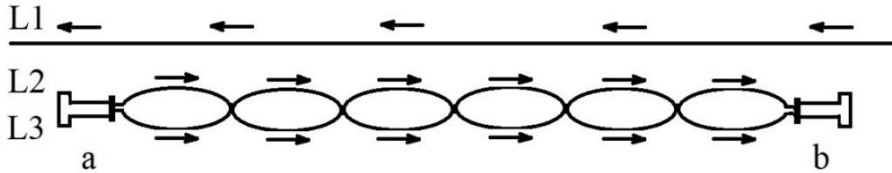


Рис. 2. Элементарная схема телефонной линии с витыми парами для уменьшения перекрестных помех. Обе стороны цепи $L2$ и $L3$ закручены по спирали друг относительно друга, так что их среднее расстояние от возмущающего провода $L1$ одно и тоже (одинаково). При такой схеме на телефоны a и b не действует наводка от провода $L1$ [9].

Fig. 2. Elementary circuit of a telephone line with twisted pairs to reduce crosstalk. Both sides of the circuit $L2$ and $L3$ are twisted in a spiral relative to each other, so that their average distance from the disturbing wire $L1$ is the same (same). With such a scheme, telephones a and b are not affected by pickup from wire $L1$ [9].

По мере увеличения количества телефонных проводов и необходимости их связывания в кабели было обнаружено, что в дополнение к перекрестным помехам добавилась еще один элемент помех, связанный с электростатическим эффектом кабеля, из-за чего голос передавался невнятно и приглушенно. Этот тип помех сокращал предельное расстояние передачи речи и особенно был замечен на телефонных кабельных линиях.

На длинных линиях связи, помимо рассмотренных проблем, были и другие. В таких линиях, несмотря на использование двухпроводной медной цепи, происходило значительное ослабление телефонного сигнала. Это приводило к низкому качеству передачи человеческой речи. Возникшая проблема эксплуатации дальних телефонных линий связи на рубеже 19 и 20 веков требовала своего быстрого решения. Нужны были новые конструкции кабелей, принципиально отличные от существовавших, особенно от телеграфных кабелей. Устройства, которые до этого использовались, на телефонных линиях, не отвечали предъявляемым новым требованиям. Еще не был изобретен ламповый аудион Ли де Фореста, поэтому следовало искать другие подходы по усовершенствованию телефонных линий.

3. Фантомные цепи

В начале 1886 года Карти разработал специальную схему телефонной линии (рис. 3) с целью снизить пагубные эффекты из-за индукции в длинных линиях с одним проводом и цепью заземления, а также уменьшить сопротивление длинных цепей и увеличить доступную пропускную способность линий для передачи и приема.

Предложенная схема (рис. 3) состояла из двух проводников вместо одной основной линии; передача токов в этой схеме производилась по обоим

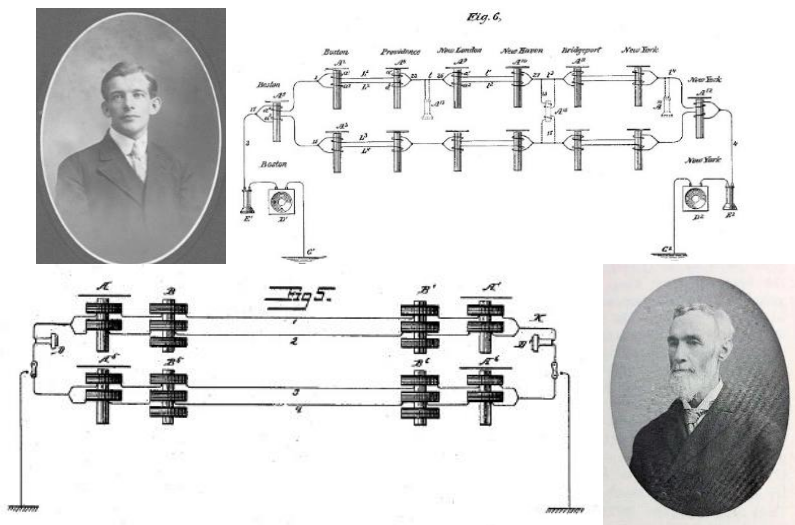


Рис. 3. Схемы дуплексных телефонных систем: сверху — рисунок из патента US348512A Джона Карти, внизу — рисунок из патента US417511A Эбнера Роузбру.

Fig. 3. Diagrams of duplex telephone systems: top – fig. from John Carty's US348512A patent, bottom – fig. from Abner Rosebrugh's US417511A

линиям, при этом в качестве обратного проводника используется третий проводник, группа проводников или земля. Одинаковые токи, наведенные на эти две линии, оказывают одинаковое и противоположное воздействие на приемный аппарат, поскольку каждый провод включает в свою цепь катушку приемного прибора, и эти две катушки противостоят друг другу. Линии после прохождения приемного прибора на каждой оконечной станции соединяются друг с другом, а затем с обратным проводом или с землей. Объединенные проводники вместо того, чтобы вести прямо к земле, могут быть проведены к более или менее удаленным станциям, и там снова соединяться с ветвями, ведущими к другой станции. Предложенный вариант телефонной линии представлял собой фантомную схему с использованием повторяющихся катушек индуктивности, которая позволяла передавать три разговора по двум парам проводов.

В августе 1886 года Карти на разработанную схему фантомной телефонной линии получил патент US348512A [10], который был весьма близок к патенту US417511A [11] канадских изобретателей Роузбру: отца Эбнера (*Rosebrugh Abner Mulholland*, 1835—1914) и сына Томаса (*Thomas Reeve Rosebrugh*, 1866—1943). Эта схожесть настолько очевидна, что вполне можно согласиться с предположением А. М. Роузбру о том, что их идея была позаимствована АТ&Т, когда они представили материалы изоб-

ретенция на рассмотрение компании для получения американского патента [12] (раннее они получили британский патент на это изобретение [13]). Нужно заметить, что у изобретений Карти и Роузбру одна цель — уменьшить влияние индукционных помех на телефонную связь. Однако методы ее достижения решались разными схемными решениями. У Карти в металлическую цепь, состоящую из последовательного ряда связанных катушек индуктивности, последовательно включены телефон и микрофон, а у Роузбру наоборот, телефон и микрофон включены в две составляющие ветви этой цепи [14]. В статье [15] А. М. Роузбру подчеркивает, что опубликованное им описание [14] дуплексной системы телефонных линий, также независимо от него было разработано мистером Дж. Карти. В этой системе две параллельные магистральные линии соединяются на каждом конце и соединяются с линией заземления. Два провода используются одновременно: как металлическая цепь, так и цепь заземления.

В более позднем патенте А. М. Роузбру [16] было показано использование другого типа трансформатора для обеспечения работы двух телефонных цепей. Для этого вместо одного трансформатора с уравновешенными обмотками на одном сердечнике использовались два отдельных трансформатора. Эта компоновка оказалась ненадежной, так как не могла обеспечить удовлетворительную работу телефонной системы.

4. Дальнейшее развитие телефонной связи и новые проблемы

В 1888 году, после того как несколько зимних метелей на северо-востоке США разрушили воздушные линии дальней телефонной связи, AT&T начала разработки приемлемой конструкции подземного кабеля. Два года спустя, чтобы обеспечить передачу сигнала на большие расстояния, *American Bell* приступила к модернизации своих однопроводных схем в двухпроводные. В течение двух лет эти двухпроводные, или металлические, цепи соединили примерно 12 процентов или 240 000 клиентов *American Bell*.

Когда в 1893 году истек срок действия первоначального патента Белла на телефон, появилось несколько конкурентов, что вызвало судебные иски со стороны AT&T, которая стремилась сохранить свою монополию на рынке дальней связи. Занятая этим судебным процессом, AT&T в конечном итоге потеряла значительную долю рынка в пользу конкурентов на Западе и Среднем Западе США.

В процессе развития телефонной связи расстояния между телефонными станциями стали увеличиваться, что привело к ряду технических проблем, которых не было в более ранних телеграфных системах, а потом и телефонных линиях. Даже при использовании двухпроводной системы

вскоре стало очевидно, что по дальности передачи телефонные сигналы уступают телеграфным сигналам из-за большего затухания (то есть уменьшения мощности сигнала) в железе и использования более высоких частот телефонных сигналов. Открытая проводная линия во многих отношениях была неплохой средой для телефонной связи. Приблизительно коэффициент затухания для такой линии на телефонных частотах определяется выражением³ [8, p. 207]:

$$\alpha \approx \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}},$$

где параметры линии: индуктивность L , активное сопротивление R , межпроводная емкость C и проводимость утечки через изоляцию G .

