



## АЛЕКСАНДР МИКЕРОВ,

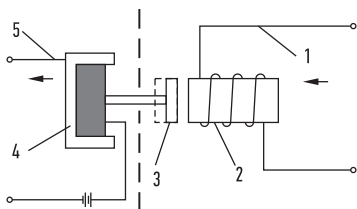
д. т. н., проф. каф.  
систем автоматического управления  
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
a.mikerov@gmail.com

Аудион, задуманный Ли де Форестом как линейный электронный усилитель, стал таковым только после усовершенствований, внесенных Лебеном, Арнольдом и Ловенштейном при создании телефонных репитеров.



# ПОЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

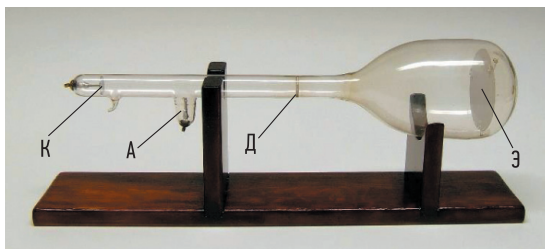
**РИС. 1. ▶**  
Телефонный репитер



**РИС. 2. ▶**  
Роберт фон Либен  
(1878–1913)



**РИС. 3. ▼**  
Трубка Брауна



Потребность в усилении электрических сигналов возникла в конце XIX в. в связи с развитием дальней проводной связи. Телеграфные линии снабжались релейными репитерами, предложенными еще Джозефом Генри. Это решение явно не подходило для телефонии, поэтому в Америке из-за огромных расстояний компания AT&T стала использовать электромеханические репитеры на основе угольного микрофона, изобретенного Эдисоном в 1878 г. В конце участка линии (1) устанавливался электромагнит (2), шток которого (3) давил на диафрагму микрофона (4) в следующем участке линии (5) (рис. 1) [1, 2]. Такой репитер, изобретенный в 1903 г. инженером этой компании Гербертом Шривом (Herbert Shreeve), через год уже нашел применение на телефонной линии Нью-Йорк — Чикаго.

В Европе, поскольку там расстояния меньше, длинные телефонные линии долго не считались нужными, однако именно здесь, в Австрии, физик и предприниматель Роберт фон Либен (Robert von Lieben, рис. 2) предложил первый электронный усилитель для телефонного репитера. Он прожил очень короткую жизнь, всего 34 года, но этого оказалось достаточно для того, чтобы он вписал свое имя в историю электроники [2–5].

Роберт фон Либен родился в Вене в одной из самых богатых и интеллигентных семей еврейских банкиров в Австро-Венгерской империи.

Учеба в гимназии, а затем в реальном училище не доставляла ему удовольствия, поэтому, не получив даже диплома средней школы, он часто пропадал в домашней лаборатории, устроенной отцом, который поощрял научные занятия сына. Это оберегло Либена от соблазнов молодежи и позволило целиком заняться самообразованием, не считая военной службы, куда он пошел добровольцем и скоро выбыл после неудачного падения с кавалерийской лошади. Сначала он стажировался в Германии на заводе Сименс — Шукерт, был вольнослушателем Венского университета, а затем учился в Геттингенском университете под руководством знаменитого Вальтера Нернста (Walther Nernst), который заметил его увлечение проблемами телефонии. Вернувшись в Вену в 1903 г. и обладая значительными средствами, Либен основал собственную исследовательскую лабораторию и даже купил телефонную фабрику. Он решил компенсировать потери в длинной линии электронным усилителем, который он назвал катодно-лучевым реле и запатентовал в 1906 г. (ранее аудиона де Фореста) [4, 6, 7].

Прототипом этого устройства можно считать катодно-лучевую трубку, разработанную в 1897 г. немецким физиком Карлом Брауном (Karl Braun), разделившим в 1909 г. вместе с Маркони Нобелевскую премию за беспроводную телеграфию (рис. 3) [2, 4].

