

Infocommunications and Radio Technologies, vol. 5, no. 2, pp. 260–293, 2022.

Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2022. Т. 5, № 2. С. 260—293.

ISSN: 2587-9936

DOI: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.20

УДК 621.37-621.39(091)

Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий

Пестриков В. М.

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

Получено: 22 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Рассмотрены научные пути, которые привели американского радиотехника Майкла Пупина к разработкам телефонных технологий, направленных на повышение качества звукового сигнала при его передаче на большие расстояния. Исследованы важные изобретения Пупина в области дальней телефонии. Описаны его теории использования катушек индуктивности для уменьшения затухания передаваемого телеграфного и телефонного сигнала по кабелю путем искусственного увеличения его индуктивности. Уделено внимание спору между Пупином и Кэмпбеллом в первенстве изобретения нагрузочных катушек и его наиболее значимым последствиям.

Ключевые слова: дальняя телефонная связь, Майкл Пупин, Лагранж, аналитическая механика, нагруженный проводник, пупинизация, патентное соперничество Пупина и Кэмпбелла.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 260—293.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Майкл Пупин и пупинизация телефонных линий / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 260—293.

1. Введение

В статье [1] рассмотрены и проанализированы телефонные технологии, которые позволили решить некоторые проблемы дальней телефонии на рубеже 19 и 20 веков. Одной из самых важных инноваций в истории телефонной связи стала практическая реализация сотрудником компании

AT&T Дж. Кэмпбеллом концепции Оливера Хевисайда об увеличении индуктивности линии. Это нововведение устранило временные задержки и искажения сигнала, позволив значительно повысить скорость передачи. Дж. Кэмпбелл продемонстрировал, что телефонная линия передачи, нагруженная катушками индуктивности, может передавать четкие голосовые сигналы в два раза дальше, чем ненагруженные линии. Это привело к значительной экономии средств по сравнению с существующей технологией покрытой железом медной проволоки. Родилась нагрузочная катушка, которая названа так потому, что катушка «нагружала» цепь индуктивностью.

В данной статье рассматривается решение проблемы увеличения дальности передачи телеграфных и телефонных сообщений по кабелям связи, которая находилась в числе приоритетных научных исследований не только в *Bell Co.*, но и в других научных центрах, в частности, американском Колумбийском университете. Здесь этими вопросами занимался возвратившийся из-за границы в родные стены выпускник университета Майкл Пупин¹ (*Michael Idvorski Pupin*, 09.10.1858—12.03.1935). В 1883 году он окончил колледж Колумбия² и получил степень бакалавра гуманитарных наук (*Bachelor of Arts*), а в июне месяце того же года отправился продолжать свое образование в Кембридж. В Кембридже Пупин для продолжения образования выбрал Королевский колледж (англ. *King's College*). Здесь он провел 18 месяцев в изучении вопросов математической физики и подготовке с репетитором к сдаче экзамена трайпос³ по математике. Неизвестно, сдал он этот экзамен или нет (таких данных в научной литературе найти не удалось).

2. Книга, перевернувшая научное мировоззрение М. Пупина

В 1884 году Пупин провел 2-х месячные каникулы во Франции в небольшом городке Порник (*Pornic*) на побережье Бискайского залива. 15 июля он «посетил великую Сорбонну и Колледж де Франс в Латинском квартале», где, по его словам, «нашел великое сокровище в букинистиче-

¹ М. Пупин родился в Сербии, селе Идвор, в 54 км от Белграда. В 1874 г. подростком, после смерти отца, эмигрировал в Америку.

² Колледж был образован в 1754 году, с 1784 г. по 1896 г. назывался колледж Колумбия. В 1896 году по разрешению попечителей официально стал называться — «университет Колумбия» (англ. *Columbia University*). Сегодня университет официально именуется «университет Колумбия в городе Нью-Йорк» в районе Манхэттен или просто Колумбия (англ. *Columbia*).

³ Трайпос (англ. *Tripes*) — традиционный выпускной письменный экзамен по курсу математики студентов бакалавриата Кембриджского университета. Сами экзамены были отчасти задуманы как испытания на выносливость и проводились в течение четырех или пяти дней.

ском магазине: великий трактат Лагранжа «Аналитическая механика»⁴ [2, 3], впервые опубликованный под эгидой Французской академии в 1788 году, рис. 1. В книге мемуаров⁵ Пупин отметил [3, р. 189]: «Мое двухмесячное пребывание в Порнике позволило мне в полной мере оценить красоту языка этой великой работы, а мое обучение у Раута⁶ устранило многие трудности математической теории. Я убедился в этом в своих самых первых попытках в Париже расшифровать некоторые из его вдохновляющих страниц». Книга, купленная в Париже, содержала статью Лагранжа «Исследования природы и распространения звука» (фр. *Researches sur la Nature et la Propagation du Son*), в которой было дано решение проблемы вибрирующей струны с закрепленными концами и нагруженной через равные промежутки времени одинаковыми массами.



Рис. 1. Майкл Пупин. Парижский университет 1 Пантеон-Сорбонна (19 век).
Трактат Жозефа Луи Лагранжа «Аналитическая механика»,
опубликованный в Париже в 1788 г.

Fig. 1. Michael Pupin. University of Paris 1 Pantheon-Sorbonne (19th Century).
Joseph Louis Lagrange's treatise "Analytical Mechanics", published in Paris in 1788

Здесь уместно дать небольшой комментарий по поводу статьи Лагранжа, которая в дальнейшем сыграла большую роль в решении Пупином

⁴ Лагранж рассматривает всю механику, статическую и динамическую, не прибегая к каким-либо описательным средствам или фигурам, благодаря единственному формализму аналитического исчисления.

⁵ В 1923 г. Майкл Пупин издал книгу мемуаров «От иммигранта к изобретателю» (англ. *From Immigrant to Inventor*). В 1924 г. за эту книгу ему была присуждена ежегодная Пулитцеровская премия (англ. *Pulitzer Prize*). Мемуары были опубликованы на сербском языке в 1929 году под названием «От пастбищ к ученым» (серб. *Od pašnjaka do naučenjaka*). Пулитцеровская премия за биографию — одна из семи американских Пулитцеровских премий, ежегодно присуждаемых в области литературы, драмы и музыки. Она вручается с 1917 года за выдающуюся биографию, автобиографию или мемуары американского автора или соавторов, опубликованные в течение предыдущего года.

⁶ Джон Эдвард Раут (*John Edward Routh*), сотрудник колледжа Питерхаус (*Peterhouse College*), был самым известным преподавателем математики, которого когда-либо видел Кембриджский университет. Занимался подготовкой студентов к сдаче трайпоса по математике.

проблемы дальней телефонной связи. Среди задач о колебания упругих тел особое место занимает задача о поперечных колебаниях натянутой струны конечной длины, закрепленной на обоих концах. В XVIII веке спор вокруг математической теории для исследования колебаний струны превратился в научную дискуссию, которая развернулась между крупнейшими учеными того времени, в частности, Д'Аламбером, Эйлером, Д. Бернулли, Лагранжем и другими. Эта задача сыграла важную роль в самой постановке вопроса о возможности тригонометрического разложения произвольной функции. Лагранж в отличие от названных ученых построил решение задачи несколько иначе, рассматривая движение каждой точки струны в отдельности. Для этого он закрепленную по концам нить разделил на n равных частей и загрузил их $n-1$ равными массами. Таким образом он свел задачу к решению системы линейных дифференциальных уравнений второго порядка, которую решил по методу Д'Аламбера. Далее он перешел к задаче колебаний струны, рассматривая последнюю как предельный случай нагруженной невесомой нити при $n \rightarrow \infty$ и стремлении к нулю массы каждой части струны. При этом суммарная масса всех частей стремится к конечному пределу, то есть массе струны. Использование предельного перехода при $n \rightarrow \infty$ было лишено какой-либо математической строгости. Лагранж, невзирая на это, получил общее решение задачи колебаний струны с закрепленными концами, которое было аналогично результату Д. Бернулли в виде тригонометрического ряда. При этом Лагранж уточнил решение Д. Бернулли и вывел формулы для определения коэффициентов этого ряда. Это нашло отражение в «Аналитической механике» [4].

К концу каникул Пупин изучил большую часть классического трактата Лагранжа, и кроме этого, перечитал «Жизнь Максвелла» Льюиса Кэмпбелла и Уильяма Гарнетта (*Lewis Campbell and William Garnett*) [5] и понял многое из того, что видел в Кембридже, но не понимал раньше.

В конце 1844 года Пупин получил письмо от президента Колумбийского колледжа Барнарда (*Barnard*), к которому было приложено рекомендательное письмо к знаменитому физику Джону Тиндалю⁷ (*John Tyndall*, 02.08.1820—04.12.1893), приемнику Фарадея в руководстве Королевским институтом (*Royal Institution*), рис. 2. Барнард сообщил, что Колумбия по-

⁷ Джон Тиндаль (англ. *John Tyndall*, 02.08.1820 — 04.12.1893) — английский физик. Выдающийся экспериментатор, в частности, в области физики атмосферы. Исследовал передачу как лучистого тепла, так и света через различные газы и пары. Обнаружил, что водяной пар и углекислый газ поглощают гораздо больше лучистого тепла, чем газы атмосферы, и доказал, что эти газы играют важную роль в смягчении климата Земли, то есть в естественном парниковом эффекте. Изучал рассеяние света крупными молекулами и пылью, известное как *эффект Тиндаля*. Он провел эксперименты, демонстрирующие, что голубой цвет неба является результатом рассеяния солнечных лучей молекулами в атмосфере.

лучила щедрую сумму денег от Тиндаля, представляющую часть чистых поступлений от его знаменитого курса публичных лекций о свете, которые он читал в Соединенных Штатах в 1872—1873 годах и что доход от этой суммы будет предоставлен в качестве годовой стипендии \$500 выпускнику Колумбии для помощи в изучении экспериментальной физики. Подходящим кандидатом на стипендию Джона Тиндаля Барнард и профессор физики Колумбии Руд (*Rood*) сочли Пупина.