Вышеприведенная связь между первичными константами и затуханием в телефонной линии не была полностью понята в то время, но с ее помощью мы теперь можем увидеть основу для прагматичного подхода, принятого для минимизации R за счет использования меди (около 10 процентов сопротивления стали) и минимизации G за счет правильной конструкции изоляторов. Для хорошо изолированной линии часть уравнения, включающая R , была несколько более значимой, чем G -компонента. Интуитивно можно ощутить необходимость минимизировать C как шунт через линию. Однако, прошло некоторое время, прежде чем Хевисайд, Кэмпбелл и Пупин убедили практиков в том, что добавление последовательной индуктивности может принести пользу. На самом деле, для любой линии существует оптимальное соотношение между C и L , поскольку высокое отношение C/L увеличивает влияние R , а низкое отношение увеличивает влияние G . Оказывается, что для открытого провода соотношение не слишком велико, далеко от оптимального, хотя некоторое улучшение можно получить, увеличив L за пределы собственной индуктивности разнесенных проводов.

Принципиальное различие между телеграфными и телефонными системами определялось наибольшей частотой передаваемых сигналов. Частоты сигналов, передаваемых по телефонным линиям, были в 30 раз выше, чем частоты сигналов телеграфа. Если для телеграфного сигнала требовалось не более 100 Гц, то для удовлетворительной передачи звуков человеческой речи нужно было, по меньшей мере, 3000 Гц. С повышением частоты, происходит быстрое ослабление передаваемого по линии сигнала.

³ Это выражение неприменимо на низких частотах телеграфа, где последовательное сопротивление является преимущественно резистивным, а в не реактивном случае совершенно неприменимо к кабельным цепям.

5. Ранние исследования Хевисайда

3 марта 1885 года *Bell Telephone Company* создала дочернюю компанию AT&T⁴ (*American Telephone and Telegraph Company*), в задачи которой входило оказание коммерческих услуг по осуществлению дальней телефонной связи. В том же году компания AT&T начала строить телефонные линии большой дальности. В 1892 году была проложена двухпроводная телефонная линия на расстояние 900 миль (1445 км), между Нью-Йорком и Чикаго (штат Иллинойс). Для уменьшения затухания передаваемого электрического сигнала в этой телефонной линии пришлось использовать достаточно толстый медный провод диаметром более 1/8" (3,2 мм) и весом около 900 фунтов (408 кг) на погонную милю (1,609 км) цепи! По-существу, это был тот предел длины телефонной линии, при котором возможен был телефонный разговор без искажений и использования в ней специальных устройств [17, 18].

Возникшая проблема напрямую была связана с искажениями звукового электрического сигнала в линии вследствие наличия распределенной индуктивности у проводников и распределенной емкости между проводниками. Что касается телеграфного сигнала, то он проходил по линии без проблем, так как имел относительно низкочастотный спектр. Спектр частот телефонного сигнала был относительно широкополосным и высокочастотным, в результате чего через несколько десятков километров собеседники не могли разобрать речь друг друга вследствие значительного затухания (ослабления) высокочастотных составляющих спектра.

Поиском возникшей проблемы передачи электрического сигнала без искажений по кабельной линии связи заинтересовался английский физик Оливер Хевисайд (*Oliver Heaviside*, 18.05.1850—03.02.1925), который в свое время, с 1870 по 1874 гг., проработал оператором-телеграфистом станции *Great Northern Telegraph Company* в городе Ньюкасле на северо-восточном побережье Великобритании, рис. 4. От этой станции был проложен телеграфный кабель в Данию. В этот период времени он принимал участие в экспериментах, которые проводил его брат, по двусторонней телеграфной связи, сначала в лабораторных условиях, затем — между Ньюкаслем и Сандерленд (город на побережье Северного моря в устье реки Уир (англ. *Wear*)).

Брат Оливера был инженером подразделения (*divisional engineer*) *British Post Office*, которое располагалось в Ньюкасле-на-Тайне. Его тетья, к слову, была замужем за сэром Чарльзом Уитстоном (*Sir Charles Wheatstone*), пионером электрической телеграфии. Все это сформировало научную атмосферу вокруг молодого Оливера и стимулировало его интерес к передаче электрических сигналов по проводам.

⁴ Компания AT&T 30 декабря 1899 года приобрела долги *Bell System* и превратилась из дочернего предприятия в ее владельца. Штаб-квартира AT&T переехала из Бостона в Нью-Йорк.

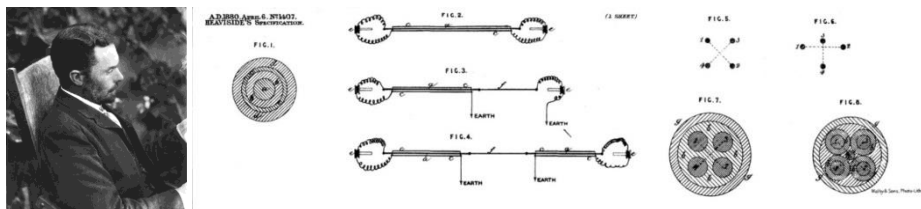


Рис. 4. Оливер Хевисайд и его патент GB1407 на коаксиальный кабель от 6 апреля 1880 г.

Fig. 4. Oliver Heaviside and his GB1407 coaxial cable patent dated April 6, 1880

В мае 1874 года Хевисайд в возрасте 24 лет уволился из кабельной компании, то ли из-за плохого здоровья, то ли неудовлетворенности от рутинной работы, а может просто из желания сосредоточиться на собственных исследованиях. Он вернулся в Лондон и стал жить со своими родителями и больше никогда постоянно не работал, а вместо этого сосредоточился на проблемах электричества. Его брат Артур оказывал финансовую поддержку и сотрудничал в проектах, связанных с его инженерной работой, но в течение следующего десятилетия Хевисайд работал почти в полной изоляции в свободной комнате своих родителей, самостоятельно раздвигая границы электрических знаний.

Занимаясь домашними исследованиями, он начал публиковать свои научные работы по затуханию и индуктивности в телеграфных линиях. В работе [19] Хевисайд отметил, что существующие кабели имеют серьезные проблемы из-за помех: «Когда несколько проводов проложены параллельно друг другу, либо подвешены, либо нет, любое изменение тока, протекающего в одном проводе, вызывает индукционные токи во всех остальных, и эффект может быть настолько большим, что серьезно мешает работе цепям телефонной связи, и, в меньшей степени, обычным телеграфным каналам». Решением Хевисайда стал коаксиальный кабель, внутренний проводник, окруженный изоляционным слоем, который затем был окружен проводящим экраном [19]: «Мои улучшения направлены на получение безупречной защиты и на то, чтобы сделать схему полностью независимой от любых внешних индуктивных воздействий. Для этой цели я использую два изолированных проводника для схемы и помещаю один из них внутрь другого; таким образом, один проводник может быть проводом, а другой — трубкой или оболочкой, которые также должны быть изолированы. Когда трубка и внутренний провод электрически соединены на обоих концах линии, как обычное сквозное устройство, то описанная таким образом схема полностью независима от других цепей, и любое количество таких цепей, каждая из которых содержит изолированную трубку и внутренние провода, могут быть проложены рядом без взаимных индуктивных помех и без помех со стороны других проводов, работающие обычным

образом». 6 апреля 1880 года Оливер Хевисайд получил британский патент № 1407 на улучшенную конструкцию коаксиального кабеля [19], рис. 4.

Оливер Хевисайд продолжал исследования в области передачи электрических сигналов по проводам. Он построил теорию передачи электрических сигналов в телеграфных линиях, которую затем обобщил на телефонные линии. Хевисайд это сделал независимо от английского физика Дж. Г. Пойнтинга (*John Henry Poynting*, 09.09.1852—30.03.1914) и русского ученого Николая Алексеевича Умова (23.01.1846—5.01.1915).

Хевисайд вывел так называемые «телеграфные уравнения» [20], которые описывают распространение электромагнитных волн по кабелю связи. Телеграфные уравнения являются следствием уравнений Максвелла. В уравнениях Максвелла, как известно, переменными являются напряженности электрического и магнитного полей, в случае же моделирования волн в линиях можно ввести интегральные характеристики в виде тока в проводах и напряжения между проводами. Как уравнения Максвелла, так и телеграфные уравнения описывают распространение волновых процессов в соответствующих средах. В первом случае — это свободное пространство, во втором — проводники линии передачи, но форма уравнений и их решение во многом сходны. Важно подчеркнуть, что уравнения Максвелла появились при решении задач фундаментальной физики, а телеграфные уравнения — это результат решения инженерной задачи прокладки и использования трансатлантического кабеля.

Хевисайд в качестве модели длинной линии рассмотрел цепь, включающую источник напряжения, двухпроводную линию и импеданс нагрузки Z_H (рис. 5а). Бесконечно малый участок линии протяженностью dx можно представить в виде эквивалентной электрической схемы, приведенной на рис. 5б. Двухпроводная линия обладает индуктивностью L_x , активным сопротивлением R_x , межпроводной емкостью C_x и проводимостью утечки через изоляцию G_x , рис. 5б. Индекс « x » указывает на то, что величины отнесены к единице длины линии, то есть представляют собой погонные параметры.

