Усенков Дмитрий Юрьевич

ОТ ТЕРМЕНВОКСА ДО «ЗЛАТОУСТА»,
или Что бывает, когда лирика встречается с физикой

17 ноября 2019 года на Первом канале телевидения был дан старт очередному, шестому сезону детского конкурса «Синяя птица». Среди представленных конкурсантами номеров был один, пожалуй, наиболее запоминающийся своей необычностью. Владимир Иванов – 13-летний участник из подмосковного Красногорска – продемонстрировал умение игры на уникальном электронном музыкальном инструменте под названием *терменвокс* (рис. 1).

Чем же этот инструмент так уникален? У него нет ни клавиш, ни струн, ни педалей – только две торчащие из деревянного ящика металлические антенны. Более того: исполнитель даже не прикасается к инструменту! А мелодия поет – нежная, певучая, завораживающая, похожая и непохожая одновременно на звучание и скрипки, и флейты… и какая-то неземная…

Давайте познакомимся поближе с этим инструментом и с его создателем – гениальным советским инженером, музыкантом и изобретателем *Львом Сергеевичем Терменом*.

МУЗЫКАНТ – УЧЕНЫЙ – ИНЖЕНЕР [1]

Л. С. Термен родился, по разным данным, 27 или 28 августа 1896 года в Санкт-Петербурге, еще во времена Российской Империи в дворянской семье, предки которой

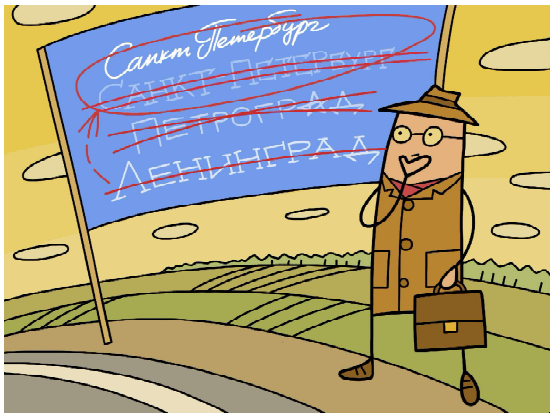
Рис. 1. Владимир Иванов играет на терменвоксе (кадр из видеотрансляции Первого канала, конкурс «Синяя птица», выпуск 1 шестого сезона, 17.11.2019)

были французами (так что правильное написание родовой фамилии Льва Сергеевича – Theremin). Лев получил разностороннее образование: увлекался игрой на виолончели, но интересовался и физикой: в квартире Терменов была оборудована физическая лаборатория и даже домашняя обсерватория, а во время обучения в Петербургской первой мужской гимназии (которую Лев окончил в 1914 году с серебряной медалью) он проявлял интерес к физике уже с третьего класса, а в четвертом классе уже демонстрировал «резонанс типа Тесла».

После окончания гимназии, в 1916 году Лев окончил Петербургскую консерваторию по классу виолончели, но одновременно с этим учился и на физико-математическом факультете Петроградского университета, в том числе у не менее известного русского и советского ученого – «отца советской физики» академика Абрама Федоровича Иоффе (который в те годы был приват-доцентом).

Будучи призванным в армию, Л. С. Термен прошел подготовку в Николаевском инженерном училище, а затем на офицерских электротехнических курсах и служил младшим офицером запасного электротехнического батальона, обслуживавшего Царскосельскую радиостанцию – самую мощную во всей Российской Империи.

После Великой Октябрьской Социалистической Революции в 1917 году Л. С. Термен продолжал работу на этой радиостанции, а затем был направлен в военную радиолабораторию в Москву.



Термен успел стать жителем нашей северной столицы во всех трех ее «именных ипостасях»...