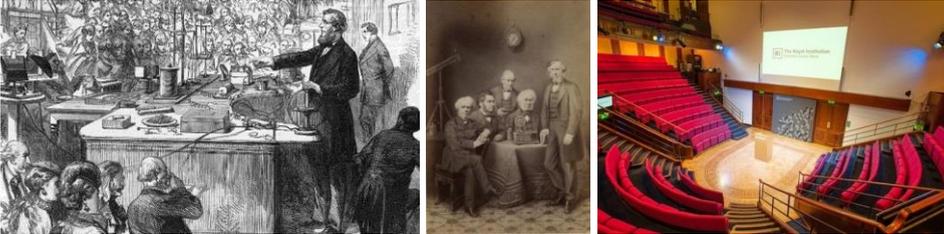


Рис. 2. Эксперимент Тиндаля с лучистым теплом (1870 г.). Майкл Фарадей с Томасом Генри Гексли, Чарльзом Уитстоном, Дейвид Брюстером и Джоном Тиндалем (слева направо). Лекционный зал Королевского института (2013 г.), в котором Майкл Фарадей впервые продемонстрировал явление электромагнетизма.

Fig. 2. Tyndall's radiant heat experiment (1870). Michael Faraday with Thomas Henry Huxley, Charles Wheatstone, David Brewster and John Tyndall (from left to right). Royal Institution Lecture Hall (2013), where Michael Faraday first demonstrated the phenomenon of electromagnetism

Тиндаль поспособствовал Пупину в переезде из Кембриджа в Берлин и его занятиям в изучении экспериментальной физики в знаменитой лаборатории Гельмгольца. Напутствуя Пупина, Тиндаль сказал [3, р. 208]: «В Берлинской лаборатории вы найдете те самые вещи, которые мои американские и британские друзья и я хотели бы видеть в действии во всех лабораториях колледжей и университетов в Америке и в Британской империи. В этом отношении немцы лидируют в мире уже более сорока лет, и они являются великолепными лидерами».

В Берлинском университете Пупин пробыл 4 года, изучая в основном у Гельмгольца то, что тогда называлось «физической химией», а на самом деле являлось термодинамикой. В 1889 г. в Берлине Пупин защитил докторскую диссертацию (*PhD*) на тему «Осмотическое давление и его отношение к свободной энергии» (нем. *Der Osmotische Druck und seine Beziehung zur Freien Energie*) под руководством Германа Людвиг Фердинанда фон Гельмгольца (*Hermann von Helmholtz*, 31.08.1821—08.09.1894). После защиты Пупин возвратился в Колумбийский университет и вошел в состав кафедры электротехники, которую организовал Фрэнсис Крокер

(*Francis Bacon Crocker*, 1897—1898) [6]. На кафедре было всего 2 человека, заведующий кафедрой профессор Крокер, который вел практические занятия по курсу электротехники, в то время как лекции по теоретической части этого курса читал профессор Пупин. Этот тендем начал свою педагогическую деятельность осенью 1889 года и гармонично работал в Колумбийском университете в течение двадцати лет. На протяжении этого периода Крокер⁸ был заведующим кафедрой.

3. Метод улучшения проводной телефонной линии

Пупин приступил к научным исследованиям, сразу после начала работы в Колумбийском университете. Он заинтересовался электрическим резонансом⁹ и электрическими токами в разреженных газах. Во время исследований низкочастотного электрического резонанса были открыты новые эффекты, которые он зафиксировал в патентной заявке «Устройство для телеграфирования и телефонирования» (англ. *Apparatus for Telegraphic or Telephonic Transmission*), поданной 14 декабря 1893 г. [7].

Предметом изобретения явилось устройство для преодоления импеданса¹⁰ (англ. *overcome the impedance*), которое электрические кабели, обладающие значительной самоиндукцией, электростатической емкостью и электростатическим поглощением, оказывают переменным, и особенно быстро меняющимся электрическим токам, а также для варьирования постоянной времени цепи. В патенте Пупин подчеркивает, что под «импедансом» он подразумевает не электромагнитное сопротивление, а комбинарованную реакцию омического сопротивления, самоиндукции, электростатического поглощения и ослабляющего эффекта распределенной емкости длинного кабеля. Под «постоянной времени» он имеет ввиду количество секунд, в течение которых электродвижущая сила практически завершает процесс заряда цепи.

Изобретение базируется на двух основных физических фактах, которые обнаружил его автор.

Первый физический факт. Каждая электрическая цепь ведет себя, исходя из своей самоиндукции и способности по отношению к периодиче-

⁸ Крокер до Колумбии основал несколько компаний по производству электродвигателей, в частности, *Curtis & Crocker and Crocker-Wheeler Electric Motor Company*. Работая в Колумбийском ун-те, он оказал значимое влияние на отрасль. По словам Томаса Эдисона, Крокер был «одним из ведущих инженеро-электриков мира, перед которым электротехническая промышленность в целом была в большом долгу».

⁹ Результатами этих исследований стали изобретения в области электрической настройки, которые после этого повсеместно стали применять в беспроводной телеграфии. Эти изобретения были запатентованы, и компания Маркони купила эти патенты в 1902 году.

¹⁰ Электрический импеданс — полное сопротивление двухполюсника для гармонического сигнала. Это понятие ввел О. Хевисайд в 1886 году.

ски изменяющейся электродвижущей силе, точно так же, как массивное упругое тело, вследствие своей инерции и упругости, ведет себя по отношению к периодически изменяющемуся возмущению. Подобно тому, как такое тело имеет определенный период колебаний, так и электрическая цепь имеет свой собственный определенный период, то есть, когда ее электрическое равновесие нарушается внешним импульсом, возникает периодический электрический ток. Этот период зависит не только от самоиндукции, электростатической емкости и омического сопротивления, как предполагалось ранее, но также, как обнаружил Пупин, от других сопротивлений «трения» цепи, таких как, например, магнитный и диэлектрический гистерезис. Однако омическое сопротивление и другие сопротивления «трения», как правило, можно уменьшить таким образом, чтобы они практически не влияли на период цепи. Процесс изменения периода цепи путем подходящего изменения ее коэффициента самоиндукции, или ее электростатической емкости, либо того и другого, Пупин назвал «настройкой схемы» (*tuning the circuit*).

Второй физический факт. Электромагнитное сопротивление в электрической схеме с уменьшенными сопротивлениями «трения» и магнитными сопротивлениями обеспечивает простую гармоническую электродвижущую силу, которая постепенно уменьшается с приближением периодичности или шага этой электродвижущей силы к периодичности или шагу цепи. Это минимум, который равен омическому сопротивлению цепи, когда две периодичности одинаковы, то есть, когда приложенная электродвижущая сила и цепь находятся в резонансе. Пупин обнаружил, что если на такую цепь действует комплексная гармоническая электродвижущая сила и если периодичность цепи значительно превышает максимальную периодичность гармоник, содержащихся в комплексной электродвижущей силе, то электромагнитное сопротивление, которое схема будет оказывать на различные составляющие гармоники электродвижущей силы, будет почти обратно пропорционально периодичности этих компонентов.

В патенте *US6519346A* Пупин особо выделяет свой приоритет в открытии описанных выше двух физических фактов [7]:

«Я считаю, что я был первым, кто обратил внимание на части этих двух физических фактов, которые были особо подчеркнуты выше, и особенно то, что я был первым, кто обнаружил, что влияние магнитной и диэлектрической инерционности меняется в зависимости от периода воздействия электродвижущих сил и, особенно, с высокими периодами. Я безусловно считаю себя первым, кто практически применил эти принципы для целей передачи электроэнергии.

Я также обнаружил, что эти два физических факта и принцип, лежащий в их основе, могут быть расширены таким образом, чтобы включать схемы, разделенные на секции со вставленными конденсаторами, которые последовательно соединяют несколько секций схемы, то есть я обнаружил, что все правила настройки схемы могут быть применены к такой схеме в целом или к любой ее части. Это расширение — мое собственное открытие, и оно впервые раскрывается в этой спецификации. Это позволяет мне регулировать постоянную времени и электромагнитное сопротивление длинного проводника, и в то же время также уменьшать эффект ослабления из-за распределенной электростатической емкости, а также уменьшать электрическое поглощение в изоляции такого проводника».

Устройство для преодоления импеданса при телеграфировании или телефонировании представляло собой набор фильтров из параллельно соединенных катушек индуктивности и конденсаторов, настроенных на требуемую частоту. Фильтры включались в каждый провод двухпроводной цепи через определенные интервалы, рис. 3. Включение таких фильтров увеличило индуктивность линий и уменьшило затухание электрического сигнала.

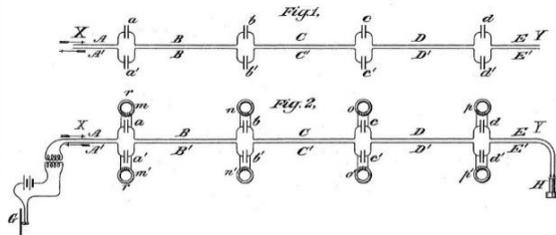


Рис. 3. М. И. Пупин (крайний слева) и Ф. Б. Крокер (в центре со шляпой) со студентами 1-го курса Колумбии. Рисунок улучшенной телефонной линии из патента М. Пупина US6519346A с приоритетом от 14 декабря 1893 г. [7].

Fig. 3. M. I. Pupin (extreme left) and F. B. Crocker (center with hat) with 1st year Columbia students. Drawing of an improved telephone line from M. Pupin's patent US6519346A with a priority of December 14, 1893 [7]

Расчет сделанный в патенте US6519346A показывает, что телефонный ток, который может быть передан по только что описанному кабелю (рис. 3), будет намного больше, чем создаваемый электродвижущей силой индукционной катушки хорошего передатчика. Этот патент стал для Пупина отправной точкой в создании технологии нагрузочных катушек для телефонных линий, которая принесла ему известность в дальнейшем.

Пупин, невзирая на получение 8 мая 1894 года патента US6519346A, продолжил свои обширные теоретические и экспериментальные исследо-

вания низкочастотного электрического резонанса в телефонной линии, что нашло отражение в опубликованной им большой статье объемом около 40 страниц [8]. В статье описан разработанный им метод получения простых гармонических токов постоянной частоты, которые можно было точно измерить. Кроме этого, в ней приведены установленные некоторые особенности резонанса в электрических системах, состоящих из первичного и вторичного контуров с локальной самоиндукцией и емкостью.

Размышления о проблеме дальней телефонной связи не оставляли Майкла Пупина даже во время его научной стажировки в Европе, о чем он писал в своих воспоминаниях [3, р. 330]: «Решение проблемы я нашел во время летних каникул 1894 г., которые я проводил в Швейцарии. Во время прогулок, будучи один, я много размышлял о своем решении обобщенной проблемы Лагранжа. Однажды, поднимаясь на перевал Фурка¹¹ (*Furka pass*), мне пришла в голову мысль, что, поскольку при движении электричества по проводу действуют силы, аналогичные тем, которые возникают при движении материальных элементов в натянутой струне, мое *обобщенное решение задачи Лагранжа* должно быть применимо к движению электричества, и я сразу понял, что сделал очень важное изобретение». Из этого следовало, что метод построения кабелей и дальних воздушных линий для передачи энергии электрическими волнами, особенно для междугородной телефонии и телеграфии, представляет собой практическое применение общей механической теории распространения волн по неоднородным проводникам.