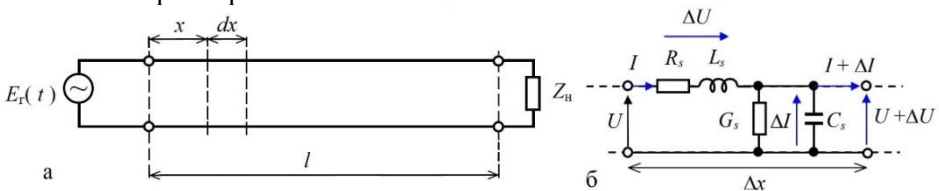


Рис. 5. Модель нагруженной длинной линии (а) и эквивалентная схема бесконечно малого отрезка длинной линии (б).

Fig. 5. Loaded long line model (a) and equivalent circuit of an infinitesimal segment of a long line (b)

Записав балансные уравнения, получим:

$$\begin{aligned}\frac{\partial U}{\partial x} &= -L_x \frac{\partial I}{\partial t} - IR_x, \\ \frac{\partial I}{\partial x} &= -C_x \frac{\partial U}{\partial t} - UG_x,\end{aligned}\tag{1}$$

где $U(x,t)$, $I(x,t)$ — напряжение и ток в телефонной линии.

Система (1) получила название телеграфных уравнений. Это название предложено французским физиком А. Пуанкаре в 1897 г. и на французском языке звучит как «*l'equation des telegraphistes*». Телеграфные уравнения в форме (1) являются математической моделью реальной линии, в которой происходит диссипация энергии на активных элементах R и G . Уравнения (1) являются базовыми для анализа распространения сигналов в телефонных линиях.

Из системы дифференциальных уравнений (1) Хевисайд получил точные аналитические решения, которые позволили исследовать технические проблемы, встречающиеся при практической эксплуатации проводных линий связи.

6. Условие Хевисайда

В 1886 году брат Оливера Хевисайда Артур, в то время ведущий инженер почтового отделения, экспериментировал с телефонными линиями, в которых приемники были расположены по мостовой схеме или параллельным цепям. К своему удивлению, он обнаружил, что добавление дополнительных телефонов к цепи на самом деле улучшило четкость передачи. Он обратился за объяснением к Оливеру, который вскоре показал, что утечка тока через каждый телефон снижает искажения, хотя и ослабляет сигнал.

Более глубоко изучив теорию цепей, Хевисайд также обнаружил, что добавление большей индуктивности в цепь, например, путем вставки катушек через равные промежутки вдоль кабеля передачи, позволяют уменьшить искажения еще больше. Он объяснил, что дополнительная индуктивность помогает переносить волны так же, как нагружение бельевой веревки птичьей дробью позволяет ей лучше передавать поперечные волны. Позже он пошутил, что его имя и индуктивная нагрузка были «связаны между собой естественным и провиденциальным образом. Вы утяжеляете линию в процессе нагружения» [21]. Предложенная индукционная нагрузка представляла собой относительно дешевый и простой способ улучшить телефонную передачу, и АТ&Т и другие компании позже использовали его с большим успехом.

В 1887 году Оливер Хевисайд показал, что коэффициент затухания α в кабельной линии связи будет минимальный при соблюдении условия

$$\frac{R_x}{L_x} = \frac{G_x}{C_x} \text{ или } R_x \cdot C_x = G_x \cdot L_x. \quad (2)$$

Потери энергии в линии связи, характеризующиеся коэффициентом затухания α , будут минимальны когда

$$\alpha_{min} = \sqrt{R_x \cdot G_x}. \quad (3)$$

Указанное оптимальное соотношение (2) всех четырех первичных электрических параметров кабеля носит название «условие Хевисайда» и верно при соблюдении минимального значения коэффициента затухания (3). Таким образом, выполнение этого условия Хевисайда (2) исключает искажения формы сигнала, поскольку все частотные составляющие сложного сигнала ослабляются в равной мере и перемещаются с одинаковой скоростью $v = 1/\sqrt{L \cdot C}$, которая равна фазовой скорости в идеальной линии. На приемном конце линии получается копия отправленного сигнала, уменьшенная по амплитуде в αL раз. Волновое сопротивление неискажающей линии совпадает с волновым сопротивлением идеальной линии без потерь.

Несогласованность линии и нагрузки приводит к появлению отраженных волн, число которых быстро увеличивается из-за многократных отражений от концов линии. Размножение и наложение переотраженных сигналов ведет к их хаотизации и создает шум, мешающий регистрации полезного сигнала. Именно несогласованность волнового сопротивления линии и передающей/принимающей аппаратуры создают помехи при передаче электрических сигналов. В связи с этим для построения передающей линии без искажений необходимо соблюсти условия Хевисайда (2).

В 1893 году Хевисайд сформулировал практический подход в реализации условий оптимального соотношения всех четырех первичных электрических параметров кабеля: «...Условие связи по проводной линии без искажений можно выполнить в случае существенного увеличения индуктивности линии» [20]. Для выполнения этого условия он предлагал включить в линию связи сосредоточенные катушки индуктивности на определенном и равном расстоянии друг от друга. Хевисайд отметил, что увеличение самоиндукции линий электропередачи должно оказаться полезным, однако, он не предоставил эмпирических доказательств и не определил, насколько большими должны быть катушки или каким должно быть расстояние между ними.

7. «Черный зверь» телефонных линий

Идея индуктивной загрузки изначально была встречена в штыки. Было известно, что вставка одной катушки с высокой индукцией в цепь была фатальной для всей сигнализации. Эта идея побудила Уильяма Приса (*William Henry Preece*, позже *Sir William*), главу почтовой телеграфной и телефонной системы Великобритании и влиятельную фигуру в британской электротехнике, объявить самоиндукцию «черным зверем» (*bête noire*), которого следует выследить и исключить из всех телефонных цепей [22]. Прис по опыту знал, как сильно один элемент самоиндукции может исказить телефонные сигналы, и ему казалось нелепым думать, что распространение этой «злой» индуктивности по линии каким-то образом окажет на нее благотворное влияние. Как и большинство людей, он не смог понять математику теории нагружения Хевисайда, но был уверен, что ее выводы должны быть неверными. Прис призвал почтовое отделение перейти с железных проводов на медные, что было дорогостоящим шагом, который он оправдывал в публичных заявлениях в 1886 и начале 1887 года, ссылаясь на необходимость уменьшения индуктивности.

Таким образом, братья Хевисайд вряд ли могли выбрать менее подходящий момент, чтобы призвать к добавлению индуктивности к телефонным линиям. В апреле 1887 года они завершили свою совместную статью на эту тему и приготовились отправить ее в журнал *Electrician* Общества инженеров телеграфа и электриков (*Society of Telegraph Engineers and of Electricians*). Однако, будучи сотрудником почтового отделения, Артур сначала должен был получить разрешение от своего начальника над инженерными должностями, а таковым являлся Прис, который немедленно объявил бумагу бесполезной и заблокировал ее. Артур вскоре согласился, но Оливер решительно этого не сделал. В течение лета 1887 года он посылал в *Electrician* едкие письма с нападка на «выдающегося ученого», как он называл Приса, но редактор журнала Чарльз Биггс (*Charles H. W. Biggs*), хотя и сочувствовал, но опасался иска о клевете и поэтому отказался их публиковать. Затем, в октябре, Биггс был внезапно отстранен от должности редактора *Electrician*, что, как он позже намекнул, было вызвано его поддержкой Хевисайда. Новый редактор вскоре отменил продолжительную серию статей Хевисайда, заявив, что он «не нашел никого, кто их читал» [23].

Хевисайд был в ярости. Он считал индуктивную загрузку одной из своих лучших идей и, безусловно, самой важной для практики. Запрет публикации по этой тематике был для него неприемлемым. В 1888 году Хевисайд писал, что это «стало серьезным поводом для меня в октябре прошлого года, когда я был вынужден принять некоторые очень решительные меры, а

я по-своему решительный человек» [24]. Это вызвало ожесточенную вражду между Присом и Хевисайдом, которая продлилась до конца их жизни.

8. Биметаллический телефонный кабель Дж. Стоуна

Теория О. Хевисайда, как было отмечено, не у всех специалистов в области телефонии получила понимание. Одним из сторонников этой теории был Джон Стоун (*John Stone Stone*, 24.09.1869—20.05.1943), научный сотрудник *Bell Telephone Company*. Джон Стоун привлек к себе внимание еще на Всемирной выставке в Париже (1889 г.), где помогал с монтажом экспонатов АТ&Т. Он с блеском выполнял обязанности инженера и обладал прекрасными качествами дипломата. Это сделало его привлекательным человеком для *Bell Co*. Благодаря этому, он после завершения учебы в колледже *Johns Hopkins University* в 1890 году, был приглашен в качестве инженера экспериментального отдела Лаборатории исследований и разработок (*Research and Development Laboratory, RDL*) *Bell Telephone Company* в Бостоне.

Стоун был знаком с Хевисайдом и переписывался с ним до конца 1891 года. Хевисайд не только отвечал на его письма, но и оказывал запрашиваемую помощь по вопросам, относящимся к разработке междугородних телефонных линий.