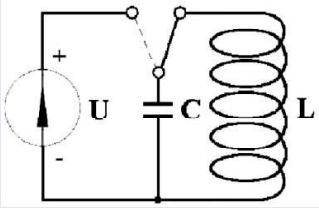
Несмотря на то, что Термен мог считаться вполне состоявшимся инженером-радиотехником, его ум продолжал жаждать знаний. В 1920 году Л. С. Термен стал студентом физико-механического факультета Петроградского Политехнического института, а в мае 1926 года защитил диплом об окончании Ленинградского Политехнического института (к тому времени Петроград стал уже Ленинградом. Таким образом, Термен успел стать жителем нашей северной столицы во всех трех ее «именных ипостасях» и даже успел застать обратное переименование Ленинграда в Санкт-Петербург).

В 1919 году Л. С. Термен стал заведующим лабораторией Физико-технического института в Петрограде – как специалиста по радиотехнике его пригласил в институт лично А. Ф. Иоффе. Темой исследований Льва Сергеевича было измерение диэлектрической постоянной газов при различных давлениях и температурах. И именно эта, казалось бы, скучная и чисто теоретическая область занятий подтолкнула Л. С. Термена к изобретению нового музыкального инструмента!

Измерительная установка, сконструированная Терменом, представляла собой генератор электрических колебаний. Но основным элементом такого генератора является резонансный колебательный контур, состоящий из двух радиокомпонентов: катушки индуктивности и конденсатора. В данном случае для выполнения измерений конденсатором служили два электрода в виде металлических пластин, между которыми в герметичной емкости был заключен исследуемый газ. Электрические характеристики этого газа определяли значение емкости этого конденсатора и, соответственно, частоту получаемых электрических колебаний.

Решая задачу повышения точности измерений, Л.С. Термен пришел к идее объединения двух генераторов, один из которых являлся «опорным» (всегда давал колебания неизменной частоты), а другой – «экспериментальным» (частота которого изменялась в зависимости от характеристик исследуемого газа и немного начинала отличаться от

НЕМНОГО ФИЗИКИ



Колебательный контур – это простейшая электрическая цепь, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания. Идеальный (теоретически рассматриваемый) колебательный контур содержит катушку индуктивности, конденсатор и подключаемый к ним в начале работы источник электрической энергии (в реальном колебательном контуре также требуется рассматривать такой параметр, как электрическое сопротивление).

Первоначально источник электроэнергии (например, гальваническая батарея) подключается к конденсатору и заряжает его. Затем конденсатор переключается на катушку индуктивности (фактически – электромагнит).

Последующие процессы можно упрощенно[1] описать следующим образом.

Конденсатор начинает разряжаться через катушку индуктивности, что вызывает постепенное нарастание ее магнитного поля. После того как конденсатор полностью разрядится, магнитное поле, накопленное в катушке индуктивности, начнет создавать в ней электрический ток противоположного направления, который заряжает конденсатор напряжением обратной полярности по отношению к первоначальной. Далее снова происходит разряд конденсатора, накопление магнитной энергии в катушке индуктивности и перезарядка конденсатора, и т. д.

В результате возникают гармонические колебания электрического тока синусоидальной формы: для идеального колебательного контура такие колебания будут незатухающими, в реальном же колебательном контуре за счет потерь энергии колебания получаются затухающими.

Резонансная частота колебательного контура определяется формулой Томпсона: $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Колебательный контур может выполнять роль фильтра, пропускающего колебания, близкие к его резонансной частоте («полосовой фильтр»), либо, наоборот, поглощающего колебания резонансной частоты (режекторный фильтр).

«Разъединив» пластины конденсатора, мы получаем открытый колебательный контур, в котором обычно одной «пластиной» конденсатора является антенна, а в роли второй «пластины» выступает заземление.