4. Механический аналог проводника электрических волн

Основные черты общей механической теории распространения волн по неоднородным проводникам можно прояснить очень простой механической иллюстрацией [9]. Рассмотрим рис. 8. У камертона жестко закреплена ручка *C*, рис. 4а. К одному из его концов прикреплен гибкий нерастяжимый шнур *BD*, рис. 8а. Другой конец шнура закреплен в точке *D*. Если позволить вилке камертона устойчиво вибрировать, поддерживая вибрацию электромагнитным или другим способом, то движение шнура будет волновым, рис. 4б.

Если сопротивление трению, препятствующее движению шнура, пренебрежимо мало, то волновое движение будет примерно таким, как показано на рис. 4б. Прямые волны, исходящие от камертона, и отраженные волны, исходящие из фиксированной точки *D*, будут иметь примерно

¹¹ Фурка (романш. *Furca*) или Фуркапасс (нем. *Furkapass*) — высокогорный перевал в Альпах, Швейцария. Его высота — 2 436 метров над уровнем моря. Перевал лежит на Большом европейском водоразделе. На этом перевале проходили съемки фильма «Голдфингер» о Джеймсе Бонде.

равные амплитуды, и за счет их интерференции будут образовывать примерно стационарные волны. Однако, если сопротивление трению не является пренебрежимо малым и струна, к примеру, лежит вдоль поверхности, о которую она трется при вибрации, или если она висит в расслабленном положении вместо того, чтобы находиться под натяжением между камертоном и точкой крепления, то тогда будет происходить диссипация энергии распространяющейся волны. Следовательно, прямая и отраженная волны не будут иметь одинаковые амплитуды, и, следовательно, их интерференция не приведет к возникновению стационарных волн. Затухание волн графически представлено на рис. 8в.

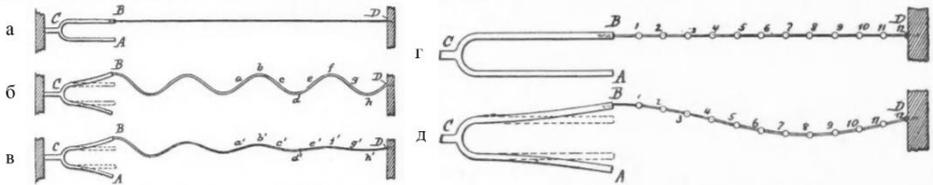


Рис. 4. Механическая модель распространения волн в шнуре, вызванных вибрацией камертона [9].

Fig. 4. Mechanical model of wave propagation in a cord caused by vibration of a tuning fork [9]

Эксперименты показывают, что при прочих равных условиях увеличение плотности струны уменьшает затухание, так как большая масса требует меньшей скорости для накопления заданного количества кинетической энергии, в то время как меньшая скорость приводит к меньшим потерям на трение. Это поразительная механическая иллюстрация волновода с большой индуктивностью. Здесь следует заметить, что увеличение плотности приводит к сокращению длины волны.

Теперь предположим, что мы прикрепим груз, скажем, шарик пчелиного воска, к средней точке нити, для увеличения вибрирующей массы. Этот груз станет источником отражений, и тогда меньше волновой энергии достигнет точки *D*, чем раньше. Эффективность передачи теперь будет меньше, чем до добавления веса.

Разделим пчелиный воск на три равные части и поместим их в трех равноудаленных точках вдоль шнура. Эффективность передачи волн будет лучше, чем когда весь парафин был сконцентрирован в одной точке. При дальнейшем разделении эффективность будет еще больше улучшена, но вскоре наступает момент, когда дальнейшее деление дает лишь незначительное улучшение. Этот момент достигается, когда нагруженный таким образом шнур вибрирует почти как однородный шнур с той же массой, натяжением и сопротивлением трению. Такой нагруженный шнур с насад-

кой-камертоном представлен на рис. 8г. На рис. 8д представлена вибрация шнура, несущего нагрузку на определенном расстоянии друг от друга.

Проблема определения надлежащего расстояния, на котором должны быть размещены нагрузки, является математической задачей аналитической механики. Эксперименты с шнурами такого рода показали, что *расстояние между нагрузками должно быть значительно меньше половины длины волны*, которая должна быть передана. Данный шнур может быть правильно загружен для некоторых длин волн, в то время такая нагрузка не будет соответствовать для более коротких волн. Невозможно загрузить шнур таким образом, чтобы он был эквивалентен однородному шнуру для всех длин волн. Однако, если распределение нагрузок удовлетворяет требованиям для данной длины волны, то оно также будет удовлетворять им для всех более длинных волн.

Теперь следует заметить, что рассматриваемая здесь длина волны — это не длина волны шнура без нагрузок, а длина волны, которую рассматриваемая частота будет иметь на правильно нагруженном шнуре, или что-то же самое, что нагрузка на однородном шнуре той же массы, натяжения и сопротивления трения, что и нагруженный шнур.

Этот момент имеет фундаментальное значение, поскольку длина волны, соответствующая данной частоте, может и обычно будет намного короче на шнуре с нагрузкой, чем на шнуре без нагрузок. Такой шнур является механической аналогией проводника электрических волн. Математический закон, по которому движется такой шнур, тот же, в соответствии с которым электрический ток распространяется по волноводу под действием аналогичных сил. Причину этого искать не приходится. У нас есть одни и те же реакции в обоих случаях, а именно: кинетическая или массовая реакция, реакция натяжения и реакция сопротивления в случае шнура, электрокинетическая реакция, реакция емкости и реакция омического сопротивления в случае волновода.

Математическая модель этих реакций одинакова в обоих случаях, поэтому она является точной аналогией другой, то есть механической копией электрической. Правильно введенная нагрузка индукционными катушками на телефонный провод увеличит его способность передавать электрические волны. Неправильно расположенные нагрузки уменьшат эту способность.

Установка катушек индуктивности в периодически повторяющихся точках вдоль волновода или провода производит тот же эффект на передаче электрических волн, что и распределение небольших нагрузок вдоль натянутого шнура на рис. 8 при передаче механической волны по шнуру.

5. Распространение волн в конечной однородной телефонной линии

Пупин через год после отдыха с женой в Швейцарии, в феврале 1896 г. выступил с докладом «Электрические колебания на линейном проводнике с равномерно распределенной емкостью, самоиндукцией и сопротивлением» (англ. *Electrical oscillations on a linear conductor of uniformly distributed capacity, self-induction, and resistance*) на заседании Американского математического общества (англ. *American Mathematical Society*, сокращенно AMS). Текст этого доклада потом вошел в виде первой части в статью «Распространение длинных электрических волн» (англ. *Propagation of Long Electrical Waves*), опубликованную в 1899 г. [10, p. 100—120].

В этом докладе Пупин представил свою математическую теорию о распространения длинных электрических волн на линейном проводнике с равномерно распределенной емкостью, самоиндукцией и сопротивлением. В начале выступления он провел отличия между своими исследованиями по распространению электрических волн в средах и исследованиями Герца. Герц получил волны, длину которых было удобно измерять в пределах лаборатории. Колебания, которые излучают такие волны, имеют очень высокую частоту, близкую к тысяче миллионов колебаний в секунду.

В телефонии, телеграфии и передаче электроэнергии на большие расстояния используются колебания всего в несколько сотен колебаний в секунду или даже менее ста. Волны, сопровождающие эти медленные колебания, имеют длину в сотни миль. Поэтому представляется безнадежной задачей разработать экспериментальный метод исследования для этих чрезмерно длинных волн, подобный методу Герца для коротких волн, так называемых волн Герца. Это объясняет тот странный факт, что, хотя существует обширная масса экспериментальных фактов, которые проливают много света на математическую теорию волн Герца, в настоящее время едва ли существует один эксперимент, который может пролить какой-либо свет на математическую теорию длинных электрических волн.

На первый взгляд кажется, что не должно быть никакой разницы между математической теорией коротких волн и теорией длинных волн, и что все, что проливает свет на одни волны, должно также описывать и другие волны. Но это различие действительно существует, и оно связано с тем фактом, что волны Герца являются волнами, излучаемыми свободными колебаниями, тогда как длинные волны, используемые в телеграфии, телефонии и передаче энергии на большие расстояния, обусловлены вынужденными электрическими колебаниями. Таким образом, одна теория имеет дело со свободными, а другая — главным образом с вынужденными

электрическими колебаниями. Кроме того, эти длинные волны обычно исходят от оконечного устройства с большим сопротивлением, и основная цель их передачи состоит в том, чтобы они были поглощены в приемном устройстве с большим сопротивлением. В связи с этим возникает вопрос: «Как много энергии, передаваемой с одного конца, принимается на другом конце?» Это является основным вопросом в математической теории длинных волн. Поэтому экспериментальные исследования, которые так много сделали для нашего ясного понимания распространения волн Герца, могут лишь немного помочь нам в расширении наших знаний о математической теории распространения электрической энергии для телеграфии, телефонии и передачи энергии на большие расстояния.

Короткость длины волны делает колебания Герца управляемыми, в то время как сделать это с чрезмерно длинной волной при экспериментальном исследовании распространения медленно чередующихся электрических колебаний практически невозможно. Но обязательно ли длительный период означает длинную волну? Длина волны натриевого света, например, в стекле короче, чем в вакууме, потому что в стекле свет распространяется медленнее, чем в вакууме. Если бы мы могли увеличить показатель преломления стекла до любого значения, которое нам заблагорассудится, мы могли бы соответственно уменьшить длину волны. Все дело в скорости распространения. Самый простой способ исследования этой скорости разработал Френель. Он установил на одном основании на поверхности раздела двух рассматриваемых сред два параллельных луча цилиндра, один из которых находился в вакууме, а другой закрывался стеклом. Если высоты этих двух цилиндров будут равны расстоянию, пройденному лучом при скорости распространения в двух средах за 1 секунду, то тогда любая лучистая энергия, которая была в одном из цилиндров в любой данный момент, будет в другом по прошествии одной секунды.