Стоун попытался применить идеи Хевисайда к реальным телефонным линиям. Для этого он разработал практические подходы к конструированию телефонного кабеля, которые позволили уменьшить такие эффекты, как «затухание», «искажение» и «отражение». Этим эффектам подвержены переменные токи при передаче по электрическим проводникам, имеющим относительно высокую электростатическую емкость, а также при передаче в неоднородных цепях [25]. Эффекты затухания и искажения он связал с распределенной емкостью электрического проводника воздушной линии, заземленного на одном конце через генератор переменных токов и заземленного на другом конце через устройство измерения тока. Модель цепи распределенной емкости была представлена в виде большого количества небольших конденсаторов постоянного тока с бесконечно малой емкостью, включенных между линейным проводом l и землей, рис. 6.

Стоун предположил, что такая схема обладает конечной распределенной емкостью. Если теперь включить генератор D на выработку высокочастотного переменного тока, то возникший ток потечет по линии l , причем часть его будет отводиться в каждой ответвленной цепи dC , поскольку конденсаторы не являются преградой для переменного тока. Однако, эти конденсаторы оказывают сопротивление таким токам, которое обратно пропорционально емкости конденсатора и скорости изменения тока.

Таким образом, из-за наличия бесчисленных небольших шунтов очень значительная часть тока, вырабатываемого генератором D , теряется в линейном проводе l еще до того, как достигнет измерителя тока M на дальнем конце цепи. В связи с этим регистрируемый ток меньше, чем тот, который был выработан генератором D . Причиной этого явилось «затухание» электрического сигнала.

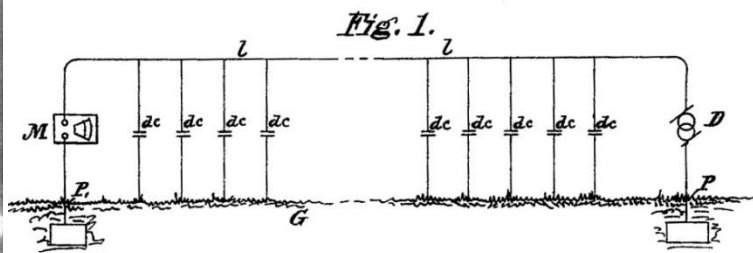


Рис. 6. Джон Стоун (1896 г.). Схема воздушной телефонной линии с распределенной емкостью [25].

Fig. 6. John Stone (1896). Diagram of an overhead telephone line with distributed capacity [25]

Стоун сделал вывод о том, что вредные эффекты от чрезмерной распределенной электростатической емкости вдоль цепи могут быть значительно уменьшены путем добавления к ней подходящей распределенной индуктивности или самоиндукции. Он высказал предположение, что к увеличению индуктивности может привести и использование различных форм составного провода, в котором медный проводник снабжен железным сердечником или железной оболочкой. Здесь следует иметь в виду, что затухание — это комбинированный результат воздействия емкости и сопротивления, и ни один из них не способен произвести его по отдельности.

Для теоретического исследования зависимости коэффициента k , определяющего затухание последовательности простых гармонических волн с частотой $n = \frac{p}{2\pi}$ (p — период колебаний), распространяющихся по проводнику с сопротивлением R , емкостью C и индуктивностью L на единицу длины, Стоун использовал следующую формулу

$$k = xp \left[\frac{1}{2} CL \left\{ \left(\frac{R^2}{L^2 p^2} + 1 \right)^{1/2} \right\} - 1 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где x — расстояние, которое прошла цепочка волн.

Из выражения (4) следует, что когда затухание является чрезмерным, то для его понижения следует уменьшить отношение $\frac{R}{Lp}$. Другими словами,

для данной частоты тока, емкости и сопротивления цепи, затухание может быть уменьшено за счет увеличения индуктивности. Однако на практике нет необходимости или нежелательно уменьшать затухание до нуля. Стоун обнаружил, что телефонная линия с сопротивлением 2,640 кОм и распределенной емкостью 4,11 мкФ имеет коэффициент затухания при индуктивности 3,75 Гн в 2 раза меньше, чем при индуктивности 0,915 Гн.

В работе [25] кроме теоретического рассмотрения проблемы уменьшения вредных эффектов распределенной емкости для воздушной линии и кабеля приводятся еще практические методы для их устранения.

С целью увеличения индуктивности провода предлагается окружить его цилиндром из парамагнитного материала, например, железа. Для составной проволоки необходимо, чтобы этот железный цилиндр прижимался через изолирующее покрытие или пленку с относительно высоким сопротивлением к медному сердечнику. Сопротивление покрытия или пленки из-за продольных неоднородностей оболочки не обязательно должно быть большим. Фактически, если продольные неоднородности встречаются достаточно часто, то можно ограничиться простым покрытием окислами металлов. Кроме того, чтобы предотвратить чрезмерное увеличение эффективной электростатической емкости цепи металлической оболочкой, железный цилиндр изготавливается прерывистым в продольном направлении.

Дж. Стоун 10 сентября 1896 года подал заявку на получение патента на изобретение описанной выше конструкции биметаллического железомедного кабеля (рис. 7). Патент он получил на следующий год [25].

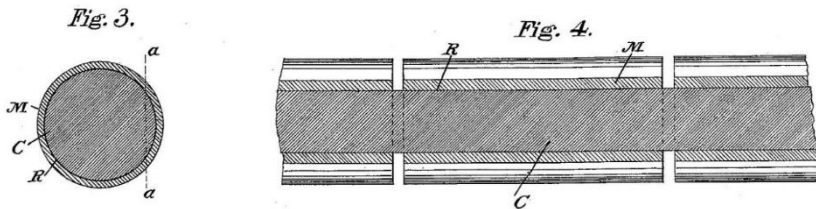


Рис. 7. Конструкция биметаллического железомедного кабеля Дж. Стоуна (С — центральная проводящая сердцевина, М — парамагнитная оболочка, R — прокладка с высоким сопротивлением). Рисунок из патента US578275 с приоритетом от 10 сентября 1896 г. [25].

Fig. 7. The design of J. Stone's bimetalllic iron-copper cable (C is the central conductive core, M is the paramagnetic sheath, R is the high-resistance gasket). Drawing from patent US578275 with priority dated September 10, 1896 [25]

В октябре 1897 года Джон Стоун привлек к своим исследованиям, вернувшегося из Европы Дж. Кэмпбелла (*George Ashley Campbell*, 27.11.1870—10.11.1954) (в качестве инженера-исследователя *RDL Bell Telephone Co.*, позднее AT&T в Бостоне [26]). До этого Дж. Кэмпбелл получил в

1891 году степень бакалавра в области инженерии в Массачусетском технологическом институте, после изучал физику и математику в Гарвардском университете⁵, где в 1893 году получил степень магистра и был награжден стипендией, которая позволила ему в течении 3 лет продолжить постдипломное образование в Европе⁶.

Джон Стоун предложил руководству компании продолжить исследования по изучению возможностей улучшения качества телефонной линии с использованием биметаллического кабеля (железо — медь), чтобы определить, в какой мере биметаллическая линия обеспечивает повышение качества передачи сигнала и отвечает условиям теории Хевисайда. Этими работами, по замыслу Стоуна, должен был заниматься Кэмпбелл. Однако, не получив поддержки в реализации своей идеи, Стоун покинул компанию *Bell* в 1899 году.

Ответственный за исследования и разработки, заведующий механическим отделом (*Director of the Mechanical Department*) компании, Хаммонд Хейс (*Hammond Vinton Hayes*, 28.08.1860—22.03.1947) дал указания Кэмпбеллу выбрать исследования в том направлении, которые покажутся ему многообещающими. В годовом отчете механического отдела от 31 декабря 1898 года Хейс написал: «С помощью г-на Кэмпбелла я с уверенностью ожидаю, что в наступающем году я смогу сообщить о прогрессе в проектировании кабелей большой протяженности».

Из-за относительно высокой стоимости изготовления биметаллических длинных линий и ограниченного бюджета проекта, Кэмпбелл, знакомый с работами Рэля и Хевисайда, решил применить менее дорогую искусственную линию. Такая линия может быть построена из ряда дискретных конденсаторов и катушек индуктивности в итеративной схеме (англ. *iteration*, «повторение»), и для этого не потребуется лаборатория большого размера. Его идея состояла в том, чтобы установить дискретные катушки индуктивности или «нагрузочные катушки» (англ. *loading coils*) с периодическими интервалами вдоль фактической телефонной линии или кабеля. Он понял, что загруженная линия должна себя вести как обычная линия, но при наличии более высокой самоиндукции в требуемом диапазоне частот. Это должно было привести к большей эффективности передачи, чем при возможном достижении этого с помощью биметаллической линии.

⁵ Гарвардский университет (англ. *Harvard University*) — один из самых известных университетов США и всего мира, старейший вуз США. Находится в городе Кембридж (англ. *Cambridge*, Бостонская городская агломерация, штат Массачусетс). Город Кембридж отделяется рекой Чарльз от Бостона.