Данная трубка содержит холодный катод (К) и анод (А), которые формируют при напряжении около 100 тыс. В катодный луч, падающий через диафрагму (Д) на фосфоресцирующий экран (Э). Электромагнит, помещенный возле диафрагмы, вызывает отклонение катодного луча в вертикальной плоскости, пропорциональное току электромагнита. Рассматривая изображение на экране с помощью вращающегося зеркала, Браун мог видеть форму тока электромагнита, например синусоиду. По сути, это был первый электронный осциллограф и предтеча телевидения. Вместо диафрагмы сходящийся луч можно образовать самим катодом в виде вогнутого зеркала.

Предложенное Либеном реле (рис. 4) в виде вакуумной трубки содержало подогретый катод (К) с батареей (БК) и анод (А) в виде цилиндра Фарадея с отверстием, подключенного через сопротивление нагрузки (Н) (например, телефон) и добавочное сопротивление (РА) к анодной батарее (БА).

Анод заключен в приемник (П) с таким же отверстием, соединенный с анодной батареей (БА). Катод (К) в виде вогнутого зеркала создает луч, сфокусированный, как показано на рисунке, на отверстии приемника. На трубку надета фокусирующая катушка (Ф), предложенная немецким физиком Эмилем Вихертом (Emil Wiechert) в 1899 г., которая, при наличии тока от батареи (БФ) через регулируемое сопротивление (R), смещает фокус луча ближе к катоду [4, 6]. Таким образом, при отсутствии входного тока катушки (Ф) все электроны катодного луча собираются в фокус и попадают на анод (А), вследствие чего ток нагрузки (Н) становится максимальным. При увеличении входного тока фокус луча смещается в сторону катода и на поверхности приемника (П) вокруг отверстия образуется круг, при увеличении диаметра которого всё большая часть электронов луча попадает на приемник, что в итоге приводит к снижению выходного тока нагрузки (Н). Следовательно, по мысли изобретателя, форма выходного тока соответствует форме входного, и данное устройство является линейным электронным усилителем.

Такой усилитель оказался вполне работоспособным, однако его выход-

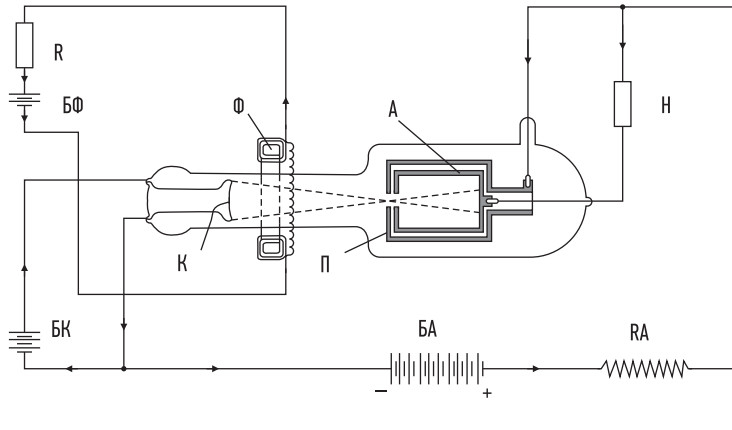


РИС. 4. ◀ Катодно-лучевое реле

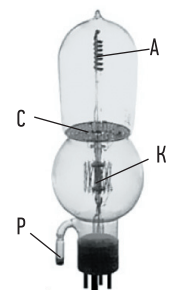
ная мощность была явно недостаточной для телефонного релитера. Тем не менее еще долго электронные лампы релитеров назывались катодными реле. Открытие ртутно-дуговой лампы указывало на возможность повышения тока вакуумной лампы введением в нее паров ртути. По этому пути и пошел Либен, создавший в 1910 г. вместе с сотрудниками своей лаборатории Евгением Рейсом (Eugen Reisz) и Зигмунтом Штраусом (Siegmond Strauss) на основе известного ему аудиона де Фореста мощную лампу длиной 40 см (рис. 5) [2, 4, 5, 7, 8]. Здесь сетка выполнена в виде перфорированной алюминиевой перегородки (С), отделяющей платиновую оксидированную нить накала (К), предложенную Вихертом, от витого анода (А).