Следовательно, скорость распространения пропорциональна количеству энергии, которое среда накапливает на единицу длины прямолинейного пути луча, когда через него распространяется заданное напряжение. Если бы вместо стекла мы поставили на пути луча вещество, которое могло бы накапливать в миллион раз больше энергии на единицу длины прямолинейного пути, чем вакуум, когда через них распространяется тот же луч, то мы должны были бы иметь скорость и, следовательно, длину волны также в миллион раз меньше в этой среде, чем в вакууме.

Пупин в качестве модели однородного проводника по которому распространяются электрические волны использовал петлю из проволоки *AB*, рис. 5. В одной точке контура находится передающее устройство *A*, в про-

тивоположной точке — приемное устройство *B*. Расстояние между *A* и *B* равно *l*, равное половине длины всей петли. Расстояние любого элемента *ds* от *A* равно *s*.

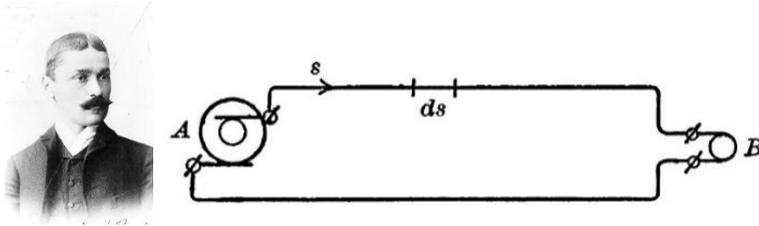


Рис. 5. М. И. Пупин (фото конца 19 века).
 Распространение волны вдоль однородного линейного проводника.

Fig. 5. M. I. Pupin (photo of the late 19th century).
 Wave propagation along a uniform linear conductor

Проводная линия характеризуется *L*, *R*, *C* — коэффициентом самоиндукции, омическим сопротивлением и емкостью соответственно на единицу длины линии. Если *i* — ток, а *V* — потенциал в любом элементе *ds*, тогда, полагая сумму реакций в *ds* равной нулю, и в соответствии с законом равенства действия и противодействия, можно записать

$$\left(L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{\delta V}{\delta s} \right) ds = 0. \quad (1)$$

Теперь следует сделать замечание, которое обычно упускается из виду. При составлении этого уравнения не учитывались диссипативные реакции, возникающие в соседних проводниках. Введенная таким образом неточность невелика для воздушных линий. В случае подводных кабелей ошибки, возникающие в результате этого, могут быть значительными.

Если *x* — ток смещения, то

$$x = C \frac{dV}{dt} = - \frac{\delta i}{\delta s}. \quad (2)$$

Дифференцируя (1) по *t* и (2) по *s*, после преобразований получим следующее дифференциальное уравнение для тока:

$$L \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + R \frac{\partial i}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\delta^2 i}{\delta s^2}. \quad (3)$$

Ток распространяется в виде плоской волны. Скорость распространения *v* при пренебрежении влиянием сопротивления *R*, определяется выражением

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

Уравнение (3) является математическим выражением закона равенства действия и противодействия в любой точке линии, где *однородность* линии не нарушается расположением передающего или принимающего устройства. Но в точках, где находится такое устройство, математическое выражение для закона равенства действия и реакции отличается от (3) и должно определяться из физических соображений в каждом конкретном случае. В таких точках уравнение распространения будет другим.

Пупин получил общее решение уравнения (3) для тока в конечной *однородной* линии в виде

$$i = (K_1 \cos m\xi + K_2 \sin m\xi)e^{k_1 t}, \quad (5)$$

где $\xi = l - s$, а отсчет начала координат начинается от места расположения приемного устройства (нагрузки).

Решение (5) удовлетворяет (3) при условии, что

$$-m^2 = k_1 C(k_1 L + R).$$

В решении (5) константы K_1 , K_2 и k_1 определяются таким образом, чтобы удовлетворить граничным условиям на генераторе и нагрузке.

В качестве общего решения Пупин рассмотрел вариант, который допускает произвольный выбор генератора и нагрузки. Он получил наиболее общее решение проблемы, которое описывает как вынужденные, так и свободные колебания в конечной *однородной* линии:

$$i = (2m \cos m\xi + h_1 \sin m\xi) \frac{D_0 e^{kt}}{F}, \quad (6)$$

где h_1 , D_0 , F , k – константы, выражение которых даны в работе Пупина [10, р. 103].

Решение (6) для тока вдоль линии позже было применено Пупином для расчета свободных и вынуждающих колебаний на линии передачи, у которой на ее концах различные параметры импеданса генератора и нагрузки.

Один из важных выводов, сделанных Пупином на основе проанализированных им примеров по распространению в проводнике электрических волн, заключался в том, что каждую волну тока можно разложить на две составляющие: амортизированную волну тока, движущуюся к генератору, и волну, движущуюся к нагрузке. Пупин пришел к выводу, что если затухание на линии невелико, то на линии будет присутствовать полная стоячая волна. Как упоминалось ранее, Пупин в своем подходе не определял характеристическое сопротивление, так как считал поведение тока в

условиях сильного отражения от нагрузки наиболее важным. Он отметил, что важно не только установить небольшое сопротивление на единицу длины, но и увеличить величину $\omega L/R$. Эквивалентно анализу схемы с простым переменным током, он определил коэффициент мощности как $\cos \theta$, где $\tan \theta = \omega L/R$. В случае простых цепей с потерями следует постараться сделать так, чтобы реактивная мощность была значительно выше активной мощности, так как эта накопленная энергия возвращается в генератор в случае простой цепи и распространяется в случае длинных проводов. Кроме того, Пупин подчеркнул разницу между анализом простой схемы и распространением тока по линии передачи, поскольку в последнем случае требуется максимальная мощность, подаваемая на нагрузку.

Заметим, что изложенная теория Пупина настоятельно рекомендует использование линейных проводов с высокой индуктивностью для передачи энергии на большие расстояния электрическими волнами, но в ней ничего не сказано о том, как практически построить такие линии, обладающие этим очень желательным свойством. Этот вопрос Пупин частично прояснил в последующем, в частности, в полученных патентах.

6. Распространение волн в нагруженном проводнике

По прошествии трех лет Пупин в марте 1899 года выступил с новым докладом «*Колесания на нагруженном проводнике*» (англ. *Oscillations on a loaded conductor*) на заседании Американского математического общества (AMS). Текст этого доклада потом вошел в виде второй и третьей частей в статью, опубликованную в 1899 г. [10, р. 120—134; р. 134—142]. Вторая часть доклада содержала две практические схемы нагруженных линий, третья — эксперименты с проводниками с низкой скоростью и конструкцию нагрузочной катушки индуктивности без сердечника.

14 декабря 1899 года Пупин подал патентную заявку «Метод уменьшения затухания электрических волн и устройства для этого» (англ. *Art of reducing attenuation of electrical waves and apparatus therefor*) [11]. В полученном 19 июня 1900 г. патенте US652230A Пупин закреплял свой приоритет в теории и схемах построения нагрузочных телефонных линий с оригинальной конструкцией катушек индуктивности. В текстовой части патента приведена механическая аналогия проводника электрических волн, кратко изложены основные результаты теории распространения электрических волн в проводниках применительно к телефонным линиям большой протяженности. В работе приведены те же, что и в статье [9], схемы нагруженных линий, а также оригинальная конструкция нагрузочной катушки индуктивности на кольцевом сердечнике из тонких железных пластин.

В патенте Пупин описал два типа нагруженных линий, которые в дальнейшем стали называть пупинизированными линиями. Схемы этих линий являются копиями рис. 4 и 5 из его статьи. Первый тип нагруженной линии состоит из последовательно соединенных катушек и конденсаторов, которые соединяют противоположные точки линии (рис. 6а). Второй тип линии отличается от первого только включением конденсаторов, которые в каждом проводе соединяют контакт между двумя последовательно соединенными индуктивностями и землей, рис. 6б. Второй тип линии представлен Пупином как «медленный» проводник, поскольку скорость распространения сигнала по такому проводнику меньше, чем по обычным линиям.

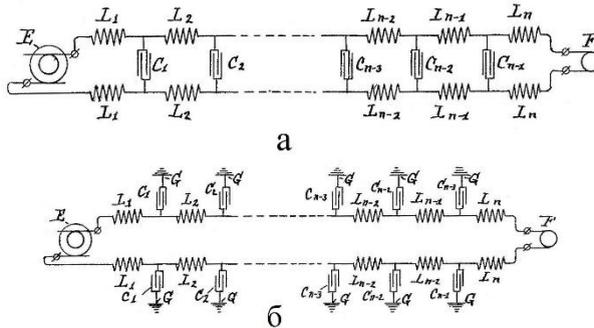


Рис. 6. Два типа однородных телефонных линий: а — I тип и б — II тип (медленный проводник). Рисунки из патента Пупина US652230A с приоритетом от 14 декабря 1899 г. [11].

Fig. 6. Two types of uniform telephone lines: a – type I and b – type II (slow conductor).

Drawings from Pupin's patent US652230A with priority of December 14, 1899 [11]

В схемах рис. 6а и рис. 6б индуктивности $L_1, L_2 \dots L_n$ представляют собой небольшие катушки без железного сердечника (рис. 7а), намотанные на деревянные каркасы, каждая катушка имеет самоиндукцию приблизительно 0,0125 Гн и сопротивление 2,5 Ом. Эти катушки соединены последовательно, образуя непрерывную линию, которая соединяет генератор E с приемным прибором F . В реальной телефонной линии было 400 нагрузочных катушек, показанных на рис. 7б, небольшие конденсаторы $C_1, C_2 \dots C_{n-1}$, соединяющие противоположные точки линии (рис. 6а) или соединяющие точки между последовательными катушками с землей G (рис. 6б), имели емкость приблизительно 0,025 мкФ.

Математическая теория Пупина описывает протекание переменного тока в медленном проводнике. Эта теория позволяет ответить на вопрос, насколько такой проводник похож на обычную телефонную линию с равномерно распределенной самоиндукцией, емкостью и сопротивлением. В статье [10] дан ответ, что с частотой до 1кГц такая линия представляет

собой почти обычную телефонную линию с индуктивностью 0,005 Гн на 1 милю, сопротивлением 1 Ом и емкостью 0,01 мкФ. Медленный проводник даже на частоте 3 кГц представляет собой приблизительно обычную линию с равномерно распределенными индуктивностью, сопротивлением и емкостью. При этом погрешность в пределах ошибок наблюдения составляет около 1—2 %. Для более низких частот это верно с гораздо более высокой степенью точности, что вполне достаточно для всех частот, которые имеют какое-либо значение при телефонной передаче речи.