⁶ Дж. Кэмпбелл пробыл один год в Геттингене в Германии, изучая современную математику под руководством Феликса Клейна. Затем он провел год в Вене (Австрия), где изучал механику и электрическую теорию под руководством Людвиг Больцмана. Потом отправился в Париж, где посещал лекции Анри Пуанкаре. То, что эти трое известных ученых приняли Кэмпбелла в качестве студента, само по себе свидетельствует о его способностях.

Конструкция биметаллического телефонного кабеля Дж. Стоуна не получила практического использования в то время. Однако использованная в этом кабеле непрерывная форма загрузки была практически реализована в начале 20 века, правда, несколько в другом виде. Примером может служить кабель датского телеграфного инженера Карла Крарупа⁷ (*Carl Emil Krarup*, 12.10.1872—29/30.12.1909).

9. Уравнение Кэмпбелла

По просьбе Кэмпбелла Хэйс распорядился, чтобы три барабана кабеля, который ранее использовался для тестирования в Питсбурге (*Pittsburgh*), были доставлены в лабораторию в Бостоне, чтобы проверить нагрузку на стандартном коммерческом телефонном кабеле. Кэмпбелл подготовил спецификации для катушек, которые предполагалось использовать, и сделал заказ на 400 катушек у местной производственной компании.

Во время ожидания доставки катушек (июнь 1899 г.) Кэмпбелл решил определить основные параметры однородной длинной телефонной линии с нагрузочными катушками *A* и *B* с полным сопротивлением *Z* и расстоянием (интервалом) между ними равным *d*, рис. 8. Расстояние *d* измеряется от центра одной нагрузочной катушки *A* до центра следующей катушки *B*, а импеданс *Z* каждой катушки представляет собой сумму двух частей на передачу и прием соответственно.

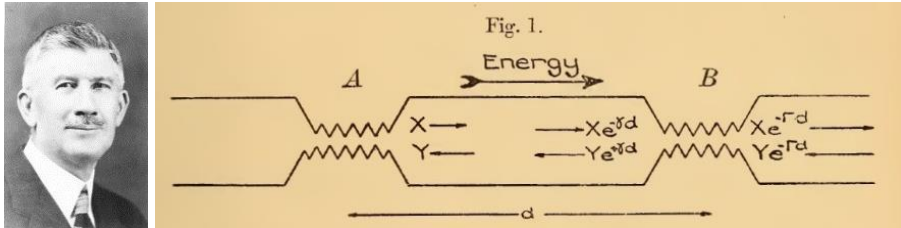


Рис. 8. Джордж Эшли Кэмпбелл (17 июля 1935 г.). Модельное представление части длинной линии с катушками индуктивности [27].

Fig. 8. George Ashley Campbell (July 17, 1935).
 Model performance of part of a long line with inductors [27]

Если линия очень длинная, то можно предположить, что ее средний коэффициент распространения такой же, как и средний коэффициент распространения одного единственного участка длиной *d*, состоящего из двух

⁷ Кабель *Krarup* состоял из железных проводов, плотно намотанных вокруг медных проводящих жил, и именно железо явилось источником дополнительной индуктивности. Однако величина его индуктивности не позволила ему полностью соответствовать условию Хевисайда. По стоимости этот кабель дороже кабелей с дискретными нагрузочными катушками.

катушек половинной нагрузки на каждом конце и длины линии между ними. Длина этого участка линии всегда будет очень большой по сравнению с длиной загрузочной катушки. Кроме этого, он предположил, что в самой нагрузочной катушке ток одинаков во всех частях составляющего ее провода и, следовательно, такой же в центре и на конце. В обоих случаях предполагается, что сама линия имеет такое же начальное сопротивление передающего конца Z_0 .

Исходя из представленных рассуждений Кэмпбелл вывел нелинейное уравнение для нагруженной длиной линии, которое стало известно, как «уравнение Кэмпбелла» (*Campbell's equation*) [27]:

$$\text{Cosh}(P' \cdot d) = \text{Cosh}(P \cdot d) + \frac{Z}{2 \cdot Z_0} \text{Sinh}(P \cdot d), \quad (5)$$

где d — расстояние между центрами катушек, Z и Z_0 — импеданс нагруженной и ненагруженной линии, P и P' — постоянные (коэффициенты) распространения ненагруженной и нагруженной линий.

Уравнение (5) Кэмпбелл привел в статье, опубликованной в журнале *Philosophical Magazine* [27]. Вывод уравнения основывался на рассмотрении коэффициентов отражения и передачи каждой катушки. В статье бросается в глаза некоторое несоответствие между приведенными буквенными обозначениями в формулах и текстом, а также имеются и некоторые другие погрешности, например, введены обозначения без всякого пояснения, что затрудняет ее чтение. На это обратил внимание еще ранее А. Флеминг [28]. В статье Кэмпбелла, несмотря на опечатки, получен верный результат (формула (5)).

Получить решение уравнения (5) в конечном виде не удалось, так как оно относилось к типу трансцендентных уравнений. В связи с этим Кэмпбелл представил решение уравнения в виде графиков, из которых можно было найти оптимальные значения катушек индуктивности и расстояние между ними. Кэмпбелл и его помощник, Эдвин Х. Колпиттс (*Edwin H. Colpitts*) использовали полученный результат для численных расчетов в диапазоне предполагаемых условий нагружения на стандартных кабелях.

По словам Кэмпбелла стимулирование его успешных усилий по получению общего уравнения для нагруженной телефонной линии, связано со статьей Чарльза Годфри (*Charles Godfrey*) [28], касающейся распространения волн вдоль вибрирующей струны с периодической нагрузкой в виде небольших грузов, которая была опубликована в 1898 году [29].

Отметим, что более ясный вывод формулы (5) и с других позиций был дан А. Флемингом [30], правда через 12 лет после результата, полученного Кэмпбеллом. В 1950 году А. Альберт (*A. L. Albert*) привел доволь-

но несложный вывод формулы (5) на основе метода замещения [31]. Далее приведем вывод этой формулы А. Альбертом.

На практике нагрузочные катушки с импедансом $Z_L/2$ устанавливаются последовательно с каждым проводником кабеля на расстоянии S миль друг от друга, как показано на рис. 9. Часть этой нагруженной цепи может быть представлена сетью на рис. 10а, где часть AB, CD — эквивалентное Т-образное сечение отрезка кабеля S (без нагрузки), имеющее характеристический импеданс Z_0 и постоянную распространения на милю γ .

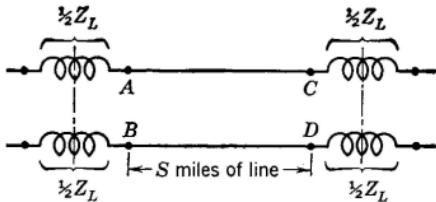


Рис. 9. Метод вставки нагрузочных катушек в кабельную пару. Катушки в каждой точке нагрузки имеют индуктивную связь.

Fig. 9. Method of inserting loading coils in a cable pair. The coils at each loading point are inductively coupled

Из рисунка 10а видно, что характеристики кабеля с окончательной нагрузкой представляют собой комбинацию участков $A-B, C-D$, имеющих распределенные константы, и катушек с сосредоточенной нагрузкой $Z_L/2$ на каждом конце. Нагруженный кабель можно рассматривать как постоянную распространения γ_L и характеристическое сопротивление, соответствующими эквивалентному однородному кабелю, схематически представленными Т-образным сечением на рис. 10б.

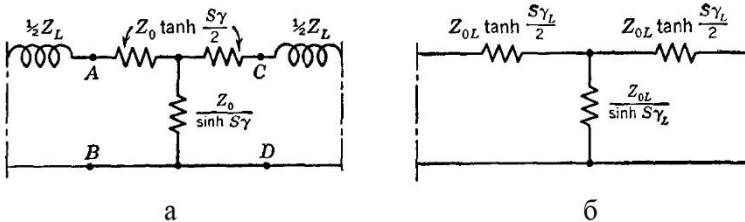


Рис. 10. Сетевой эквивалент рис. 9 (слева), Т-образное сечение однородной линии (справа) эквивалентной нагруженной схеме на рис. 9 и 10а.

Fig. 10. Network equivalent to Fig. 9 (left), the T section of a uniform line (right) that is equivalent to the loaded circuit of Figs. 9 and 10a

Добавление катушек нагрузки в схему не приводит к заметному изменению шунтирующих путей на рис. 10а и 10б. Следовательно, можно записать, что

$$\frac{Z_0}{\sinh S\gamma} = \frac{Z_{0L}}{\sinh S\gamma_L}, \text{ и } Z_{0L} = Z_0 \frac{\sinh S\gamma_L}{\sinh S\gamma}. \quad (6)$$

Приняв во внимание сетевой эквивалент (рис. 9), запишем

$$\frac{1}{2}Z_L + Z_0 \tanh \frac{S\gamma}{2} = Z_{0L} \tanh \frac{S\gamma_L}{2}. \quad (7)$$

Тогда

$$\tanh \frac{S\gamma_L}{2} = \frac{Z_L}{2Z_{0L}} + \frac{Z_0}{Z_{0L}} \tanh \frac{S\gamma}{2}. \quad (8)$$

Подставим выражение Z_{0L} из (6) в уравнение (8) получим после преобразований

$$\cosh S\gamma_L = \cosh S\gamma + \frac{Z_L}{2Z_0} \sinh S\gamma. \quad (9)$$

Выражение (9) и есть уравнение Кэмпбелла для нагруженного кабеля с коэффициентом распространения γ_L в терминах величин ненагруженного кабеля и импеданса нагрузочных катушек.

