

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА: КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ЕЕ СТАНОВЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВООБРАЗУЮЩЕЙ ФИЗИКО–ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И НАУЧНО–ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА ЧЕЛОВЕЧЕСТВА

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, E-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Приведено короткий огляд основних досягнень людства в області генерування, передачі, прийому та посилення високочастотних електромагнітних коливань у мікрометровому – метровому діапазонах довжин хвиль, що відносяться до такої передової галузі науки і техніки як радіоелектроніка.

Приведен краткий обзор основных достижений человечества в области генерирования, передачи, приема и усиления высокочастотных электромагнитных колебаний в микрометровом – метровом диапазонах длин волн, относящихся к такой передовой отрасли науки и техники как радиоэлектроника.

ВВЕДЕНИЕ

Сейчас для человечества наступило время великого прогресса науки и техники. Путь к современному уровню научного познания человеком Природы был усеян многочисленными научно-техническими достижениями и открытиями в разных областях знаний. К числу этих замечательных достижений человеческого разума в области электричества относится такая передовая научно-техническая отрасль как радиоэлектроника. Согласно [1] термин "радиоэлектроника" обозначает область науки и техники, изучающую передачу и преобразование информации при помощи электромагнитных колебаний радиочастотного диапазона и управления движением электронов. Напомним и то, что термин "радио" происходит от латинского слова "radiare", означающего "излучать лучи", то есть применительно к нашему радиоэлектронному случаю беспроводную передачу информации на расстояние посредством электромагнитных волн (радиоволн) [1]. О научно-технической значимости для современного общества радиоэлектроники известный советский радиотехник, академик АН СССР А.И. Берг в середине 20-го столетия написал следующее [2]: "...Использование атомной энергии стало возможным в значительной мере благодаря применению радиоэлектронных методов в физике". Радиоэлектронике уделялось и уделяется в настоящее время во всех странах мира исключительное внимание. Как специалисты, так и государственные менеджеры всех рангов понимают, что радиоэлектроника является передовым важнейшим форпостом на пути научно-технического прогресса в мирных и военных областях человеческого общества. Рассмотрим вкратце всемирную историю изобретения и создания основных радиоэлектронных способов и устройств получения, передачи, приема и усиления электромагнитных колебаний радиочастотного диапазона, сыгравших значительную роль в развитии многих наших отраслей науки и техники.

1. РОЖДЕНИЕ БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

Начнем с того, что возможное существование в земных и космических условиях электромагнитных

волн (возмущений электромагнитного поля) в 1864 году теоретически предсказал создатель теории электромагнитного поля великий английский физик Д.К. Максвелл [3], а в 1888 году выдающийся немецкий физик Г.Р. Герц экспериментально с помощью созданного им высоковольтного излучающего и приемного радиотехнического оборудования (вибратора и резонатора Герца) в лабораторных условиях открыл и изучил в воздушном пространстве предсказанные Д.К. Максвеллом электромагнитные волны (волны или лучи Герца) [4, 5]. Ни Г.Р. Герц, ни тем более Д.К. Максвелл не смогли предложить людям и соответственно человеческому обществу в целом пути практического применения такого нового вида материи как электромагнитное поле, служащее носителем электромагнитной энергии и одним из проявлений которого являются электрические и магнитные силы, действующие на размещенные в нем электрические заряды. Несколько нарушая хронологию событий радиотехнического характера, отметим, что материальность электромагнитных волн была доказана выдающимся русским физиком-экспериментатором П.Н. Лебедевым, впервые измерившим опытным путем в 1899 году давление солнечного света на твердые тела, длина $\lambda_{\text{ЭМВ}}$ когерентных электромагнитных волн которого измеряется долями микрона [6]. Его фундаментальная работа "Опытное исследование светового давления" была опубликована в ведущем немецком журнале "Annalen der Physik" в 1901 году [6].

После открытия волн Герца к проблеме их практического использования подключился наш соотечественник – профессор кафедры физики Петербургского электротехнического института А.С. Попов [4]. В 1889 году он на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества (РФХО) продемонстрировал физические опыты с электромагнитными волнами: простейший вибратор Герца [4] вырабатывал высокочастотные электромагнитные колебания, а простейший резонатор Герца [4] их через воздух воспринимал на расстоянии в несколько метров. По роду своей служебной деятельности А.С. Попов в этом же году для офицеров Балтийского военноморского флота провел цикл лекций на тему "Новей-

шие исследования о соотношении между световыми и электрическими явлениями". Данные лекции, имевшие большой успех, сопровождались демонстрацией известных опытов Г.Р. Герца. После них (этих лекций) практический интерес к волнам Герца проявило и морское министерство России. Один из его архивных циркуляров того времени гласил [6]: "...Опыты, проведенные германским профессором Герцем в доказательство тождественности электрических и световых явлений, представляют большой интерес не только в строго научном смысле, но также и для уяснения вопросов электротехники". Пропагандируя открытие Г.Р. Герца, которое указывало лишь на потенциальную возможность использования электромагнитных волн для передачи без проводов на расстояние электрических сигналов, А.С. Попов методично шаг за шагом решает задачу их (волн Герца) технического применения. В 1894 году его заинтересовал прибор, изобретенный французским физиком Э. Бранли в 1890 году и названный когерером [6] (это название произошло от латинского "*cohaerentia*" – "сцепление, связь" [1]). Этот прибор представлял собой стеклянную трубочку, заполненную металлическими (железными) опилками. Когерер являлся своеобразным полупроводником: до воздействия на него электромагнитных колебаний его электрическое сопротивление было большим (до единиц МОм), а после воздействия – малым (до десятков Ом) [6]. Это свойство данного когерера, включенного в электрическую цепь приемника радиоволн, было связано с поведением его опилок: под действием внешнего переменного электромагнитного поля радиоволн опилки слипались, их электрическое сопротивление уменьшалось и электрический ток в цепи когерера резко возрастал. После прекращения электромагнитного воздействия слипание металлических опилок и уменьшение их электрического сопротивления сохранялось часами (по наблюдениям самого Э. Бранли до 24 часов [6]). Привести опилки и соответственно когерер в исходное практически непроводящее состояние можно было слабым механическим ударом по стенке его стеклянной трубочки.