Внутрь лампы вводилась амальгама ртути (Р), нагревом которой вझे регулировалось давление паров, что снижало неустойчивость работы при изменении температуры. Тем не менее при военном применении лампа помещалась в специальный термостат. Все это позволяло поднять напряжение до 220 В при коэффициенте усиления 33. Срок службы лампы, составлявший до 3600 ч, был гораздо выше, чем у аудиона де Фореста (100 ч). Для создания усилительной аппаратуры в 1912 г. был основан консорциум Либена, куда вошли ведущие немецкие компании, такие как Siemens (для телефонной связи), Telefunken (для радио) и др. С началом Первой мировой войны (уже без участия изобретателя, скончавшегося в 1913 г. после тяжелой болезни) была установлена устойчивая телефонная связь с Восточным и Западным фронтами, а также Константинополем с сотней электронных релитеров.

Однако после войны Германия перешла на «жесткие» электровакуумные приборы, разработанные в Америке, поскольку лампа Либена отличалась огромными размерами и высоким напряжением и неустойчиво работала при изменениях температуры.

Почти одновременно с немецкими работами американская компания AT&T, недовольная качеством описанных выше электромеханических релитеров, решила попробовать использовать аудионы [2, 9]. В 1912 г. была организована встреча представителей компании с изобретателем Фрицем Ловенштейном (Fritz Lowenstein), бывшим ассистентом Николы Теслы, получившим образование в Европе. Он продемонстрировал всем запечатанную коробочку с аудионом, дающую хорошее воспроизведение звуковых сигналов. Однако изобретатель не раскрывал содержание коробочки до оформления патентной заявки. Тем не менее компания подключила к этой работе доктора Гарольда Арнольда (Harold Arnold, ученик знаменитого Милликена, измерившего заряд электрона), а также самого изобретателя аудиона Ли де Фореста, передавшего несколько ламп. Их испытания показали, что эти лампы совершенно не пригодны для телефонии по причине малой выходной мощности из-за низкого напряжения (20 В), недостаточного усиления (1,2), малого срока службы (100 ч) и искажения речи [2, 7, 9]. Знакомый с немецкими исследованиями, Арнольд решил применить оксидный катод Вихерта, однако оказался от паров ртути и пошел совершенно в противоположном направлении, создав максимально возможный вакуум для электронной эмиссии.

РИС. 5. ▼ Лампа Либена



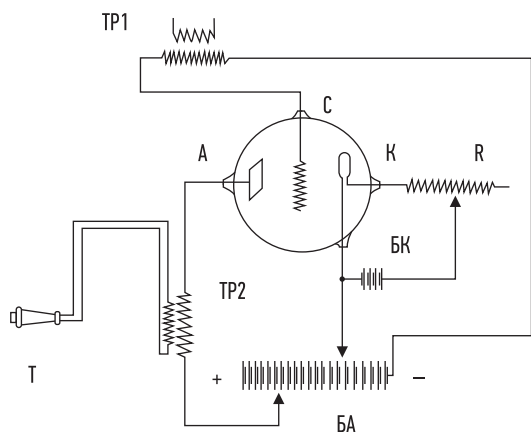
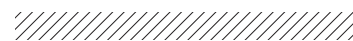