10. Загрузочные катушки Кэмпбелла

В последние дни 19-го века Дж. Кэмпбелл изготовил необходимые индуктивные элементы. Это были первые «нагрузочные катушки» пригодные для практических целей, рис. 11.

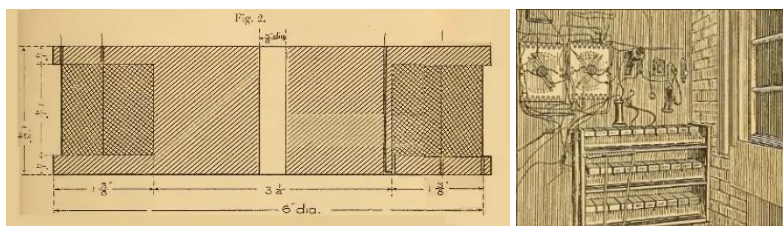


Рис. 11. Конструкция нагрузочной катушки (слева). 1899 г. Внутренний вид приемной телефонной станции с 30 коробками нагрузочных катушек на полках (справа) [27].

Fig. 11. Load coil design (left). 1899 Interior view of a receiving telephone exchange with 30 boxes of Loading Coils on the shelves (right) [27]

Для загрузки тестируемого кабеля было изготовлено 300 катушек, которые стали известны как катушки Т-14. Поперечное сечение этих нагрузочных катушек показано на рис. 11. На деревянную катушку наматывалось две обмотки. Первичная обмотка имела 578 витков одинарного провода № 20, покрытого хлопком, а вторичная обмотка — 465 витков одиночного провода, также покрытого хлопком. Количество витков было подобрано таким образом, чтобы обеспечить одинаковую индуктивность первичной и вторичной обмоток, и примерно одинаковое сопротивление.

Кабельная цепь состояла из 300 последовательно соединенных отрезков, между которыми была включена катушка T-14. Ее первичная обмотка находилась в проводе одной пары, а вторичная — в проводе другой пары. Каждая катушка добавляла к цепи около 0,11 Гн и 12 Ом. Для обеспечения надежности теста необходимо было разместить нагрузочные катушки таким образом, чтобы взаимная индукция была незначительной. Соответственно, они были распределены по всему доступному пространству, и тесты показали, что эффект взаимной индукции между катушками был весьма незначительным, рис. 9.

Методика проведения испытания была следующей. Кабель был подключен на передачу и прием без катушек нагрузки, также был подключен без катушек нагрузки и искусственный участок. После этого вся эта схема сравнивалась со стандартом кабеля. Было обнаружено, что весь кабель и искусственный участок были эквивалентны 46 милям стандартного кабеля, а более короткие длины были эквивалентны соответствующим длинам стандартного кабеля. Затем катушки были введены в кабельную цепь и в искусственную секцию, образуя кабельную цепь длиной 46 миль с равномерно распределенными 400 нагрузочными катушками.

Передача была значительно улучшена и признана эквивалентной передаче на 23 мили кабельного стандарта, и, кроме того, произношение было более четким и ясным. В дополнение к этому сопутствующий тон на передающем конце был уменьшен так, что стал едва заметным. Это произошло в результате загрузки, которая привела к увеличению тока на приемном конце при одновременном уменьшении тока на передающем конце. Испытания проводились на разной длине нагруженного кабеля.

Кэмпбелл подготовил материалы для своей основной патентной заявки от 19 июля 1899 года. Тем не менее, Хейс решил дождаться результатов экспериментов для кабеля *Pittsburgh*, перед тем как обратиться в компанию патентного поверенного.

11. Испытания телефонного кабеля с катушками Кэмпбелла

Первые испытания телефонного кабеля с нагрузочными катушками T-14 были осуществлены Кэмпбеллом и Эдвином Х. Колпитсом 6 сентября 1899 года в Бостоне на кабеле длиной 46 миль [32]. Во время экспериментов качество речи на длине 46 миль с нагрузкой было столь же хорошее, как и на линии длиной 23 мили без нагрузки. Расстояние между катушками было таким, чтобы теоретическая частота среза составляла 11 кГц. Такая высокая отсечка была выбрана для обеспечения передачи всех необходимых обертонов голоса. Перестановка катушек на лаборатор-

ном кабеле позволила протестировать нижние отсечные значения в качестве шага к определению минимальных стандартов отсечки для удовлетворительной передачи.

Результаты испытаний подтвердили теоретические предпосылки Кэмпбелла и впервые продемонстрировали, что правильное использование индуктивной нагрузки может значительно увеличить расстояние телефонной связи, не требуя более дорогих и большего диаметра проводников.

На основании полученных результатов испытаний в Бостоне между районами Ямайкой Плейн (*Jamaica Plains*) и Вест Ньютоном (*West Newton*) была разработана кабельная линия с расчетной отсечкой 3,5 кГц. Эта первая коммерческая телефонная линия с нагрузочными катушками была построена под руководством Кэмпбелла и введена в практическую эксплуатацию 18 мая 1900 года.

Дальнейшие испытания привели к планированию отсечки около 2,2 кГц на кабеле Нью-Йорк — Ньюарк (*New York — Newark*). Последующие установки кабельной нагрузки были спроектированы так, чтобы иметь отсечку примерно на 2,3 кГц (стандарт, который позже, в 1904 году, был принят для нагрузки с индуктивными элементами).

Отчет, представленный по завершению экспериментов в январе 1900 года показал, что компания *Bell* может сэкономить около \$700000, используя нагрузку на некоторых новых телефонных линиях, которые запланированы в Нью-Йорке и Нью-Джерси.

Летом и осенью 1900 года был проведен расширенный эксперимент по загрузке простыми соленоидными⁸ катушками междугородной коммерческой телефонной сети с открытым проводом из 12 проводников калибра N.B.S. между Бедфордом (*Bedford*), штат Нью-Йорк, и Браштоном (*Brushton*), штат Пенсильвания, на расстоянии приблизительно 670 миль (1080 км). Эта линия с нагрузочными катушками имела отсечку 3,5 кГц. Этот эксперимент был успешным, показав заметное улучшение телефонной передачи из-за нагрузки, но используемые катушки были несовершенной конструкции, и поэтому улучшение передачи было не таким значительным, как это должно было быть. Таким образом, результаты этого эксперимента показали важность проблемы выбора конструкции нагрузочной катушки.

Для коммерческих телефонных линий были выбраны конструкции нагрузочных катушек тороидального типа. Работа над этими катушками началась в августе 1899 года. Использование катушек этого типа планировалось ранее, но оно сдерживалось в основном из-за трудностей получе-

⁸ Соленоиды — это катушки индуктивности, наматываемые проводником на цилиндрический каркас, которые могут быть как однослойными, так и многослойными.

ния подходящего материала для сердечника. Только в марте 1901 года была изготовлена первая подходящая катушка тороидального типа с сердечником из тонкой железной проволоки, известная как T-300. Эта катушка имела индуктивность 0,25 Гн, а общее эффективное сопротивление на частоте 1 кГц составляло чуть больше 5 Ом, примерно половина из которых приходится на потери в виде вихревых токов в железном сердечнике.

После того, как конструкция катушки была принята, все еще оставалось много практических проблем, связанных с ее промышленным производством и использованием, таких как получение необходимых материалов, обеспечение средств для тестирования катушек на заводе, сборка и упаковка катушек для установки на полюсные линии, защита их от утечки и молнии, контроль перекрестных помех и т. д.

В апреле 1901 года у *Western Electric Company* в Нью-Йорке был размещен заказ на несколько сотен катушек T-300, но из-за трудностей, возникших при коммерческом производстве, только в октябре 1901 года было произведено достаточное количество катушек для загрузки одной линии Нью-Йорк — Чикаго. Две другие схемы Нью-Йорк — Чикаго были загружены электромагнитной катушкой с воздушным сердечником, известной как T-350. Основными трудностями при промышленном производстве катушки T-300 были [32, р. 63]:

—Изоляция отдельных железных проводов № 38 В.& S. сердечника.

—Изоляция отдельных прядей медной обмотки.

—Измерение потерь энергии в завершенных катушках или сердечниках.

—Ограничение потерь до допустимых значений.

Улучшенная телефонная передача по загруженным цепям № 8 В.W.G. из Нью-Йорка в Чикаго сначала вызвала большой восторг, но через несколько месяцев начали поступать жалобы на то, что эффективность передачи, особенно в сырую погоду, очень низкая. Постепенно выяснилось, что необходимо решить три важные проблемы [32, р. 63]:

—Как эффективно защитить катушку от поражения молнией?

—Как изолировать катушки и линейные провода, чтобы уменьшить утечку в цепи?