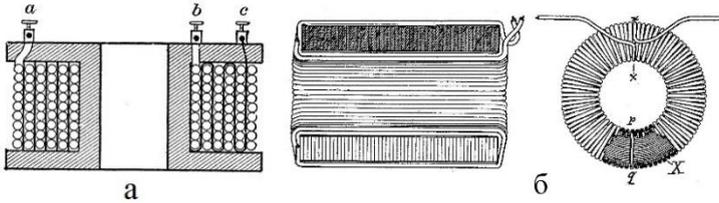


Рис. 7. Нагрузочные катушки Пупина: а — экспериментальный вариант [10], б — промышленный вариант [11].

Fig. 7. Loading coils of Pupin: a – experimental version [10], b – industrial version [11]

Линия с высоким потенциалом или высокой самоиндуктивностью имеет не только преимущество небольшого затухания, но и другое преимущество, имеющее огромное значение в телефонии, а именно очень небольшое искажение в том смысле, что все частоты, присутствующие в человеческом голосе, ослабляются почти в одинаковой степени. Следовательно, это линия без искажений. Пупин в патенте *US652230A* отмечает [11]: «Я разработал следующее общее правило: если n — количество катушек на длину волны, то для этой длины волны медленный проводник будет представлять собой обычную телефонную линию с точностью формулы:

$$\sin \frac{\pi}{n} \approx \frac{\pi}{n}. \quad (7)$$

Так, например, при $n = 16$

$$\frac{\pi}{16} = 0,196, \quad \sin \frac{\pi}{16} = 0,196 - 0,0122+,$$

Следовательно, $\sin \frac{\pi}{16}$ отличается от $\frac{\pi}{16}$ примерно на $\frac{2}{3} \%$ от значения $\frac{\pi}{16}$. Это правило было найдено мной теоретически и подтверждено с помощью экспериментов».

Для характеристики степени приближения проводника с нагрузочными катушками к обычной телефонной линии Пупин ввел характеристику, которую назвал «угловым расстоянием между двумя точками на ли-

нейном проводнике». Две точки на линейном расстоянии длины волны λ имеют угловое расстояние 2π . Из этого понятия следует, что эти точки на линейном расстоянии λ/n будут иметь угловое расстояние $2\pi/n$. Тогда приведенное выше условие (7) теперь можно сформулировать следующим образом: проводник с низкой скоростью напоминает обычный линейный проводник со степенью приближения, измеряемой соотношением синуса половины углового расстояния, пройденного катушкой, к половине самого углового расстояния. Это правило стало основой изобретения Пупина и позволило определиться со II типом медленного проводника (рис. 6б), который лучше приспособлен для коммерческого использования (уменьшения затухания электрических волн). Эти теоретические выводы были подтверждены результатами эксперимента, приведенного в статье.

Медленный проводник II типа (рис. 6б), Пупин назвал «проводником с реактивным сопротивлением». Этот проводник отличается тем, что имеет равномерно распределенные емкость, индуктивность и сопротивление вместо сосредоточенных емкости, индуктивности и сопротивления. Следовательно, проводник реактивного сопротивления представляет собой длинный электрический провод, имеющий по возможности равные источники реактивного сопротивления (индуктивности), расположенные последовательно с желательными равными интервалами. Разумно ожидать, что реактивный медленный проводник II типа будет работать как обычная однородная линия с той же индуктивностью, емкостью и сопротивлением на единицу длины при тех же условиях, при которых так работает медленный проводник I типа.

Для телефонии угловое расстояние между любыми двумя последовательными катушками должно в достаточной степени удовлетворять ранее приведенному условию для самой высокой частоты, что имеет важное значение при телефонной передаче речи. В тексте патента US652230A сказано [29], что катушки должны быть изготовлены, предпочтительно, без железных сердечников, чтобы максимально избежать гистерезиса и потерь тока Фуко, а также искажений тока. Если по каким-либо особым причинам требуются катушки небольших размеров на единицу индуктивности, то следует использовать железо, желательнее сталь самого высокого качества и максимально снизить намагниченность.

7. Теория распространения волн по неоднородным электрическим проводникам

Через две недели после подачи патентной заявки [11], почти перед самым Новым годом, 28 декабря 1899 г., Пупин выступил с обобщающим

докладом «Распространение волн по неоднородным электрическим проводникам» (англ. *Wave propagation over non-uniform electrical conductors*) на заседании Американского математического общества (AMS). Этот доклад позже, в 1900 г, в виде статьи был опубликован в трудах этого общества [12]. Статья называлась «Передача волн по неоднородным кабелям и линиям на большие расстояния» (*Wave Transmission over Non-uniform Cables and Long Distance Lines*). В работе Пупин рассмотрел одну модель однородного и две модели неоднородных проводников. Под неоднородным проводником понимался однородный проводник, в цепь которого включены секции индуктивных элементов, емкостей и резисторов по двум схемам. Основная задача этого исследования заключалась в установлении условий, при которых каждый из двух типов неоднородных проводников был бы эквивалентен соответствующему однородному проводнику, то есть определить частоты, для которых эти два проводника будут иметь примерно одинаковые длины волн и одинаковые коэффициенты затухания.

Сначала М. Пупин исследовал распространение волны с заданным периодом вдоль однородного линейного проводника, рис. 5. Проблему с математической точки зрения он сформулировал в виде уравнения в частных производных (3), которое получил в работе [10]. Однако граничные условия в этом уравнении были сформулированы другие, с учетом передающего и приемного устройств. Основная трудность при этом состояла в корректности математической формулировки этих граничных условий, необходимых для получения системы уравнений, которую можно было решить без особых трудностей.

Для формулировки двух граничных условий, одного на приемном, другого — на передающем устройстве, были введены L_0, R_0, C_0 и L_1, R_1, C_1 , которые соответственно являются индуктивностью, сопротивлением, емкостью передающего и приемного устройств. Каждое из них содержит конденсатор, последовательно соединенный со своей индуктивностью и сопротивлением. Граничные условия при этом выражаются следующим образом:

$$\begin{cases} -2 \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_{s=0} = (D_0 - h_0 i)_{s=0} & \text{у передающего устройства,} \\ +2 \left(\frac{\partial i}{\partial s} \right)_{s=l} = -(h_1 i)_{s=l} & \text{у приемного устройства,} \end{cases} \quad (11)$$

где $D_0 = ipC_0 E e^{ipt}$, $h_0 = C_0(-p^2 \lambda_0 + jpR_0)$, $h_1 = C_1(-p^2 \lambda_1 + jpR_1)$,

$$\lambda_0 = L_0 - \frac{1}{p^2 C_0}, \quad \lambda_1 = L_1 - \frac{1}{p^2 C_1}.$$

Физический характер проблемы предполагает следующее решение

$$i = K_1 \cos \mu \xi + K_2 \sin \mu \xi, \quad (12)$$

где $\xi = -s$, и K_1 и K_2 пропорциональны e^{-jpt} .

Уравнение (10) выполняется для всех значениях K_1 и K_2 , если

$$C(-p^2L + jpR) = -\mu^2 = -(\alpha + j\beta)^2.$$

Отсюда получим

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{1}{2}pC(\sqrt{p^2L^2 + R^2} + pL)}, \\ \beta &= \sqrt{\frac{1}{2}pC(\sqrt{p^2L^2 + R^2} - pL)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Когда pL значительно больше по сравнению с R , то $\alpha = p\sqrt{LC}$,

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (14)$$

В случае двойного проводника, где взаимная емкость велика по сравнению с емкостью каждого проводника с землей, в формулах следует заменить R и L на $2R$ и $2L$.

Граничные условия будут выполнены, если

$$K_1 = \frac{2\mu D_0}{F}, K_2 = \frac{h_1 D_0}{F}, \text{ где } F = (h_0 h_1 - 4\mu^2) \sin \mu l + 2\mu(h_0 + h_1) \cos \mu l.$$

Тогда (12) можно записать в виде

$$i = (2\mu \cos \mu \xi + h_1 \sin \mu \xi) \frac{D_0}{F}. \quad (15)$$

Выражение (15) представляет собой общее решение уравнения распространения волн заданного периода (10). Уравнение описывает простые гармонические затухающие волны. Наиболее важными элементами, которые входят в описание таких волн, являются длина волны λ и коэффициент затухания β . Их можно рассчитать: так как $\mu = \alpha + j\beta$, то имеем $\lambda = 2\pi/\alpha$ и коэффициент ослабления $e^{-\beta\xi}$. Очевидно, что β уменьшается по мере увеличения L . Высокое реактивное сопротивление на единицу длины означает небольшое затухание и низкую скорость распространения.

Это общее решение (15) для тока телефонной линии применимо для расчета свободных и вынужденных колебаний на линии передачи, оканчивающейся на ее концах с различными параметрами импеданса генератора и нагрузки.

После этого М. Пупин рассмотрел электрические колебания в неоднородных электрических проводниках первого и второго рода, рис. 8. Для этого типа проводников были определены условия, аналогичные (7), при которых они эквивалентны однородным проводникам.

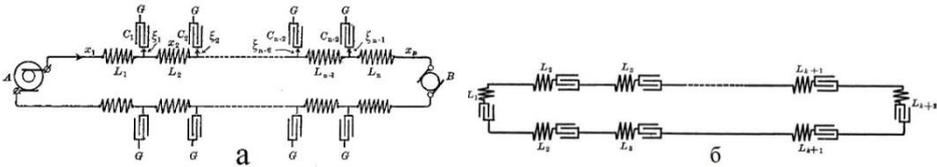


Рис. 8. Два типа неоднородных телефонных линий: а — I тип и б — II тип [12].

Fig. 8. Two types of non-uniform telephone lines: a - type I and b - type II [12]

Обозначим расстояние между двумя последовательными точками индуктивности, то есть точками, в которые вводятся катушки индуктивности, через l , и пусть длина волны, которая должна быть передана, равна λ . Тогда для определения условий, когда *неоднородные проводники эквивалентны своим соответствующим однородным проводникам*, вводится угол Φ такой, что

$$\frac{\Phi}{2\pi} = \frac{l}{\lambda}. \quad (16)$$

Угол Φ называется «угловым расстоянием между точками индуктивности для неоднородного проводника» или источниками индуктивности. Угловое расстояние 2π соответствует длине волны. Закон, который определяет степень эквивалентности между неоднородным проводником и соответствующим ему однородным проводником, теперь может быть сформулирован следующим образом: неоднородный проводник настолько же почти эквивалентен своему соответствующему однородному проводнику, если $\sin \Phi/2 \approx \Phi/2$.