РИС. 6. ▲  
Патент Ловенштейна

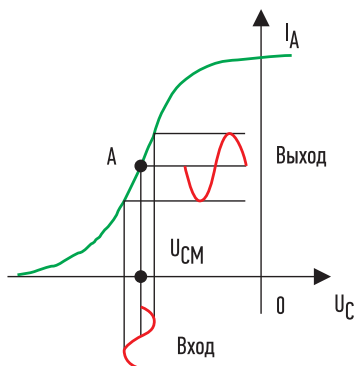


РИС. 7. ►  
Анодно-сеточная характеристика



РИС. 8. ►  
Пентоды

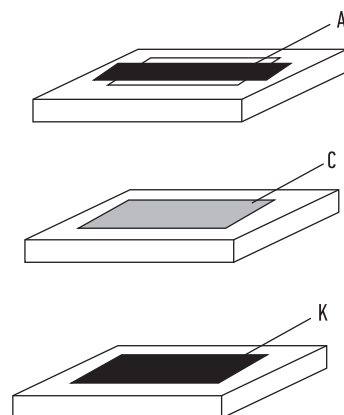


РИС. 9. ►  
Штабельная лампа

Помимо полной конструктивной переработки аудиона, это позволило увеличить анодное напряжение в 10 раз (до 200 В), коэффициент усиления до 5 и срок службы — до 1000 ч. Что касается искажений речи, то к тому времени Ловенштейн уже раскрыл содержание своей коробочки, запатентовав схему смещения сетки аудиона, показанную на рис. 6 [10], где К — катод, питаемый от батареи (БК) и резистора (R), А — анод, подключенный к левой части батареи (БА), и С — сетка, имеющая отрицательный потенциал относительно катода за счет правой части батареи (БА). Телефонная линия подключается к сетке через входной трансформатор (TR1), а телефон (Т) через выходной трансформатор (TR2).

Изобретатель не смог объяснить причину улучшения качества речи, сославшись на эксперименты. Однако принципиальная необходимость сеточного смещения аудиона, равно как и современного триода, поясняется рис. 7, из которого видно, что характеристика анодного тока  $I_A$  при изменении сеточного напряжения  $U_C$  смещается в область отрицательных напряжений. Поэтому получение неискаженного выходного сигнала (Выход) возможно лишь при подаче входного сигнала (Вход) в рабочей точке А середины линейного участка, определяемой отрицательным напряжением смещения  $U_{CM}$ .

Патент Ловенштейна был приобретен компанией AT&T за \$150 тыс., и это решение с сеточным смещением стало классическим для всех усилителей на вакуумных триодах [11]. Все эти достижения позволили компании AT&T уже в конце 1913 г. ввести в коммерческую эксплуатацию телефонную линию с электронными репитерами Нью-Йорк — Вашингтон, а в 1915 г. Нью-Йорк — Сан-Франциско длиной более 4000 км [2].

Электронные усилители начали применять и в радиоаппаратуре с каскадным включением аудионов. Так, в четырехкаскадном усилителе на лампах Либена был получен коэффициент усиления 20 тыс. [8]. В 1914 г. Эдвин Армстронг (Edwin Armstrong), известный американский изобретатель, будучи еще студентом Колумбийского университета, запатентовал схему так называемого «регенеративного» усилителя с повышенным коэффициентом усиления за счет положительной обратной

связи [5, 8]. Нарастивание числа каскадов сопровождалось искажением звукового сигнала из-за нелинейности каждой лампы. Кардинальное решение проблемы линейности было найдено в 1927 г. инженером Харольдом Блэком (Harold Black) из компании AT&T, охватившим весь многокаскадный усилитель отрицательной обратной связью.

Сами электривакуумные приборы развивались за счет расширения их функциональных возможностей и миниатюризации. Прежде всего, для повышения коэффициента усиления до нескольких тысяч и расширения частотного диапазона до 1 ГГц были изобретены четырехэлектродные приборы (тетрод) с двумя сетками и пятиэлектродные приборы (пентод) с тремя сетками. Тетрод был предложен немецким физиком Валтером Шоттки (Walter Schottky) из компании Siemens в 1916 г., а пентод — голландским инженером Бернадом Теллегеном (Bernard Tellegen) из компании Philips через десять лет [2, 4, 5, 11]. Уменьшение размеров на примере пентода видно на рис. 8, где слева направо представлены: немецкая и американская лампы 1935 г., пальчиковая лампа США 1939 г., стержневая лампа СССР 1950 г. и современный транзистор (для сравнения) [12].