—Как согласовать систему передачи полюсной линии и местоположения нагрузочной катушки, чтобы уменьшить перекрестные помехи?

Решение этих трех проблем происходило в течение следующих шести лет, что совпало с широким применением коммерческой нагрузки к цепям с разомкнутыми проводами, особенно № 12.

В начале 1902 года активно разрабатывалась конструкция нагрузочной катушки для кабелей, и благодаря опыту, накопленному при проекти-

ровании загрузочной катушки с открытым проводом, она оказалась относительно простой. К сентябрю 1902 года кабель между Кортланд-стрит, Нью-Йорком (*Cortlandt Street, New York*) и Ньюарком (*Newark*) был загружен новой тороидной катушкой, известной как T-420. Испытания с этой катушкой показали, что улучшение передачи полностью соответствует ожидавшимся результатам.

На рис. 12 представлены образцы загрузочных катушек и металлический корпус (футляр) с загрузочной катушкой, которые были приняты для эксплуатации в 1904 году [33].



Рис. 12. Образцы загрузочных катушек. Футляр с загрузочной катушкой. 1904 г. [32].

Fig.12. Examples of Loading Coils. A Loading Coil Pot. 1904 [32]

12. Патент Кэмпбелла на конструкцию нагрузочных катушек

Только в марте 1900 года Кэмпбелл подал патентную заявку на использование катушек индуктивности в телефонных линиях. Задержка была связана отчасти с тем, что патентному поверенному компании было трудно понять теоретическую часть заявки. Адвокат, ко всему прочему, настаивал на том, что приложение не должно содержать графиков и уравнений. Из предлагаемой патентной заявки Кэмпбелла были удалены все таблицы и графики, а также расчеты, детализирующие точные значения индуктивностей, которые могли потребоваться перед ее подачей.

Некачественное оформление патентной заявки ослабило позиции Кэмпбелла и стало фатальным в отстаивании своего приоритета в изобретении способа уменьшения затухания за счет размещения индуктивных элементов (нагрузочных катушек) с известными значениями, которые устанавливались вдоль телефонной линии на теоретически определенных интервалах между ними.

В 1900 году Дж. Кэмпбелл получил патент Великобритании на конструкцию нагрузочных катушек и схему их включения в телефонную линию, рис. 13. Патент назывался: «Улучшение электрических цепей для передачи энергии с помощью переменных токов» (англ. *Improvements in*

and connected with Electric Circuits for the Transmission of Energy by Variable Currents) [34].

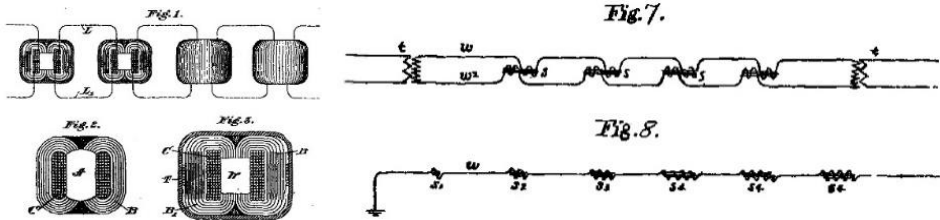


Рис. 13. Устройство нагрузочных катушек конструкции Дж. Кэмпбелла и схема их включения в телефонную линию. Патент GB190016290A с приоритетом от 15 сентября 1900 г. [34].

Fig. 13. The device of load coils designed by J. Campbell and the scheme of their connection to the telephone line. Patent GB190016290A with priority of September 15, 1900 [34]

В патенте GB190016290A отмечается предназначение изобретения, сделанного Дж. Кэмпбеллом, следующим образом [34]: «Настоящее изобретение относится к конструкции катушек самоиндукции применительно к их использованию в нагруженных линиях или линиях, индуктивность которых увеличивают путем введения в них катушек индуктивности, а также к сочетанию таких катушек с электрической цепью с наибольшим преимуществом схемы для достижения поставленной цели. Я использовал изобретение в практике телефонии, поскольку такая практика представляет собой серьезное и наиболее поучительное применение изобретения...».

В 1903 году была опубликована первая его научная статья по загрузке телефонных линий индуктивными катушками [27]. Материалы проведенных научных исследований по повышению эффективности междугородных телефонных линий за счет установки в них нагрузочных индуктивных элементов, стали частью его докторской диссертации (*PhD*), которую Джордж Кэмпбелл защитил в Гарварде в 1901 году [35].

13. Заключение

Переход от однопроводной цепи к двухпроводной или металлической телефонной линии явился первым важным шагом на пути продвижения телефонной связи на большие расстояния. Работы Барретта по предотвращению перекрестных помех между параллельными телефонными столбовыми линиями с помощью технологии перекрещивания воздушных проводов позволили в некоторой степени повысить качество связи. Однако названные технологии не позволяли уменьшить ослабление телефонного сигнала на линиях дальней связи, что в значительной мере сдерживало развитие междугородней телефонии.

Технологии по снижению затухания сигнала начали интенсивно разрабатываться учеными только после того как Хевисайд предложил увеличить самоиндукцию линий электропередач исходя из условия оптимального соотношения всех четырех первичных электрических параметров кабеля. До практической реализации идеи Хевисайда довел Дж. Кэмпбелл, сотрудник компании АТ&Т. Для этого он разработал теорию и согласно ей рассчитал параметры дискретных катушек индуктивности, которые установил с вычисленным одним постоянным интервалом в разрыв проводов телефонной линии, что привело к повышению эффективности передачи. Эту технологию Дж. Кэмпбелл защитил английским патентом GB190016290А.

Рассмотренной проблемой занимались и другие ученые, в частности, Майкл Пупин, который составил конкуренцию Дж. Кэмпбеллу. Компания АТ&Т благодаря продуманной политике руководства получила монопольные права на технологию нагрузочных катушек до 1917 года, после того как она выкупила патенты Пупина. Это принесло АТ&Т ощутимые финансовые выгоды. Внедрение рассмотренных телефонных технологий на основе пассивных электрических компонентов увеличило дальность телефонной связи с 80 км (1881 г.) до 1445 км (1901 г.), то есть почти в 18 раз.

Список литературы

1. Пестриков В. М. Ранние работы Ли де Фореста по беспроводной телеграфии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 456—507.
2. Пестриков В. М. Генезис аудиона Ли де Фореста // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 1. С. 42—79.
3. Пестриков В. М. Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 190—226.
4. Пестриков В. М. На пути к вакуумному диоду // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 1. С. 98—134.
5. Пестриков В. М. Продвижение Ли де Форестом инноваций беспроводного телефона на рынке услуг // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. Т. 4, № 2. С. 107—146.
6. Пестриков В. М. Изобретение электронного лампового усилителя звуковой частоты // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 4. С. 433—455.
7. Barrett J. A. Electric circuit. Patent US392775A. Patented Nov. 13, 1888. Application filed May 9, 1888.
8. The History of Engineering and Science in the Bell System. The Early Years (1875–1925). Vol. I. By M. D. Fagen, ed. New York: Bell Telephone Laboratories, Inc. 1975. P. 206.
9. Carty J. J. Inductive disturbances in telephone circuits // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Mar. 17, 1891. Vol. VIII. P. 100—122.
10. Carty J. J. Telephone and telegraph circuit. Patent US348512A. Patented Aug. 31, 1886. Application filed February 2, 1886.
11. Rosebrugh A. M. & T. R. Multiple telephone. Patent US417511A. Patented Dec. 17, 1889. Application filed November 27, 1886.