Очевидно, что значение Φ обратно пропорционально длине волны, так что для данного расстояния между точками реактивного сопротивления степень эквивалентности уменьшается по мере уменьшения длины волны. Если волна сложной гармонической частоты, например, в телефонной связи, передается по неоднородному проводнику, то действие проводника будет различным для разных компонентов этой сложной гармонической волны. Если, однако, неоднородный проводник действует с достаточным приближением к однородному проводнику по направлению к наивысшей частоте этой комплексной волны, то его приближение к однородному проводнику будет еще выше для более низких частот и, следовательно, для всех остальных частот.

Нужно заметить, что теория М. Пупина имеет существенное отличие от теории Дж. Кэмпбелла. Из нее не следуют в явном или неявном виде аналитические выражения для определения индуктивности нагрузочных катушек и расстояния между ними. В таком виде теория М. Пупина вызывает некоторые затруднения при инженерных расчетах. Это подтверждается словами Френка Джеветта¹² [13]: «Однако следует отметить тот факт, что анализ проблемы Кэмпбеллом на самом деле более подробный, чем анализ Пупина, который привел его к формулировке правил проектирования нагрузочных катушек и их расстояний и которые с самого начала были единственными, применяемыми в этой стране. Этой единственной работой, выполненной в течение относительно короткого времени после его пребывания в компании *Bell*, Кэмпбелл продемонстрировал свои уникальные способности в математической физике, а также умение формулировать выводы в форме, которую инженер-разработчик мог бы использовать в практических приложениях». Для строительства загруженных линий в США использовались только формулы Кэмпбелла [14]. Кэмпбелл во время работы над проблемами дальней телефонной связи, попутно, изобрел свой знаменитый волновой фильтр.

8. Практические аспекты теории Пупина

Пупин впервые привлек внимание специалистов-электротехников к использованию нагрузочных катушек в телефонных линиях, когда он прочитал доклад «Распространение волн по неоднородным кабелям и воздушным линиям большой протяженности» (англ. *Wave Propagation over Non-Uniform Cables and Long Distance Air-Lines*) на собрании Американского института инженеров-электриков (*AIEE*) 19 мая 1900 года в Филадельфии. Доклад был опубликован в виде статьи [15], которая содержала теоретический материал по загрузке телефонных линий из его предыдущих докладов перед *AIEE* и, кроме этого, некоторые экспериментальные результаты, полученные на недавно построенной искусственной линии. Что касается Кэмпбелла, то он провел подобные испытания примерно годом ранее, а нагрузил реальный телефонный кабель за 8 месяцев до этого. Кэмпбеллом также были разработаны нагруженные схемы, которые были

¹² Джеветт Фрэнк Б. (*Frank Baldwin Jewett*, 05.09. 1879—11.18.1949) в 1898 году окончил Технологический институт Трупа (позже Калифорнийский технологический институт), получил докторскую степень по физике в 1902 году. С 1902—1904 гг. — преподаватель в Массачусетском технологическом институте в Кембридже. С 1904 года — сотрудник технического отдела *AT&T* в Бостоне. Первоначально помощник Кэмпбелла в исследованиях, связанных с телефонной передачей. Затем, в 1906 году, он сменил Кэмпбелла на посту директора исследовательской группы по передаче.

изготовлены для практического пользования за день до 19 мая, когда был прочитан доклад Пупина [16].

Завершающим аккордом Пупина в его исследованиях распространения волн по неоднородным электрическим проводникам стала подача 28 мая 1900 г. патентной заявки на «Способ уменьшения затухания электрических волн» (англ. *Art of reducing attenuation of electrical waves*). Патент US652231A на это изобретение был получен 19 июня 1900 г. [17]. Этот патент стал ответом на требования Патентного ведомства о делении формулы изобретения патентной заявки, поданной 14 декабря 1899 г., на устройство и способ. Полученные Пупином патенты US652230A и US652231A содержат одни и те же рисунки, а также большую часть общего текста и отличаются только формулами изобретений. Формула изобретения в патенте US652231A сформулирована одним абзацем, следующим образом [17]:

«Способ уменьшения постоянной затухания однородного волновода, который заключается в увеличении индуктивности проводника в достаточной степени, чтобы обеспечить требуемое уменьшение постоянной затухания, путем распределения вдоль него источников индуктивности в периодически повторяющихся точках, при этом расстояние между последовательными точками должно быть таким, чтобы приблизительно сохранить его характер как однородного проводника по отношению к передаваемым волнам, по существу, как описано».

В патентах US652230A и US652231A дан расчет нагрузочных катушек для воздушной телефонной линии и подводного кабеля на основе теории Пупина. Приведем пример расчета воздушной линии с нагрузочными катушками.

Предположим, что требуется передавать речь по телефону на расстоянии 3000 миль по проводу, натянутому на столбах. Общий коэффициент затухания β на этом расстоянии должен быть примерно таким же, как и в лучших сетях Нью-Йорк — Чикаго американской телефонной компании *Bell*, что соответствует без утечки току около $i = e^{-1,5}$ для самой высокой частоты, имеющей значение в речи, а именно около 1,5 кГц. Предлагается сначала указать условия, которые дадут коэффициент затухания при $i = e^{-1,5}$ при длине в 3000 миль.

Величина тока в любой точке линии определяется по формуле $i = I_0 e^{-l\beta}$, где I_0 — начальный ток, l — расстояние от начальной точки линии до точки, в которой должен быть определен ток i . Тогда приравняв токи $e^{-3000\beta} = e^{-1,5}$ получим $3000\beta = 1,5$.

Предположим, что используется медный провод с сопротивлением 4 Ом на милю и что дополнительное сопротивление, вносимое катушками

индуктивности, составляет 0,6 Ом на милю. Полное сопротивление на милю тогда будет 4,6 Ом. Когда реактивное сопротивление на милю достаточно велико по сравнению с активным сопротивлением, для определения индуктивности можно воспользоваться упрощенной формулой для коэффициента затухания:

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (17)$$

Из (17) видно, что β не зависит от частоты и, следовательно, проводник с реактивным сопротивлением не имеет искажений. Пропускная способность C для провода 4 Ом на милю составляет 0,01 мФ, провод подвешивается так, как подвешиваются междугородние воздушные линии американской телефонной компании *Bell*. Индуктивностью провода можно пренебречь, и далее будем рассматривать L исключительно из-за индуктивности — основного параметра катушек индуктивности. Значение индуктивности, которое будет удовлетворять предполагаемым условиям, может рассчитываться по приведенной выше формуле следующим образом:

$$3000\beta = 3000 \frac{4,6}{2} \frac{1}{10^3} \sqrt{\frac{0,01}{L}} = 1,5. \quad (18)$$

Из (18) получим величину индуктивности одной нагрузочной катушки $L = 0,2$ Гн/миля.

В телефонии самая высокая частота, необходимая для передачи членораздельной речи, составляет около 1,5 кГц. Это соответствует верхним гармоникам или обертонам в некоторых согласных звуках. Следовательно, длина волны на этой частоте рассчитывается для данного проводника вместе с нагрузочными катушками, которые имеют определенное общее сопротивление, емкость и индуктивность, которые, как предполагается, равномерно распределены. *Это предположение приблизительно верно, как показал Пупин, в проводнике, имеющем не менее восьми или десяти катушек на длину волны [18].*

В нашем примере вычислим длину волны для самой высокой частоты, которую следует учитывать, а именно, 1,5 кГц.

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} = \frac{2\pi}{p\sqrt{LC}} = \frac{10^3}{1500\sqrt{0,2 \times 0,01}} \approx 15 \text{ миль}. \quad (19)$$

Достаточно высокая степень приближения к единой телефонной линии будет получена, если мы будем использовать 15 катушек на длину волны самой высокой частоты. Это одна катушка на милю с индуктивностью $L = 0,2$ Гн и сопротивлением $R = 0,6$ Ом.

Если увеличение самоиндукции телефонной линии производится при помощи специальных катушек индуктивности, то эти включаемые в нее элементы называют «пупиновские катушки» (их индуктивность 1—140 мГн), а саму линию с нагрузочными катушками в честь Пупина называют пупинизированной, рис. 9.

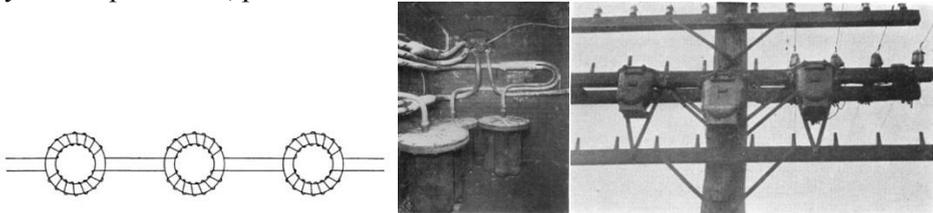


Рис. 9. Схема нагружения обмоток катушки и способ подключения в линию.
Подземный люк с нагрузочными катушками. Нагрузочные катушки,
размещенные на открытой проводной линии.

Fig. 9. Diagram of loading coil windings and method of connecting into a line.
Underground manhole containing loading coils. Loading coils placed on an open wire line

Процесс установки катушек на линии связи назван «пупинизацией». Пупинизированная линия состоит из ряда последовательно соединенных звеньев. Расстояние между двумя соседними катушками получило название шага пупинизации, который лежит в интервале 0,3—2 км.

9. Компромисс в патентном соперничестве Дж. Кэмпбелла и Майкла Пупина

Компания *AT&T* была озадачена, когда узнала о получении Майклом Пупином патента на катушку индуктивности для увеличения самоиндукции телефонной линии. В мае 1900 года Кэмпбеллу стало известно о претензиях профессора Колумбийского университета Майкла Пупина на приоритет в изобретении нагрузочных катушек для телефонных линий. *AT&T* повела судебную тяжбу с Пупиным в отношении его претензий. Хотя Пупин и получил первым патент, но Кэмпбелл к этому времени уже провел практические демонстрации, прежде чем Пупин подал заявку на получение патента (14 декабря 1899 г.). Задержка Кэмпбелла в подаче заявки произошла из-за низкой квалификации сотрудников юридического отдела компании *Bell*, отвечавших за ее оформление. Нужно заметить, что патенты Дж. Кэмпбелла и М. Пупина очень отличаются друг от друга, как по конструкции нагрузочных катушек, так и по схемам их включения в телефонную линию.