Данное свойство когерера, свидетельствующее о его высокой чувствительности к переменному электромагнитному полю, с последующей модернизацией этого устройства путем электромеханического встряхивания в нем металлических опилок и было использовано А.С. Поповым 7 мая 1895 года при демонстрации на заседании Физического отделения РФХО работы сконструированного им первого радиотехнического прибора [7], содержащего разнесенные на расстояние радиопередатчик и радиоприемник. Электрическая схема примененного в этот день А.С. Поповым радиопередатчика и радиоприемника, осуществивших первую в мире беспроводную электросвязь, приведена на рис.1. В данной схеме в качестве радиопередатчика А.С. Попов использовал искровой генератор, разработанный Г.Р. Герцем [4]. В этом генераторе (вибраторе Герца) источником высокого электрического напряжения служила индукционная катушка 2 (катушка Румкорфа) с механическим прерывателем тока 3. Прерыватель (ключ) 3 периодически замыкал

и размыкал электрический ток первичной обмотки катушки 2, обусловленный разрядом источника питания 1. При этом во вторичной повышающей обмотке катушки 2 возникали высоковольтные импульсы электрического напряжения, заряжающие металлические шары воздушного искрового разрядника 4. Каждый такой импульс напряжения электрически пробивал предварительно настроенный двухэлектродный шаровой разрядник 4, в воздушном искровом промежутке которого протекал затухающий по экспоненте синусоидальный импульс тока [4]. Временные параметры этих затухающих токовых колебаний определялись электрическими параметрами (емкостью и индуктивностью) передающего колебательного контура, состоящего из металлических шаров искрового разрядника 4 и передающей проволочной антенны 5. В связи с тем, что эти токовые колебания в передающем контуре вибратора Герца достигали значений частоты порядка 100 МГц, то он (этот контур) излучал в окружающее воздушное пространство сферические радиоволны (длина электромагнитных волн $\lambda_{ЭМВ}$ при этом составляла порядка 3м [4]).

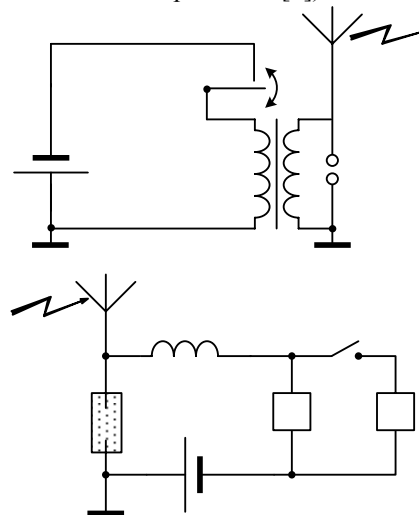


Рис. 1. Схема радиопередатчика и радиоприемника А.С. Попова при первой в мире беспроводной электросвязи

В своем приемном устройстве (радиоприемнике) А.С. Попов оригинально применил электрический звонок в качестве регистратора поступающего в приемную проволочную антенну 6 приемного колебательного контура электрического сигнала и одновременно автомата для приведения чувствительного к электрическим колебаниям когерера 7 в исходное высокоомное и непроводящее ток состояние. Приемная антенна 6 у А.С. Попова была выполнена в виде вертикально размещенной металлической проволоки длиной 2,5 м [6]. Когерер 7 представлял из себя горизонтально расположенную стеклянную трубку с двумя круглыми торцевыми металлическими контактными пластинками, разъединенными слоем железных опилок. Под действием высокочастотных токов, наводимых вибратором Герца в приемной антенне 6, металлические опилки в когерере 7 слипались (спекались) и замыкали электрическую цепь с индуктивностью 8, источником питания 12 и электрическим реле

9, контакты 10 которого включали электрический звонок 11. Молоточек звонка 11 ударял по стеклянному корпусу когерера 7 и встряхивал в нем железные опилки, что приводило к нарушению их хорошей электропроводимости и приведению когерера 7 в исходное запирающее электрический ток состояние.