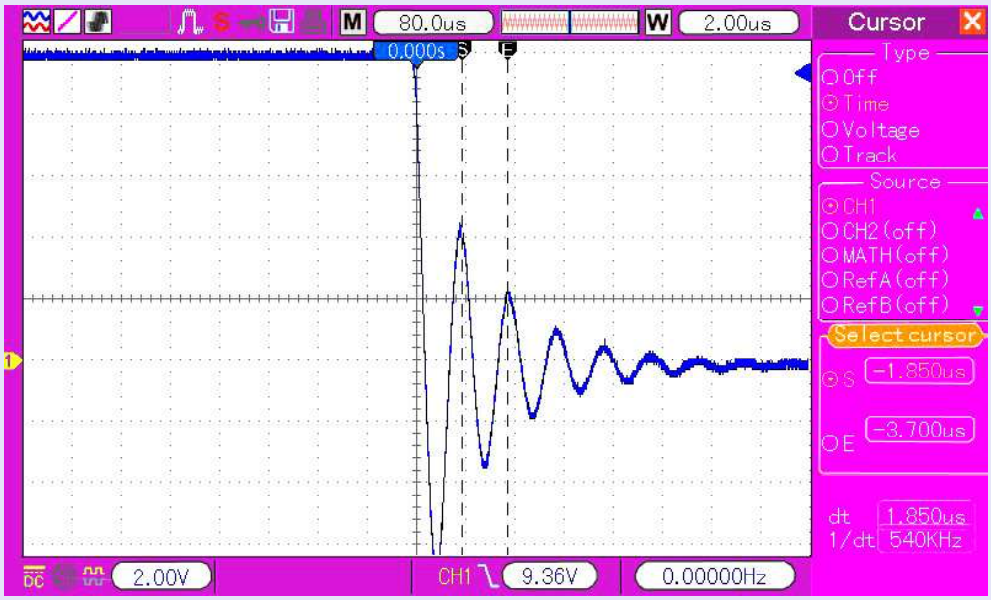


Рис. Затухающие гармонические колебания, получаемые в реальном колебательном контуре (фото: Arseniy Mur, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LC_circuit;_LC_voltage(oscll).gif)

[1] Более точно процессы, происходящие в колебательном контуре, описаны, например, в [2] и связаны с явлением самоиндукции. – *Прим. авт.*

опорной). При наложении таких немного отличающихся колебаний друг на друга за счет их интерференции возникают *биения* – получаемый суммарный (или же разностный) сигнал позволяет получить низкую частоту, соответствующую звуковому диапазону. В результате изменения диэлектрической постоянной исследуемых газов, приводящей к изменению емкости конденсатора, соответственно, к изменению рабочей частоты колебательного контура и, в итоге, к изменению частоты биений, можно было определять на слух!

Фактически созданная Л.С. Терменом установка уже представляла собой электронный музыкальный инструмент, в котором мелодия управлялась электрическими характеристиками конденсатора.

НЕМНОГО ФИЗИКИ

Биения. При взаимном наложении (суммировании) двух гармонических колебаний, частота которых различается незначительно, за счет интерференции интенсивность (амплитуда) получаемого суммарного сигнала (его огибающая) изменяется с низкой частотой. При сложении двух исходных сигналов одинаковой амплитуды можно рассчитать [3], что частота получаемого суммарного сигнала окажется равна среднему арифметическому исходных частот, а частота биений (удвоенная частота огибающей) равна разности частот исходных сигналов.