Патент Пупина содержал формулы расчета индуктивных элементов линии, хотя менее точные, чем ранее полученные Кэмпбеллом и не приве-

денные в его заявке. Это ослабляло позиции *AT&T*, которая могла быть обвинена в неполном раскрытии сути изобретения. Опасаясь, что существует опасность того, что спор может закончиться объявлением непатентоспособности изобретения Кэмпбелла, компания *Bell* решила купить опцион¹³ на патенты Пупина за \$185000 плюс \$15000 в год на 17 летний срок действия патентов. К январю 1901 г. Пупину было выплачено \$ 200000.

Компания *AT&T* благодаря покупке патентов Пупина лишила потенциальных конкурентов возможности воспользоваться новыми технологиями и монополизировала технологии по приобретенным двум патентам, которые были ей необходимы для постройки телефонных линий на большие расстояния.

В *AT&T*, невзирая на покупку патентов, продолжали совершенствовать нагрузочные индуктивные технологии и проводить исследования свойств пупинизированных линий под руководством Дж. Кэмпбелла. В 1903 году он опубликовал некоторые результаты [20], среди которых следует выделить обнаруженный частотно-зависимый эффект таких линий. Этот эффект заключается в том, что линии Пупина имеют четко выраженную критическую частоту, которая проявляется во внезапном изменении характеристик затухания. Ниже этой частоты затухание мало и зависит только от паразитных потерь кабеля. Если эти потери равны нулю, а частота ниже критической, то оно также равно нулю. Если же затухание большое и частота выше критической, то оно практически не зависит от потерь в кабеле. Переход на критическую частоту может быть очень резким. Критическая частота определяется расстоянием между катушками и соответствует длине волны равной удвоенному расстоянию между ними.

Полученный результат объясняет тот факт, почему не удалось получить качественную связь на трансконтинентальных пупинизированных телефонных линиях. По таким кабелям можно передавать только ограниченный диапазон частот, что и является их основным недостатком.

В апреле 1904 года спор, возникший между двумя учеными, в конечном счете был решен в пользу Пупина. Основанием явилось то, что Пупин запатентовал свое изобретение раньше, чем Кэмпбелл. В 1917 году закончилась монополия *AT&T* на нагрузочные технологии, и платежи Пупину прекратились. Он к этому времени получил в общей сложности \$ 455000.

Устройства загрузки телефонных линий оказались весьма ценным активом для компании *Bell*. Технический документ, опубликованный в

¹³ Опцион — это договор, который дает право, но не обязанность купить или продать какой-либо актив (акцию, фьючерс, товар и т. д.) по фиксированной цене в течение жизни опциона или в определенный момент времени.

Трудах *AIEE* в 1926 году, показал, что нагрузочные катушки на тот момент позволили сэкономить для *AT&T* около \$100 000 000.

Наиболее значимыми последствиями спора за нагрузочные технологии явилось то, что компания *Bell* осознано выбрала путь освоения наукоемких технологий и более агрессивного поиска патентов.

После теоретических и экспериментальных исследований, проведенных Дж. Кэмпбеллом и М. Пупином, ситуация в вопросе дальнего телефонирования изменилась. Для искусственного увеличения индуктивности телефонных линий связи стали широко использовать специальные катушки индуктивности, включаемые в линию через определенные промежутки последовательно с проводами, рис. 9. Однако на трансконтинентальных телефонных линиях, как уже было сказано, получить качественную связь путем пупинизации линии не удалось, здесь нужны были другие технологии, чем в дальнейшем и занялась компания *AT&T*.

10. Горечь Хевисайда

Прис не допустил, чтобы предложение Хевисайда о загрузке было опробовано на междугородних телефонных линиях в Великобритании в 1890-х годах, а также отговорил частные кабельные компании от ее применения на подводных кабелях, где в любом случае механические трудности затрудняли ее использование. В то время как в США группа инженеров *AT&T* подхватила идею Хевисайда и к 1899 году запустила загруженную телефонную линию. Загрузка оказалась очень успешной и позволила построить работоспособные междугородние телефонные линии и подземные кабели за небольшую часть их прежней стоимости.

Профессор физики Колумбийского университета Майкл Пупин получил патенты на индуктивную загрузку в 1900 году, а затем продал на них права при несколько сомнительных обстоятельствах *AT&T*. После этого Хевисайд стал презирать Пупина и *AT&T*. Для правовой защиты у него было мало средств [20].

Математик Норберт Винер¹⁴ из Массачусетского технологического института позже поддержал принципиальную в данной ситуации позицию Хевисайда. Он осудил *AT&T* и Пупина как воров и в 1959 году представил Хевисайда (слегка замаскированного) героем довольно драматичного романа «Искунитель» (англ. *The Tempter*) [21, 22]. Винер даже пытался заин-

¹⁴ Норберт Винер (англ. *Norbert Wiener*, 26.11.1894—18.03.1964) — американский математик, один из основоположников кибернетики (считается «Отцом кибернетики») и теории искусственного интеллекта.

тересовать кинорежиссера Орсона Уэллса¹⁵ в создании фильма о Хевисайде, но фильм не был создан, рис. 10 [23].

Летом 1960 года Норберт Винер посетил Москву, где с 27 июня по 6 июля проходил 1-й Международный конгресс ИФАК (*Международная федерация по автоматическому управлению*).

30 июня 1960 года Винер дал интервью «Литературной газете» под заголовком «Кибернетика и литература». В интервью он так рассказал о своей литературной деятельности и романе «Искуситель» [24]:

«В мои свободные часы я — писатель. Это не только отдых — формирование характеров под влиянием различных жизненных обстоятельств, судьбы людей всегда интересовали меня. Мой первый роман “Искуситель” вышел в ноябре 1959 года. Он посвящен типичному для американской действительности конфликту между идеалами ученого и его желанием сделать карьеру. Эпиграф романа: “Тем ученым, которые предпочитают искать истину, а не земные блага”. В центре повествования — судьба инженера Грегори Джеймса, родившегося в России, в Одессе, и до первой мировой войны эмигрировавшего в Америку. Я не случайно выбрал своим героем выходца из России. Дело в том, что Россия — страна мне очень близкая. Мой отец, Лев Винер, родился в Белостоке и в 1880 году эмигрировал в Америку. Всю свою жизнь он был горячим пропагандистом русской культуры. Преподавая русский язык в Гарвардском университете, он проделал поистине титаническую работу: перевел на английский язык многотомное собрание сочинений Льва Толстого...»

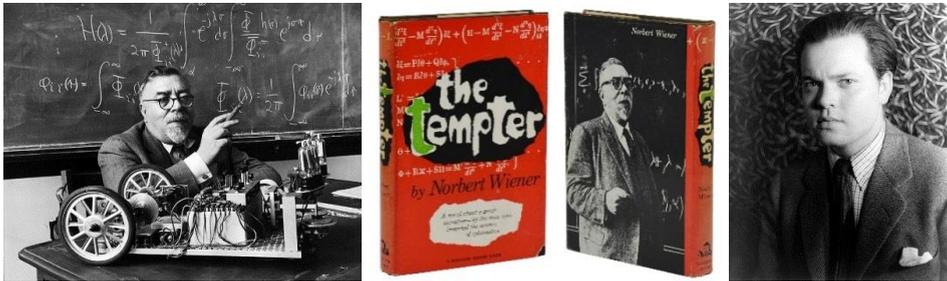


Рис. 10. Ноберт Винер — отец кибернетики. Общий вид издания романа «Искуситель», Ноберта Винера, вышедшего в США в 1959 г. Американский кинорежиссер Орсон Уэллс (1937 г.)

Fig. 10. Norbert Wiener is the father of cybernetics. General view of publication of novel “The Tempter” by Norbert Wiener, published in the USA in 1959. American filmmaker Orson Welles (1937)

¹⁵ Джордж Орсон Уэллс (англ. *George Orson Welles*, 06.05.1915—10.10.1985) — американский кинорежиссер, актер, сценарист, который работал в театре, на радио и в кино. Наиболее примечательные картины режиссера: «Гражданин Кейн», «Печать зла», «Процесс» и «Леди из Шанхая». Уэллс занимает 16-ю строку в списке Американского института киноискусства среди величайших мужчин — легенд экрана классического голливудского кино.

В последние годы жизни Хевисайду было горько, вероятно, из-за того, что ему отказали в признании его авторства на индуктивную загрузку телефонной линии, на котором считал своим законным правом заработать.

По поводу всей этой ситуации автор монографии о Хевисайде [25] сказал: «...Он является филантропом и его задача — приносить пользу людям, даже тем, кто получает от этого выгоду». На самом деле Хевисайд был очень горд тем, что его идеи получили широкое признание как в физике, так и в электротехнике, из которой первоначально возникла его работа.

11. Заключение

По иронии судьбы Дж. Кэмпбелл проиграл битву за приоритет патента на нагрузочные катушки для телефонных линий, так как отложил подачу патентной заявки до завершения своих экспериментов. В то время как М. Пупин не разрабатывал катушки и не тестировал эту технологию на реальных телефонных линиях, как это сделал Кэмпбелл. Невзирая на это М. Пупин первым подал заявки на изобретение и получил два американских патента *US652230A* и *US652231A* на загрузку телефонной линии катушками индуктивности, что ознаменовало начало важной эры в области телефонии. На тот период времени не было ни одной проблемы в области теоретической электротехники и инженерной электротехники, которая потребовала бы таких больших знаний, технических способностей и усердия со стороны тех, кто занимался разработкой и применением индуктивных нагрузок.

Во многих случаях стоимость проводников большого диаметра, а также их чрезмерный вес и объем были бы практически непомерно высокими, если бы не экономия на размерах провода, которая обеспечивается изобретением Пупина.

Пупиновские катушки нашли особенно широкое применение на местных телефонных сетях США. В 1899 году была пущена в коммерческую эксплуатацию пупинизированная телефонная линия между Филадельфией и Чикаго (678 миль или 1222 км), а через два года компания *AT&T* построила самую длинную телефонную линию по той же технологии между Нью-Йорком и Денвером (1631 миль или 2625 км). К 1925 году примерно 1,25 миллиона нагрузочных катушек использовалось на более чем 3 миллионах км (1,8 миллиона миль) проводных цепей. Наличие катушек улучшает прохождение сигнала в диапазоне телефонных частот 0,3—3,4 кГц, однако на более высоких частотах прохождение сигнала значительно ухудшается, поэтому на телефонных линиях с использованием высокочастотных технологий катушки Пупина не устанавливаются.