Используя указанный прибор, А.С. Попов в 1895 году мог проводить физические опыты по передаче и приему электромагнитных волн на расстояние до 60 м [6]. Летом этого же года радиоприемник его прибора был использован для регистрации электромагнитных возмущений в земной атмосфере, вызванных сильноточными грозовыми разрядами (молниями). При этом А.С. Попов с помощью своего радиоприемника отмечал атмосферные грозовые разряды на расстоянии до 25 верст (около 27 км). Поэтому вначале радиоприемник А.С. Попова получил название "грозоотметчик Попова" [6]. В своей статье [7] А.С. Попов о своем радиотехническом приборе писал: "...При дальнейшем усовершенствовании он может быть использован в передаче сигналов на расстояния при помощи быстрых электрических колебаний". В дальнейшем А.С. Попов в схему на рис.1 в цепь электрического звонка радиоприемника дополнительно включил телеграфный записывающий аппарат [6]. В результате такого усовершенствования им в 1896 году было создано первое устройство для беспроводной телеграфии, в котором осуществлялась радиопередача и радиоприем осмысленного текста условным кодом (в дальнейшем азбукой Морзе). Широко известна первая в мире радиотелеграмма всего из двух слов, переданная и принятая в 1896 году с помощью созданного А.С. Поповым радиотелеграфа [4,5]: "*Генрих Герц*". В это время первооткрыватель радио неустанно работал над разработкой радиотелеграфной связи для русского военно-морского флота. Работая для флота, А.С. Попов прекрасно понимал важность этой специальной работы для своей родины. Поэтому он не спешил с печатными публикациями по данной тематике: в этот период он устно информировал морских офицеров и ученых России о состоянии дел по военному радиотелеграфу [6]. В 1897 году дальность действия радиотелеграфа А.С. Попова составляла уже около 5000 м [2, 6]. Важным этапом в развитии беспроводной электросвязи (радиотелеграфии) было совместное предложение первых русских радиотехников А.С. Попова, Н.Н. Рыбкина и Д.С. Троицкого о радиоприеме телеграфных сигналов на слух с помощью телефона, ранее изобретенного в Англии и широко используемого в проводных кабельных линиях телефонной электросвязи [8, 9].

Успешные радиофизические опыты А.С. Попова в области беспроводной электросвязи приобрели широкую известность и вызвали интерес у многих ученых и изобретателей мира. Одним из таких иностранных изобретателей оказался итальянский инженер Г. Маркони, сделавший 2 июня 1896 года заявку в патентное ведомство Англии на выдачу патента на изобретение "*Усовершенствование в передаче электрических импульсов и сигналов и в аппаратуре для этого*" [6, 9]. 2 июля 1897 года им был получен соответствующий английский патент, юридически закреп-

ляющий его приоритет в Англии на радиотехническое устройство, аналогичное предложенному, сделанному и апробированному "в металле" А.С. Поповым более двух лет тому назад. Наш физик своего изобретения ни в России, ни за рубежом не патентовал. Он ограничился газетным сообщением о нем 7 мая 1895 года в г. Петербурге, научной журнальной публикацией [7] и статьей "*Телеграфирование без проводов*" на страницах газеты "*Котлин*" от 8 января 1897 года в г. Кронштадте. Появление последней статьи было вызвано зарубежным сообщением об опытах Г. Маркони в области радиотелеграфии. Отметим, что Г. Маркони, как и А.С. Попов, базировался в своих радиотехнических разработках на радиопередатчике по схеме Г.Р. Герца и радиоприемнике, использующем принцип когерера. А.С. Попов был вынужден выступить в защиту своего приоритета в вопросе об изобретении беспроводной электросвязи (радиосвязи). Всемирная история радиотехники подтвердила тот факт, что заслуга в открытии радио принадлежит русскому физiku А.С. Попову и дата первого публичного сообщения об этом открытии 7 мая 1895 года является датой одного из крупнейших изобретений в научно-технической истории человечества. Тем не менее, заслуга Г. Маркони в дальнейшем развитии беспроводной электросвязи (радиосвязи) бесспорна. Об этом свидетельствует и то, что ему в 1909 году за изобретения в области радиотелеграфа Шведской Академии наук была присуждена Нобелевская премия по физике. На взгляд автора, подобной премии совместно с Г. Маркони заслуживал и А.С. Попов, безвременно скончавшийся от инсульта 13 января 1906 года [6].

В этом разделе вкратце следует отметить и работы выдающегося английского физика XX века Э. Резерфорда, пытавшегося в конце 19-го столетия решить проблему беспроводной передачи и приема электрических сигналов не на принципе когерера, а на изменении намагничивания стального стержня под действием высокочастотных электрических колебаний [6]. Еще работая в Новой Зеландии, он в "*Трудах Ново-Зеландского института*" за 1894 год опубликовал результаты своих исследований по намагничиванию железа высокочастотными электрическими разрядами [6]. Переехав в г. Кембридж (Англия), он продолжил заниматься этой научной задачей и в 1897 году в журнале Лондонского Королевского общества опубликовал статью "*Магнитный детектор электрических волн и некоторые его применения*" [6]. Узнав в 1897 году после выхода своей статьи в свет из зарубежной печати о работах Г. Маркони по радиосвязи, Э. Резерфорд прекратил свои дальнейшие опыты с магнитным детектором (этот термин происходит от латинского слова "*detector*" – "*обнаруживающий*" [1]) и переключился в своих научных интересах совершенно на иную физическую область – атомную физику, в которой и обессмертил свое имя.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС И ВЗРОСЛЕНИЕ БЕСПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСВЯЗИ

На заре радиосвязи, как и сейчас в период ее расцвета, для ее осуществления применялись следующие основные радиотехнические устройства: ра-