12. Rosebrugh A. M. Duplex telephony // *Electrician*. March 4th, 1887. Vol. 18. P. 378—380.
13. Rosebrugh A. M. & T. R. British Patent 4231, 1886. Patent date 15th Aug. 1885.
14. The Rosebrugh Duplex Telephone System // *The Electrical World*. January 4, 1890. Vol. 15, no. 1. P. 2.
15. Rosebrugh A. M. Duplex Telephony in Actual Use // *The Electrical World*. May 10, 1890. Vol. 15, no. 19. P. 312—313.
16. Rosebrugh A. M.: British Patent 10404 of 1886 (Patent date Aug. 13th, 1886).
17. Пестриков В. М., Пестрикова М. В. Борьба за дальность телефонной связи на рубеже XIX—XX веков. В сб. : Сети и линии связи: прошлое, настоящее, будущее : материалы Девярых научных чтений памяти А. С. Попова, посвященных Дню радио — празднику работников всех отраслей связи (6 мая 2016 г.). — СПб. : Свое издательство, 2016. С.53—59.
18. Pestrikov V. M. Yermolov P. P.. The struggle for the range of telephone communication before the invention of the audion Lee de Forest // *ITM Web of Conferences*. 2019. Т 30, № 16002. URL: https://www.itm-conferences.org/articles/itmconf/pdf/2019/07/itmconf_crimico2019_16002.pdf (дата обращения: 30.11.2021).
19. Heaviside Oliver. Electrical Conductor. Patent GB1407. April 6th, 1880.
20. Heaviside O. Electromagnetic theory. London. The Electrician Company. Vol.1. 1893. 466 p.
21. O. Heaviside to O. Lodge, 18 December 1918. Quoted in Hunt B. J. *The Maxwellians*. NY : Cornell U. Press, Ithaca, 1991. P. 135.
22. Hunt Bruce J. Oliver Heaviside : A first-rate oddity // *Physics Today*. 2012. No. 11. P. 48—54.
23. Mahon B. Oliver Heaviside : Maverick Mastermind of Electricity. London : Institution of Engineering and Technology, 2009. P. 79.
24. O. Heaviside to O. Lodge. 24 September 1888, quoted in Hunt B. J. *The Maxwellians*. NY : Cornell U. Press, Ithaca. 1991. P. 143.
25. Stone J. S. Electric circuit. Patent US578275, dated March 2, 1897. Application filed September 10, 1896.
26. Jewett F. B. Dr. George A. Campbell // *The Bell System Technical Journal*, October 1935. Vol. 14, no. 4. P. 553—557.
27. Campbell G. A. On loaded lines in telephonic transmission // *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. March 1903. Series 6. Vol. 5(27). P. 313—330.
28. Godfrey C. Discontinuities of wave-motion along a periodically loaded string // *Philosophical Magazine*. Series 5. 1898. Vol. 45, no. 3. P. 356—363.
29. *The Collected Papers of George Ashley Campbell*. New York : American Telephone and Telegraph Company, 1937. P. 17.
30. Fleming J. A. *The propagation of electric currents in telephone and telegraph conductors*. Second edition revised. London : Constable & Company Ltd., 1912. P. 129.
31. Albert A. L. *Electrical Communication*. New York : Wiley, 1950. P. 242—243.
32. Colpitts E. H. *The Collected Papers of George Ashley Campbell*. Introduction // *Bell Telephone Quarterly*. January 1938. Vol. 17, no. 1. P. 58—70.
33. Rhodes F. L. Permalloy : The Latest Step in the Evolution of the Loading Coil // *Bell Telephone Quarterly*. October 1927. Vol. 6. no. 4. P. 238—246.
34. Campbell G. A. Improvements in and connected with Electric Circuits for the Transmission of Energy by Variable Currents. Patent GB190016290A. Accepted, Nov. 17th, 1900. Date of Application Sept. 15th, 1900.
35. Campbell G. A. *The Bell system technical journal*. January 1955. Vol. 34. No. 1. P. 1—4.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д. т. н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Problems of Long-Distance Telephony at the Turn of the 19th and 20th Centuries and the Search for Their Solutions

V. M. Pestrikov

St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda st. St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru

Received: April 29, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *At the turn of the 19th and 20th centuries, long-distance telephone communication turned into a serious business, however, the cost of lines was high, and the practical commercial range of telephone signal transmission did not exceed 1600 km. As the lengths of long-distance telephone lines increased, two problems arose that were recognized as particularly relevant, in particular, crosstalk and signal attenuation. AT&T researchers were engaged in solving these problems. This article examines the work of scientists and engineers who have led to real practical solutions to problems of long-distance telephone communication, in particular, Oliver Heaviside, John Stone and George Campbell.*

Keywords: *Long-distance telephone communication, telegraph equations, bimetallic telephone cable, Campbell's equation, Campbell's loading coils.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Problems of Long-Distance Telephony at the Turn of the 19th and 20th Centuries and the Search for Their Solutions," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 117–151, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.10. (In Russ.).

References

- [1] V. M. Pestrikov, "Early work of Lee de Forest on wireless telegraphy," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 456–507, 2020. (In Russ.).
- [2] V. M. Pestrikov, "The Genesis of Lee de Forest's Audion," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 1, pp. 42–79, 2021. (In Russ.).
- [3] V. M. Pestrikov, "Discovery and some scientific studies of cathode rays," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 190–226, 2020. (In Russ.).
- [4] V. M. Pestrikov, "On the way to the vacuum diode," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 1, pp. 98–134, 2020. (In Russ.).
- [5] V. M. Pestrikov, "Lee de Forest's promotion of cordless phone innovation in the service market," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 4, no. 2, pp. 107–146, 2021. (In Russ.).
- [6] V. M. Pestrikov, "Invention of the electronic tube audio amplifier," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 433–455, 2020. (In Russ.).

- [7] J. A. Barrett, "Electric circuit," US392775A Patent. Patented Nov. 13, 1888. Application filed May 9, 1888.
- [8] *The History of Engineering and Science in the Bell System. The Early Years (1875–1925). Vol. I.* By M. D. Fagen, ed. New York, Bell Telephone Laboratories, Inc. 1975, p. 206.
- [9] J. J. Carty, "Inductive disturbances in telephone circuits," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. VIII, p. 100–122, Mar. 17, 1891.
- [10] J. J. Carty, "Telephone and telegraph circuit," Patent US348512A. Patented Aug. 31, 1886. Application filed February 2, 1886.
- [11] A. M. & T. R. Rosebrugh, "Multiple telephone," Patent US417511A. Patented Dec. 17, 1889. Application filed November 27, 1886.
- [12] A. M. Rosebrugh, "Duplex telephony," *Electrician*, vol. 18, P. 378–380, March 4th, 1887.
- [13] A. M. & T. R. Rosebrugh, British Patent 4231, 1886. Patent date Aug. 15th, 1885.
- [14] "The Rosebrugh Duplex Telephone System," *The Electrical World*, vol. 15, no. 1, p. 2, January 4th, 1890.
- [15] A. M. Rosebrugh, "Duplex Telephony in Actual Use," *The Electrical World*, vol. 15, no. 19, p. 312–313, May 10, 1890.
- [16] A. M. Rosebrugh, British Patent 10404 of 1886, patent date Aug. 13th, 1886.
- [17] V. M. Pestrikov and M. V. Pestrikova, "The struggle for the range of telephone communication at the turn of the XIX–XX centuries," in *Networks and communication lines: past, present, future: materials of the Ninth scientific readings in memory of A. S. Popov*, St. Petersburg: "Svoyo" publishing house, p. 53–59, 2016. (In Russ.).
- [18] V. M. Pestrikov and P. P. Yermolov, "The struggle for the range of telephone communication before the invention of the audion Lee de Forest," *ITM Web of Conferences*, vol. 30, no. 16002, 2019, [Online]. Available: URL: [https://doi.org/10.1051/itmconf\(30.11.2021\)](https://doi.org/10.1051/itmconf(30.11.2021)).
- [19] O. Heaviside, "Electrical Conductor," Patent GB1407, April 6th, 1880.
- [20] O. Heaviside, *Electromagnetic theory. Vol. I.* London: The Electrician Company, 1893.
- [21] "O. Heaviside to O. Lodge, 18 December 1918," quoted in B. J. Hunt, *The Maxwellians*. NY: Cornell U. Press, Ithaca, 1991, p. 135.
- [22] B. J. Hunt, "Oliver Heaviside: A first-rate oddity," *Physics Today*, no. 11, pp. 48–54, 2012.
- [23] B. Mahon, *Oliver Heaviside: Maverick Mastermind of Electricity*. London: Institution of Engineering and Technology, 2009, p. 79.
- [24] "O. Heaviside to O. Lodge. 24 September 1888," quoted in Hunt B. J. *The Maxwellians*. NY: Cornell U. Press, Ithaca, 1991, p. 143.
- [25] J. S. Stone, "Electric circuit," Patent US578275, dated March 2, 1897. Application filed September 10, 1896.
- [26] F. B. Jewett "Dr. George A. Campbell," *The Bell System Technical Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 553–557, October 1935.
- [27] G. A. Campbell, "On loaded lines in telephonic transmission," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, series 6, vol. 5(27), PP. 313–330, March 1903.
- [28] C. Godfrey, "Discontinuities of wave-motion along a periodically loaded string," *Philosophical Magazine*, series 5, vol. 45, no. 3, pp. 356–363, 1898.
- [29] *The Collected Papers of George Ashley Campbell*. New York: American Telephone and Telegraph Company, 1937, p. 17.
- [30] J. A. Fleming, *The propagation of electric currents in telephone and telegraph conductors*. Second ed., revised. London: Constable & Company Ltd., 1912, p. 129.
- [31] A. L. Albert, *Electrical Communication*, New York: Wiley, 1950, pp. 242–243.
- [32] E. H. Colpitts, "The Collected Papers of George Ashley Campbell. Introduction," *Bell Telephone Quarterly*, vol. 17, no. 1, pp. 58–70, January 1938.

- [33] F. L. Rhodes, "Permalloy: The Latest Step in the Evolution of the Loading Coil," *Bell Telephone Quarterly*, vol. 6, no. 4, pp. 238–246, October 1927.
- [34] G. A. Campbell, "Improvements in and connected with Electric Circuits for the Transmission of Energy by Variable Currents," Patent GB190016290A, Accepted Nov 17th, 1900, Date of Application Sept. 15th, 1900.
- [35] "G. A. Campbell," *The Bell system technical journal*, vol. 34, no. 1, pp. 1–4, January 1955.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.