На абонентских сетях России пупинизация применяется достаточно редко, например, современная сеть МГТС имеет около 5 % пупинизиро-

ванных кабелей. В связи с этим обязательным условием применения любых технологий *xDSL* (семейство технологий абонентского доступа типа «точка — точка») на существующих абонентских линиях является удаление пупиновских катушек. Это связано с тем, что пупиновские катушки резко нарушают однородность медной пары. В этом случае пара проводов практически превращается в идеальный фильтр нижних частот, затухание которого резко возрастает на высоких частотах [26].

В настоящее время в России в оперативном звене управления для обеспечения связи на большие расстояния используется пупинизированный кабель типа П-270, в полумуфты которого вмонтированы катушки индуктивности. Шаг пупинизации этого кабеля — 250 м, индуктивность катушки — 1,3 мГн, что позволяет его использовать в диапазоне до 60 кГц.

Нужно отметить, что без какой-либо формы *усиления электрического сигнала*. телефонная связь, даже с использованием нагрузочных катушек, была бы невозможна между далеко расположенными городами, в таких крупных странах, как Соединенные Штаты.

Список литературы

1. 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.
2. Lagrange L. Recherches sur la nature et la propagation du son. Oeuvres de Lagrange. V. I. Paris, 1788. 512 p.
3. Pupin Michael. From immigrant to inventor. New York, London : Charles Scribner's sons. 1949. P. 189.
4. Лагранж Ж. Аналитическая механика. Т. I. М.—Л. : Гостехиздат, 1950. 594 с.
5. Lewis Campbell and William Garnett. The Life of James Clerk Maxwell. London : Macmillan & Co., 1882. 662 p.
6. Martin T. C. Francis Bacon Crocker. An Educator Who is Also an Inventor Engineer // Scientific American. January 13, 1912. Vol. 145, no. 2. P. 48.
7. Pupin M. I. Apparatus for Telegraphic or Telephonic Transmission. Patent US6519346A. Application filed December 14, 1893. Patented May 8, 1904.
8. Pupin M. I. On Electrical Oscillations of Low Frequency and their Resonance // American Journal of Science. Part 1. April 1893. Vol. 45, no. 268. P. 325—334. Part 2. May 1893. Vol. 45, no. 269. P.420—429. Part 3. June 1893. Vol. 45, no. 270. P. 503—520.
9. Pupin M. I. Transatlantic communication by means of the telephone // Telephony. June 1901. Vol. 1, no. 6. P. 188—190.
10. Pupin M. I. Propagation of long electrical waves // Transactions of the AIEE. 1899. Vol. 16. P. 93—142.
11. Pupin M. I. Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves and Apparatus Therefore. Patent US652230A. Application filed December 14, 1899. Patented June 19, 1900.
12. Pupin M. I. Wave propagation over non-uniform electrical conductors // Transactions American Mathematical Society (AMS). July 1900. Vol. 1, no. 3. P. 259—286.

13. Jewett F. B. Dr. George A. Campbell // *The Bell System Technical Journal*. October 1935. Vol. 14, no. 4. P.554.
14. A. R. A Pioneer of Long-Distance Telephony // *Nature*. Oct. 1, 1938. Vol.142, no. 3596. P. 591.
15. Pupin M. I. Wave Propagation over Non-Uniform Cables and Long Distance AirLines // *Transactions of the AIEE*. 1900. Vol. 17. P. 445—507.
16. Brittain James E. The Introduction of the Loading Coil : George A. Campbell and Michael I. Pupin // *Technology and Culture*. January 1970. Vol. 11, no. 1. P. 52.
17. Pupin M. I. Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves. Patent US652231A. Application filed May 28, 1900. Patented June 19, 1900.
18. Crocker Francis B. “Pupinized” Telephone Lines // *Scientific American Supplement*. June 3, 1916. Vol. 81, no. 2109. P. 359.
19. 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.
20. Hunt B. J. Oliver Heaviside A first-rate oddity // *Physics Today*. November 2012. P.48—54.
21. Wiener Norbert. *The Tempter*. New York : Random House. 1959. 242 p.
22. Винер Норберт — Искуситель.
URL: https://royallib.com/book/viner_norbert/iskusitel.html (29.11.2021).
23. Nahin P. J. *Oliver Heaviside : The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age*, 2nd ed. Baltimore : Johns Hopkins U. Press, 2002. P. 21.
24. Фет Я. И. Рассказы о кибернетике. Норберт Винер в Москве.
URL: <https://www.modernproblems.org.ru/science/214-cybernet.html?start=4> (29.11.2021).
25. Болотовский Б. М. *Оливер Хевисайд. 1850—1925 / Отв. ред. акад. В. Л. Гинзбург*. М. : Наука, 1985. 260 с.
26. Пупиновские катушки как источник проблем. Сайт компании «СвязьКомплект».
URL: <http://www.skomplekt.com/technology/reflect/reel.htm> (30.11.2021).

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.

Michael Pupin and Pupinization of Telephone Lines

V. M. Pestrikov

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

Received: May 22, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The scientific ways that led the American radio engineer Michael Pupin to the development of telephone technologies aimed at improving the quality of an audio signal when it is transmitted over long distances are considered. Pupin's important inventions in the field of long-distance telephony are investigated. His theories of using inductors to reduce the attenuation of the transmitted telegraph and telephone signal over the cable by artificially increasing its inductance are described. Attention is paid to the dispute between Pupin and Campbell in the primacy of the invention of load coils and its most significant consequences.*

Keywords: *long-distance telephone communication, Michael Pupin, Lagrange, analytical mechanics, loaded conductor, pupinization, patent rivalry between Pupin and Campbell.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Michael Pupin and Pupinization of Telephone Lines," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 260–293, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.20. (In Russ.).

References

- [1] 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. (In Russ.).
- [2] L. Lagrange, *Recherches sur la nature et la propagation du son. Oeuvres de Lagrange*, vol. I, Paris, 1788.
- [3] M. Pupin, *From immigrant to inventor*. New York, London: Charles Scribner's sons. 1949.
- [4] J. Lagrange, *Analytical Mechanics*, vol. I, Moskow – Leningrag: Gostekhizdat, 1950. (In Russ.).
- [5] L. Campbell and W. Garnett. *The Life of James Clerk Maxwell*. London: Macmillan & Co. 1882.
- [6] T. C. Martin, "Francis Bacon Crocker," *Scientific American*, vol. 106, no. 2, pp. 43–43, Jan. 1912, doi: 10.1038/scientificamerican01131912-43.
- [7] M. I. Pupin, "Apparatus for Telegraphic or Telephonic Transmission." Patent US6519346A. Application filed December 14, 1893. Patented May 8, 1904.
- [8] ► M. I. Pupin, "Electrical oscillations of low frequency and their resonance," *American Journal of Science*, vol. s3-45, no. 268, pp. 325–334, Apr. 1893, doi: 10.2475/ajs.s3-45.268.325.
► M. I. Pupin, "On electrical oscillations of low frequency and their resonance," *American Journal of Science*, vol. s3-45, no. 269, pp. 420–429, May 1893, doi: 10.2475/ajs.s3-45.269.420.

- M. I. Pupin, "Electrical oscillations of low frequency and their resonance," *American Journal of Science*, vol. s3-45, no. 270, pp. 503–520, Jun. 1893, doi: 10.2475/ajs.s3-45.270.503.
- [9] M. I. Pupin, "Transatlantic communication by means of the telephone," *Telephony*, vol. 1, no. 6, pp. 188–190, June 1901.
- [10] M. I. Pupin, "Propagation of Long Electrical Waves," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XVI, pp. 91–142, 1899, doi: 10.1109/t-aiee.1899.4764066.
- [11] M. I. Pupin, "Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves and Apparatus Therefore." Patent US652230A. Application filed December 14, 1899. Patented June 19, 1900.
- [12] M. I. Pupin, "Wave propagation over non-uniform electrical conductors," *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 1, no. 3, pp. 259–286, 1900, doi: 10.1090/s0002-9947-1900-1500536-7.
- [13] F. B. Jewett, "Dr. George A. Campbell," *Bell System Technical Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 553–557, Oct. 1935, doi: 10.1002/j.1538-7305.1935.tb00701.x.
- [14] A. R., "The Collected Papers of George Ashley Campbell, Research Engineer of the American Telephone and Telegraph Company," *Nature*, vol. 142, no. 3596, pp. 591–591, Oct. 1938, doi: 10.1038/142591a0.
- [15] M. I. Pupin, "Wave Transmission over Non-Uniform Cables and Long-Distance Air-Lines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XVII, pp. 445–512, 1900, doi: 10.1109/t-aiee.1900.4764144.
- [16] J. E. Brittain, "The Introduction of the Loading Coil: George A. Campbell and Michael I. Pupin," *Technology and Culture*, vol. 11, no. 1, pp. 36–57, 1970, doi: 10.2307/3102809.
- [17] M. I. Pupin, "Art of Reducing Attenuation of Electrical Waves." Patent US652231A. Application filed May 28, 1900. Patented June 19, 1900.
- [18] F. B. Crocker, "'Pupinized' Telephone Lines," *Scientific American*, vol. 81, no. 2109supp, pp. 359–359, Jun. 1916, doi: 10.1038/scientificamerican06031916-359supp.
- [19] G. A. Campbell, "XXX. On loaded lines in telephonic transmission," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 5, no. 27, pp. 313–330, Mar. 1903, doi: 10.1080/14786440309462928.
- [20] B. J. Hunt, "Oliver Heaviside: A first-rate oddity," *Physics Today*, vol. 65, no. 11, pp. 48–54, Nov. 2012, doi: 10.1063/pt.3.1788.
- [21] N. Wiener, *The Tempter*. New York: Random House, 1959.
- [22] "Wiener Norbert – Tempter." URL: https://royallib.com/book/viner_norbert/iskusitel.html (29.11.2021)
- [23] P. J. Nahin, *Oliver Heaviside: The Life, Work, and Times of an Electrical Genius of the Victorian Age*, 2nd ed., Baltimore: Johns Hopkins U. Press, 2002.
- [24] Ya. I. Fet, *Tales about cybernetics. Norbert Wiener in Moscow*
URL: <https://www.modernproblems.org.ru/science/214-cybernet.html?start=4> (29.11.2021). (In Russ.).
- [25] B. M. Bolotovskiy, *Oliver Heaviside. 1850–1925*. Ed. V. L. Ginzburg, Moscow: Nauka, 1985. (In Russ.).
- [26] "Pupin's coils as a source of problems."
URL: <http://www.skomplekt.com/technology/reflect/reel.htm> (30.11.2021). (In Russ.).

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.