диопередатчик с передающей антенной и радиоприемник с приемной антенной. В радиофизических исследованиях А.С. Попова и Г. Маркони использовались только искровые радиопередатчики, основанные на несовершенном вибраторе Герца с различными электрическими параметрами его излучающего колебательного контура и широкополосном излучении с его помощью в окружающее воздушное пространство сферических электромагнитных волн разной длины $\lambda_{ЭМВ}$. По мере развития электросвязи с увеличением числа таких радиопередатчиков и их мощности они начали мешать работе друг друга: их частотные диапазоны накладывались один на другой и перекрывались. Радиоэфир при их работе заполнялся электромагнитной какофонией (хаотичным нагромождением электромагнитных колебаний [1]). Этот электромагнитный диссонанс мешал радиоприемнику поймать требуемый радиопередатчик. Положение казалось безвыходным. Однако вскоре удалось решить и эту непростую задачу: для выделения из радиоэфира той или иной передачи в радиоприемнике стали использовать явление резонанса электрических колебаний в его колебательном контуре (технический термин "резонанс" происходит от латинского слова "resonans" – дающий отзвук [1]). Как известно, при электрическом резонансе напряжения (тока) в цепи (контуре) происходит резкое возрастание амплитуды колебаний соответствующей электрической величины [10]. Для обеспечения в цепи (контуре) электрического резонанса напряжения (тока) необходимо, чтобы частота ее (его) собственных электрических колебаний совпадала с частотой внешнего вынужденного электромагнитного воздействия. Открыт электрический резонанс в цепях электро- и радиотехники был в 1897 году английским ученым О. Лоджем [8].

С открытием и практическим использованием в колебательных контурах радиопередатчиков и радиоприемников явления электрического резонанса развитие беспроводной электросвязи получило мощный прогрессивный научно-технический толчок. На основе электрического резонанса радиопередатчики (вибраторы Герца) стали излучать не широкую полосу радиоволн, а узкую, соответствующую частоте настройки его излучающего колебательного контура. При этом радиоприемники, в свою очередь, при электрической настройке их приемного колебательного контура в электрический резонанс из радиоэфира стали улавливать только необходимую электромагнитную волну (радиопередачу), соответствующую радиоволне своего радиопередатчика. Здесь для ясности следует указать то, что колебательные контура радиопередатчика и радиоприемника содержат сосредоточенные (распределенные) индуктивности L_k и емкости C_k . Электрическая энергия, накопленная вначале в емкости C_k , при замыкании соответствующего излучающего или принимающего контура, переходит в магнитную энергию индуктивности L_k , а затем от индуктивности L_k снова возвращается к емкости C_k . Этот процесс попеременного разряда и заряда емкости C_k повторяется вновь и вновь. Из-за наличия в

$L_k C_k$ – контурах активного сопротивления R_k их токоведущих частей высокочастотные электрические колебания в этих контурах затухают и, в конце концов, колебательный процесс в радиопередатчике (радиоприемнике) прекращается. Период этих колебаний T_k , например, при неучете влияния R_k , как известно, определяется знаменитой формулой Томсона [10]: $T_k = 2\pi\sqrt{L_k C_k}$. Поэтому в рассматриваемых контурах собственная частота электрических колебаний $f_k = 1/T_k$ может регулироваться изменением значений емкости C_k или индуктивности L_k . Регулировкой значений L_k и C_k колебательные контура радиопередатчика (радиоприемника) и настраивают на нужную частоту радиоволн. Что касается электрического резонанса напряжения (тока) в указанных колебательных контурах, то условием его существования в них является следующее классическое соотношение [10]: $\omega_k^2 L_k C_k = 1$, где $\omega_k = 2\pi f_k$ – круговая резонансная частота электрических колебаний в контуре.

К началу XX века в мире был известен лишь один способ генерирования высокочастотных электромагнитных колебаний – искровой метод Г.Р. Герца [6, 8]. Этот метод позволял в окружающем вибратор Герца воздушном пространстве создавать только затухающие во времени электрические колебания частотой в десятки и сотни мегагерц. Однако практика радиосвязи требовала перехода радиотехнических устройств на работу незатухающими электромагнитными колебаниями. К этому активно подталкивало: во-первых, стремление увеличить мощность передающих радиостанций и соответственно дальность действия радиоустройств; во-вторых, повышение требований к избирательности принимаемых радиоприемниками радиосигналов; в-третьих, желание иметь наряду с телеграфной и телефонную радиосвязь.

Первые радиопередатчики по изложенным выше причинам были несовершенны, обладали сравнительно малой мощностью, а первые радиоприемники имели низкую чувствительность к радиоволнам. Заметим, что в период первой мировой войны в русской армии уже использовались передвижные полевые искровые радиостанции, в которых затухающие радиоволны возбуждались и излучались электрической искрой в воздушном вибраторе Герца [2, 11]. Данные радиостанции, в основном, дублировали работу военной полевой проводной электросвязи (в случае ее выхода из строя) между штабами русской армии. При распространении в воздушном пространстве радиоволна, как известно, из-за процессов рассеяния теряет часть своей электромагнитной энергии. Поэтому с увеличением расстояния от радиопередатчика излученная радиоволна по своей амплитуде из-за пространственного затухания становится все меньше и меньше. Первые радиоприемники могли ловить (воспринимать) из окружающего их воздушного пространства только сравнительно сильные электромагнитные сигналы (колебания). В этой связи в радиосвязи на повестку дня логично встали научно-технические вопросы о повышении электромагнитной чувствительности ра-

диоприменников и переходе в радиопередатчиках на новый способ генерирования более мощных незатухающих во времени электромагнитных колебаний и соответствующих радиоволн, распространяющихся в земной атмосфере на большие расстояния.

3. ИЗОБРЕТЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ И НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ПЕРЕВОРОТ В РАДИОТЕХНИКЕ

1. Изобретение двухэлектродной радиолампы. С 1914 года в России на смену искровым радиопередатчикам стали постепенно приходиться ламповые, в которых высокочастотные электромагнитные колебания создавались не электрической искрой в воздушном промежутке, а первенцем радиоэлектроники – электронной двухэлектродной лампой (радиолампой), работающей в условиях вакуума и установленной в излучающем колебательном контуре радиопередатчика (генератора радиоволн). Что представляла собой первая радиолампа, совершившая настоящий переворот в науке и технике? Для этого нам, прежде всего, стоит вспомнить обычную электрическую лампу накаливания, изобретенную впервые известным русским ученым А.Н. Лодыгиным в 1872 году (с угольной нитью была им запатентована в Англии в том же году) и предназначенную для освещения помещений (лампы с нитью из тугоплавких металлов он создал к 1890 году) [12]. Всем хорошо известно, что в ее прозрачной стеклянной колбе с откаченным воздухом размещена высокоомная металлическая (обычно вольфрамовая) нить, нагреваемая до высокой температуры (добелá) электрическим током и излучающая свет (электромагнитные волны частотой порядка 10^{15} Гц [13]). Именно данная электрическая лампа накаливания и сыграла свою определяющую роль в изобретении первой двухэлектродной радиолампы. В 1883 году известный американский изобретатель и электротехник Т. Эдисон (получил патент США на лампу с угольной нитью в 1879 году [12]) при усовершенствовании обычной электрической лампочки накаливания обнаружил интересное явление (рис.2): между раскаленной за счет разряда аккумуляторной батареи 2 при замыкании ключа 3 нитью 1 с отрицательным электрическим потенциалом, размещенной в стеклянной колбе 4 с откаченным воздухом, и металлической пластинкой 5 с положительным электрическим потенциалом, включенной в цепь аккумуляторной батареи 6, начинал протекать электрический ток. Данный эффект Т. Эдисон назвал "*распылением вещества нити накаливания в электрической лампе*" [6, 8].

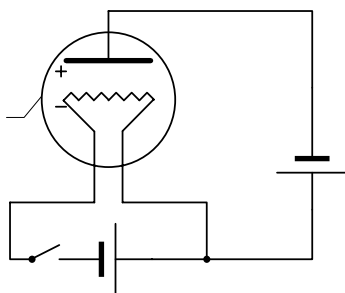


Рис. 2. Схема эксперимента Т. Эдисона с электрической лампой накаливания

Следует заметить, что в период проведения знаменитым исследователем электричества Т. Эдисоном указанного выше эксперимента еще не был открыт такой основной носитель электричества в металле как электрон. Справочно укажем, что эта элементарная частица была открыта в газоразрядной трубке (практически аналогичной рис.2 конструкции) выдающимся английским физиком Дж. Томсоном только в 1897 году [6, 14]. Мы теперь точно знаем, что этот электрический ток на рис. 2 между нитью 1 и пластиной 5 был обусловлен свободными электронами, дополнительно приобретенными за счет джоулевых потерь энергии в раскаленном металле нити 1 кинетическую энергию не менее работы выхода W_B из него (например, для вольфрама $W_B = 7,27 \cdot 10^{-19}$ Дж [15]), покинувшими по этой причине раскаленную нить 1 лампы и вышедшими из ее металла в изоляционное пространство колбы 5. Поэтому при подаче на металлическую пластину 5 отрицательного электрического потенциала электрический ток в цепи аккумуляторной батареи 6 прекращался. Ток в указанной цепи отсутствовал и в случае холодной (нераскаленной) нити 1, практически не эмитирующей вне себя свободных электронов. Металлическую пластину 5 на рис.2 назвали *анодом* (положительным электродом, происходящим по названию от греческого слова "*anodos*" – "*подъем*"), а нить накаливания 1 – *катодом* (отрицательным электродом, происходящим по названию от греческого слова "*kathodos*" – "*спуск*") [1]. Интересным и удивительным моментом в данном научно-историческом сюжете оказалось то, что Т. Эдисон из обнаруженного им явления практически никаких технических выводов не сделал [6, 8]. Идея о техническом использовании "*эффекта Эдисона*" пришла позже опытному английскому инженеру Флемингу, который в 1904 году и создал первую двухэлектродную радиолампу [8].

Простейшая электронная лампа, в которой имеется лишь два электрода (катод и анод) получила название *радиодиода* (с греческого приставка "*di*" означает числительное "*два*" [1]). У электровакуумного диода сразу было установлено важное свойство – возможность преобразования переменного электрического тока в постоянный, текущий по проводникам электрической цепи в одном направлении. При положительной полярности электрического потенциала на аноде в цепи радиодиода протекала положительная полуволна переменного тока, а при отрицательной полярности потенциала на аноде в его (диода) цепи ток отсутствовал, то есть в этом случае отрицательная полуволна переменного тока через диод не проходила. Радиолампа, как говорят, при этом была заперта. Принцип действия радиодиода оказывался подобным обычному вентилю велосипедной (автомобильной) резиновой камеры. Отсюда и произошло такое распространенное среди радиолюбителей и специалистов-радиотехников название выпрямительной двухэлектродной радиолампы (диода) как электронный вентиль или просто вентиль.

2. Изобретение трехэлектродной радиолампы. Вскоре у электронного диода появился его "младший

брат" – радиотриод (с греческого приставка "tri" означает числительное "три" [1]), содержащий три металлических электрода: два основных – катод 1, анод 4 и один дополнительный – сетку 3 (рис. 3). Данный электронный прибор (трехэлектродная радиолампа) с управляющим электродом (металлической сеткой) был предложен в 1907 году известным американским радиотехником Л. Форестом [8]. За активное внедрение в радиотехнику лампового триода его изобретатель – Л. Форест получил от своих американских соотечественников почетный титул "отца радио" [6].