Стержневые лампы, не имеющие западных аналогов, были изобретены инженером Валентином Николаевичем Авдеевым и использованы в радиоаппаратуре первых советских спутников. Необычную конструкцию имели штабельные лампы, предложенные учеными ЛЭТИ Юрием Абрамовичем Кацманом и Александром Александровичем Шапошниковым в 1934 г. (рис. 9): металлические детали катода (К), сетки (С) и анода (А) были укреплены на керамических рамках, складываемых стопкой. Это позволяло достичь не только малых размеров, но и высокой рабочей частоты [5].

Другое направление миниатюризации — сборка в одном баллоне двух-трех ламп вместе с дополнительными схемными элементами — было выбрано немецкой компанией LOEWE в 1926 г. [2, 5]. Такая интегральная конструкция превращалась в целый радиоприемник за счет добавления всего трех узлов: колебательного контура, динамика и батареи питания.

В XX в. электронные лампы безраздельно господствовали во многих

радиотехнических и автоматических системах, вплоть до 1950-х гг., когда их стали вытеснять транзисторы. Однако в 1976 г., когда новейший советский истребитель МИГ-25, ставший на боевое дежурство в 1970 г., приземлился в Японии и был обследован американцами, выяснилось, что все его радиоэлектронное оборудование построено на лампах [11]. Одной из причин этого была их непревзойденная стойкость к электромагнитному импульсу ядерного взрыва, что объясняет и современный интерес к этим электронным приборам. Другими областями применения вакуумных ламп остаются мощное радиоэлектронное оборудование радаров и других СВЧ-устройств (магнетроны, клистроны), например микроволновые печи, а также аудиотехника, где лампы обеспечивают лучшее качество звучания [4, 11]. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. Guarnieri M. Birth of Amplification Before Vacuum Tubes // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2012. December.
2. Tyne G. F. J. Saga of the Vacuum Tube. New York: Prompt Publications. 1994.

- Первый электронный усилитель был предложен Либеном в 1906 г. на основе электронно-лучевой трубки Брауна для замены электромеханических ретрансляторов телефонных линий.
- Практическое применение в телефонии Первой мировой войны нашла более мощная лампа Либена в виде аудиона с парами ртути. Недостатками такой лампы оказались температурная нестабильность и большие габариты.
- Лучшими характеристиками обладал усилитель Арнольда на основе аудиона Лиде Фореста высокого разряжения («жесткая» лампа) со схемой сеточного смещения Ловенштейна, обеспечивавшей неискаженное воспроизведение звука.
- Переход на «жесткие» многосеточные лампы и их миниатюризация привели к повсеместному применению ламповых усилителей вплоть до середины XX в. Постепенно их вытеснили транзисторы, но не везде: ламповые усилители по-прежнему используют в мощной СВЧ-технике, аудиотехнике и военной электронике, стойкой к электромагнитному импульсу.

3. Angetter D., Martischinig M. Biografien österreichischer [Physiker]. Wien: Herausgegeben vom österreichischen staatsarchiv. 2005.
4. Пестриков В. М. Электровакuumный триод, или разные пути решения одной проблемы // IT news. № 20 (69). 24 октября 2006.
5. Быховский М. А. Развитие телекоммуникаций. На пути к информационному обществу. История развития электроники в XX столетии. М.: Либроком, 2012.
6. Robert von Lieben. Kathodenstrahlenrelais. Patent DRP 179807. Deuten Reich. 4 Marz 1906.
7. Микеров А. Г. Аудион де Фореста — первая трехэлектродная электронная лампа // Control Engineering Россия. 2019. № 5 (83).
8. Fleming J. A. The thermionic valve and its developments in radiotelegraphy and telephony. London, New York: The Wireless press. 1919.
9. Llewellyn F.B. www.rfcafe.com/references/radio-news/birth-electron-tube-amplifier-march-1957-radio-television-news.htm.
10. Lowenstein F. Telephone relay. US patent 1231764. April 24, 1912.
11. www.en.wikipedia.org/wiki/Vacuum\_tube.
12. www.ru.wikipedia.org/wiki/Пентод.