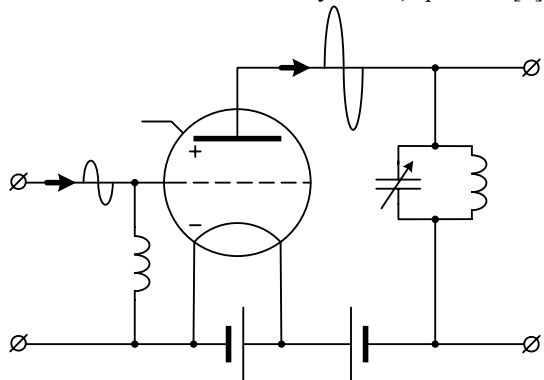


Рис. 3. Упрощенная схема устройства электронного триода

В электровакуумном триоде сетка 3 выполняется в виде металлической решетки или проволочной спирали, расположенной между катодом 1 и анодом 4. Она управляет потоком электронов, движущихся в безвоздушном пространстве от отрицательного раскаленного электрода-катода 1 к положительному электроду-аноду 4. Когда сетка 3 заряжена положительным зарядом, то она способствует движению электронов от катода 1 к аноду 4. Если на сетке 3 имеется отрицательный заряд, то она мешает движению электронов от катода 1 к аноду 4. Отличительной особенностью радиотриода является то, что он выполняет роль усилителя входного электрического сигнала, поступающего на сетку 3, размещенную вблизи катода 1. В случае, когда на ней (сетке) появляется отрицательный заряд достаточно большой величины, то триод запирается и пропускает анодный ток. При уменьшении отрицательного заряда сетки анодный ток этой радиолампы возрастает. Получается так, что в триоде незначительные изменения сеточного заряда приводят к существенному изменению анодного тока лампы (на рис. 3 не указан источник питания для смещения сеточного потенциала). При колебании заряда на сетке в триоде наблюдаются и колебания величины анодного тока. Поэтому трехэлектродная радиолампа (триод) на своем выходе обеспечивает процесс усиления входных электрических колебаний. Именно триод и позволил создать ламповый усилитель и ламповый генератор незатухающих во времени электромагнитных колебаний – самые распространенные на заре радиотехники электронные приборы [8, 11].

3. Изобретение лампового усилителя. Для получения простейшей электрической схемы лампового усилителя, применяемого в радиоприемнике, схему триода на рис. 3 необходимо дополнить следующими элементами: на входе – индуктивностью L_y , а на выходе

– колебательным электрическим контуром, содержащим параллельно включенные переменную настроечную емкость C_k и индуктивность L_k . Рассмотрим в упрощенном виде процесс усиления в радиоприемнике относительно слабого входного электрического сигнала, подаваемого между сеткой 3 и катодом 1 и изменяющегося во времени по произвольному закону. При подаче на сетку такого электрического сигнала ее заряд будет также изменяться, что вызовет соответствующую пульсацию анодного тока, проходящего через электрическую нагрузку, состоящую из емкости C_k и индуктивности L_k . Эти пульсации будут раскачивать электрический колебательный $L_k C_k$ – контур, амплитуда электрических колебаний в котором при его настройке в резонанс с подаваемым на сетку сигналом может принимать большие значения. Практика показала, что с помощью радиотриода его входные электрические колебания можно усиливать в десятки раз. Однако такое усиление часто оказывается недостаточным. Например, слабые электрические сигналы радиозфира после их приема необходимо усиливать в миллионы раз [8]. Как в радиотехнике после изобретения радиотриода осуществлялось такое колоссальное усиление? Это усиление входных для радиоприемника слабых электрических сигналов на практике реализуется старым испытанным способом, основанным на пошаговом ступенчатом принципе изменения требуемой электрической величины напряжения (тока). На рис. 4 в упрощенном виде приведена принципиальная электрическая схема радиоусилителя, состоящая из двух каскадов, основным элементом которых являются трехэлектродные радиолампы (триоды) T_1 и T_2 .

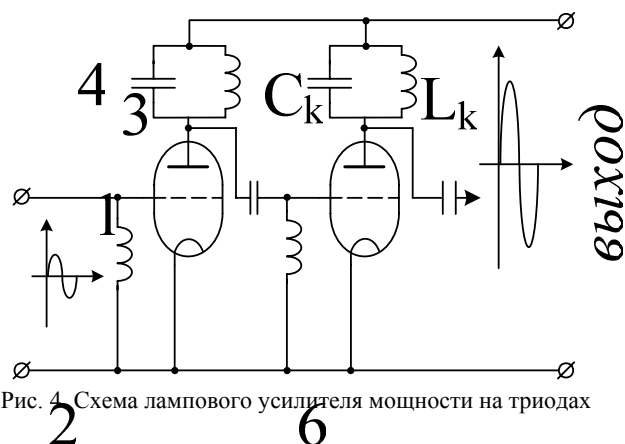


Рис. 4. Схема лампового усилителя мощности на триодах

Чем больше каскадов в электрической схеме усилителя на рис.4, тем выше и коэффициент ее усиления k_y , равный $k_y = i_{\text{ВЫХ}} / i_{\text{ВХ}}$, где $i_{\text{ВХ}}$, $i_{\text{ВЫХ}}$ – соответственно входные и выходные значения электрического тока или напряжения лампового усилителя.

4. Изобретение лампового генератора. Простейший ламповый генератор (радиопередатчик) отличается от приведенного выше лампового усилителя на триодах (см. рис. 4), используемого в радиоприемнике, практически лишь одной особенностью: генератор усиливает свои же собственные электрические колебания. Первый ламповый генератор на радиотриоде был разработан в 1913 году А. Мейснером [6]. Ламповый уси-

литель может быть сравнительно легко превращен в ламповый генератор. Для этого схему усилителя на рис. 4 нужно доработать так, чтобы часть электромагнитной энергии с выхода триода T_r все время вращалась на его вход. Осуществить эту идею в ламповом генераторе можно путем включения индуктивности L_c в анодную цепь радиотриода T_r и получения ее трансформаторной связи с сеткой C (рис. 5).

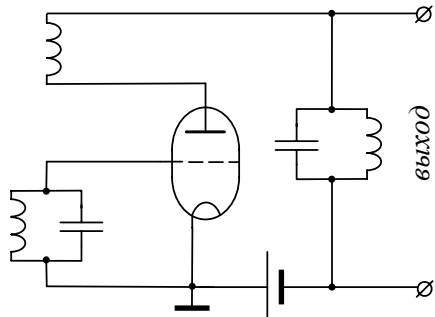


Рис. 5. Схема лампового генератора на триоде

Индуктивность L_c в схеме лампового генератора на рис. 5 называется катушкой обратной связи [2,8]. Ее переменное электромагнитное поле пронизывает катушку индуктивности L_y электрического колебательного $L_y C_y$ – контура, включенного на входе триода T_r между его сеткой C и катодом K (см. рис. 5). Под влиянием этого поля в $L_y C_y$ – контуре генератора будут возбуждаться электрические колебания в противофазе анодному напряжению, которые затем усиливаются его триодом T_r и снова попадают через анод A в катушку обратной связи с индуктивностью L_c . В результате чего электрические колебания в катушке с индуктивностью L_c будут раскачивать колебательный $L_y C_y$ – контур, колебания которого поступают на сетку C радиолампы, усиливаются в анодной цепи триода T_r и снова проходят через катушку обратной связи с индуктивностью L_c . Получается, что данный генератор все время себя как бы возбуждает. Поэтому он и получил название лампового генератора с самовозбуждением [8, 11]. Заметим, что и в настоящее время в мощных генераторах метровых радиоволн используются приведенные на рис. 5 радиотриоды, а элементами электрического колебательного $L_y C_y$ – контура служат отрезки длинных линий [11]. При генерировании в мощных генераторах дециметровых радиоволн сейчас применяются металлокерамические лампы, электроды которых являются частью колебательной системы большой мощности [8]. Для генерирования более коротких радиоволн электронные лампы с управляющими электродами не применяются по той причине, что в этих условиях работы их коэффициент усиления становится малым. Объясняется это тем, что при этом время пролета электронов между катодом K , сеткой C и анодом A (см. рис. 5) становится соизмеримым с периодом генерируемых триодом сверхвысокочастот-

ных электрических колебаний. Уменьшение расстояния между основными и дополнительным (управляющим) электродами радиолампы приводит в этом случае лишь к увеличению паразитных значений емкости сетки C и уменьшению времени взаимодействия поля с электрическими зарядами свободных электронов триода. Это, в свою очередь, также способствует уменьшению значений коэффициента усиления данного типа лампового генератора на сверхвысоких частотах (порядка долей и единиц ГГц).

5. Изобретение многоэлектродных радиоламп. Более сложные, чем диоды и триоды, радиолампы свое практическое применение нашли только в 30-е годы ушедшего столетия. Так, электронные тетроды (лампа с четырьмя электродами: катодом, анодом и двумя сетками), созданные Шоттки в 1919 году, стали применяться в радиоприемниках для усиления мощности электрических колебаний только в период 1925-1929 годов [8]. Электронные пентоды (лампа с пятью электродами: катодом, анодом и тремя сетками), созданные на основе работ Лэнгмюра, были использованы для генерирования и усиления электрических колебаний в диапазоне частот до нескольких сотен МГц, лишь начиная с 1930 года [8].

6. Изобретение лампы бегущей волны. Данная радиолампа предназначена для усиления электрических колебаний с длиной радиоволны $\lambda_{ЭМВ}$ сантиметрового диапазона [8]. Основным принципом, положенным в работу электровакуумной лампы бегущей волны (ЛБВ), является увеличение времени взаимодействия усиляемого электромагнитного поля с пролетающими сквозь него электронами. ЛБВ содержит [8]: катод, подводящий усиляемое поле и отводящий усиленное поле волноводы (линии передачи высокочастотной энергии в виде медных или алюминиевых труб прямоугольного или круглого поперечного сечения диаметром не более $\lambda_{ЭМВ} / 2$), замедляющую систему и анод. В ЛБВ для того, чтобы усиляемое поле и электронный поток двигались вместе и взаимодействовали в течение сравнительно длительного времени обеспечивают уравнивание их скоростей. Для этой цели скорость распространения радиоволн вдоль ЛБВ замедляют с помощью расположенной внутри стеклянного баллона лампы металлической спирали, а снаружи лампы над спиралью размещают фокусирующую катушку [8]: Шаг спирали и длину ее витков выбирают так, чтобы усиляемое высокочастотное электромагнитное поле распространялось вдоль нее с требуемой скоростью. В ЛБВ происходит чередование процессов ускорения и торможения электронов, движущихся от катода к аноду радиолампы. При ускорении в ЛБВ электрона он получает от указанного поля энергию, а при его торможении – он передает накопленную кинетическую энергию электромагнитному полю. Поэтому в краевой части ЛБВ, примыкающей к аноду, ускоренные электроны попадают в область тормозящего поля и усиливают бегущую вдоль лампы электромагнитную волну. Усиленные таким способом электромагнитные колебания отводятся волноводом в последующие каскады радиоприемника. Достоинством ЛБВ является ее большой ко-

эффицент усиления, низкий уровень шума и сравнительно высокая полоса пропускания [8, 11]. Поэтому ЛБВ нашла широкое применение в радиотехнике в качестве усилителя сверхвысоких частот в сантиметровом диапазоне радиоволн.

7. Изобретение лампы обратной волны. Для генерирования в радиопередатчиках мощных электромагнитных колебаний в миллиметровом диапазоне радиоволн используется электровакуумная лампа обратной волны (ЛОВ). По своей конструкции ЛОВ напоминает ЛБВ с той лишь разницей, что в радиолампе ЛОВ электронный поток и усиливаемое электромагнитное поле движутся во взаимно противоположных направлениях [8]. На определенных участках пути движущиеся сгустки электронов (области электрических зарядов с повышенной электронной плотностью) попадают в тормозящее электромагнитное поле, где они и отдают этому полю часть своей накопленной за счет ускорения в поле между катодом и анодом кинетической энергии. После усиления в ЛОВ высокочастотное электромагнитное поле при помощи волновода отводится к излучающей системе радиопередатчика, в качестве которой может выступать, например, слабо-направленная рупорная антенна [8, 11].

Из истории развития радиотехники известно, что выдающийся вклад в создание генерирующих радиоламп на заре радиовещания внесли такие российские ученые как Н.Д. Папалекси и М.А. Бонч-Бруевич. Уже к 1914 году из печати вышли их основополагающие работы по теории и конструированию ламповых усилителей и генераторов [6, 8]. В области разработки теории генерирования радиоволн и радиоприема высокочастотных электромагнитных колебаний, а также конструирования различных мощных радиотехнических устройств необходимо отметить большой вклад следующих советских ученых [6, 11]: А.А. Чернышева, М.В. Шулейкина, А.И. Берга, В.П. Вологодина, Ю.Б. Кобзарева, В.И. Сифорова и др. Работы в XX веке таких выдающихся и всемирно известных ученых как основоположника кибернетики Н. Винера и радиотехника В.А. Котельникова позволили в дальнейшем разработать принципиально новый статистический подход к решению задач устойчивого радиоприема необходимого полезного электрического сигнала на фоне электромагнитных помех. Электронные лампы и создаваемые на их основе генерирующие и приемные радиоэлектронные приборы при всех своих достоинствах имеют сравнительно большие габаритные размеры и потребляют относительно большие количества электроэнергии. Поэтому уже с момента их широкого и успешного использования в радиотехнике ученые стали искать достойного преемника электронной лампе, обладающего всеми ее замечательными свойствами и свободным от ее недостатков.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
 [2] Плонский А.Ф. Как человек приручил волну. – М.: Сов. Россия, 1958. – 224 с.
 [3] Баранов М.И. Джеймс Клерк Максвелл и теория электромагнитного поля // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – №1. – С. 5–7.

[4] Баранов М.И. Генрих Рудольф Герц – первооткрыватель электромагнитных волн // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – №1. – С. 5–11.
 [5] Григорьян А.Т., Вяльцев А.Н. Генрих Герц. 1857–1894. – М.: Наука, 1968. – 309 с.
 [6] Кудрявцев П.С. Курс истории физики. – М.: Просвещение, 1974. – 312 с.
 [7] Попов А.С. Прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний // *Журнал русского физико-химического общества. Серия физическая*. – 1896. – Т.28. – С. 1–14.
 [8] Мельник Ю.А., Стогов Г.В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. – М.: Сов. радио, 1973. – 368 с.
 [9] Баранов М.И. Оливер Хевисайд и его вклад в мировую сокровищницу науки // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – №4. – С. 5–14.
 [10] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
 [11] Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1973. – 496 с.
 [12] Жукова Л.Н. Лодыгин / Серия: Жизнь замечательных людей. – М.: Молодая гвардия, 1989. – 304 с.
 [13] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
 [14] Баранов М.И. Ретроспектива исследований в области искусственного и атмосферного электричества и молниезащиты технических объектов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – №5. – С. 5–13.
 [15] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1981. – 338 с.
 [16] Ваврив Д.М., Казанцев В.И., Канило П.М., Лебедюк И.Н. и др. Использование СВЧ-энергии для безызлучательного розжига и стабилизации горения низкосортных углей // *Вестник МГТУ им. Баумана*. – 2003. – №1. – С. 87–97.
 [17] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
 [18] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики // *Электротехника і електромеханіка*. – 2007. – №2. – С. 5–12; №3. – С. 5–11.
 [19] Баранов М.И. Эрвин Шредингер и новые пути развития физической науки микромира // *Электротехника і електромеханіка*. – 2006. – №4. – С. 5–15.
 [20] Onishchenko I.N. Progress in plasma wakefield acceleration driven by a short intense bunch of relativistic electrons // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2006. – №6. – Series: Plasma Physics (12). – p. 158–162.
 [21] Adler R.J. Comparison of DC and pulsed beams for commercial applications // *10th International Conference on High Power Particle Beams*. – San Diego, USA (20–24 June 1994). – Vol. 1. – P. 29–32.
 [22] Гурин А.Г., Корнилов Е.А., Ложкин Р.С. Контроль работоспособности изоляции линейного индукционного ускорителя, применяемого для промышленных целей // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. – №42. – С. 16–20.
 [23] Баранов М.И. Ретроспектива, современное состояние и перспективы развития исследований в области создания электроустановок с мощными накопителями электрической и магнитной энергии // *Электротехника і електромеханіка*. – 2007. – №5. – С. 48–60.

Поступила 21.11.2007