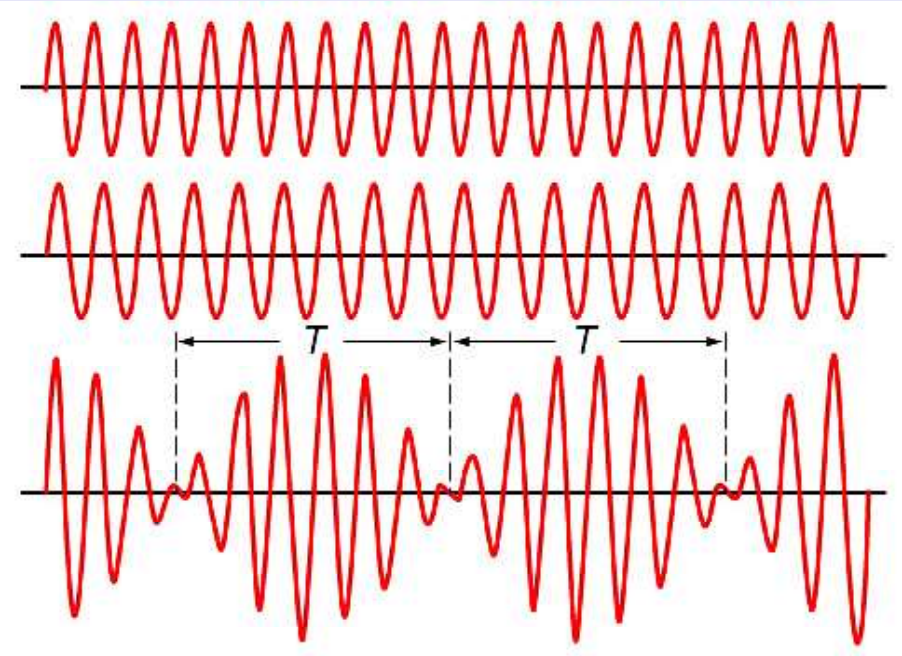


Рис. Возникновение биений при сложении двух гармонических колебаний одинаковой амплитуды, имеющих незначительно различающиеся частоты («Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия», https://megabook.ru/stream/mediapreview?Key=Биения%20(наложения%20 колебаний)&Width=654&Height=654)

Такое изменение сигнала во времени называют *амплитудной модуляцией*: высокая частота (несущая частота) меняет свою амплитуду (*«модулирована»*) по низкой частоте. Амплитудная модуляция, в частности, была основой реализации АМ-радиосвязи – самой первой технологии, примененной при создании радио.

Используя радиоэлектронную схему – *детектор* (включающую диод и конденсатор), можно выделить из такого модулированного сигнала его низкочастотную огибающую, получив в результате сигнал низкой (звуковой) частоты, соответствующей разности частот исходных сигналов – опорной частоты и «экспериментальной».

ПЕРВЫЙ В МИРЕ ЭЛЕКТРОННО-МУЗЫКАЛЬНЫЙ [4]

После создания Л. С. Терменом экспериментальной установки, в которой изменения параметров конденсатора приводили к появлению звука, до изобретения музыкального инструмента, на котором можно исполнять мелодии, оставалось совсем немного. Изобретатель заметил, что получаемая разностная частота меняется даже при поднесении руки к емкости с исследуемым газом: ведь тело человека можно считать заземленным. Обладая тонким музыкальным слухом, Термен без особого труда смог подобрать мелодию.

Чтобы превратить физическую экспериментальную установку в музыкальный инструмент, Термен несколько доработал ее. Теперь колебательный контур был сделан открытым, обкладки конденсатора представляли собой антенну и «заземление», а электрические параметры конденсатора изменялись в зависимости от положения в пространстве относительно антенны руки исполнителя, что позволяло за счет перемещений руки менять частоту звука: плавные перемещения руки дают плавное изменение звука, а дрожание руки – эффект «вибрато». Был также добавлен еще один аналогичный колебательный контур, позволяющий при помощи второй антенны управлять изменениями громкости звука. Таким образом, терменвокс не только является самым первым в мире электромузыкальным инструментом, но и уникален тем, что является полностью бесконтактным: при игре на нем не требуется никаких прикосновений исполнителя к инструменту.

В ноябре 1920 года на заседании кружка механиков имени профессора Кирпичёва Л. С. Термен дал свой первый концерт (рис. 2). А в марте 1922 года Л. С. Термен вместе с председателем Радиосовета А. М. Николаевым демонстрировали вновь изобретенный инструмент в московском Кремле В. И. Ленину и даже научили Ленина игре на этом инструменте.

Кстати, первоначально изобретенный Терменом инструмент носил название «этеротон» («звук из эфира»), но позже был назван в честь изобретателя «терменвоксом» (в переводе – «голос Термена»).

В настоящее время существует несколько типовых моделей терменвоксов.

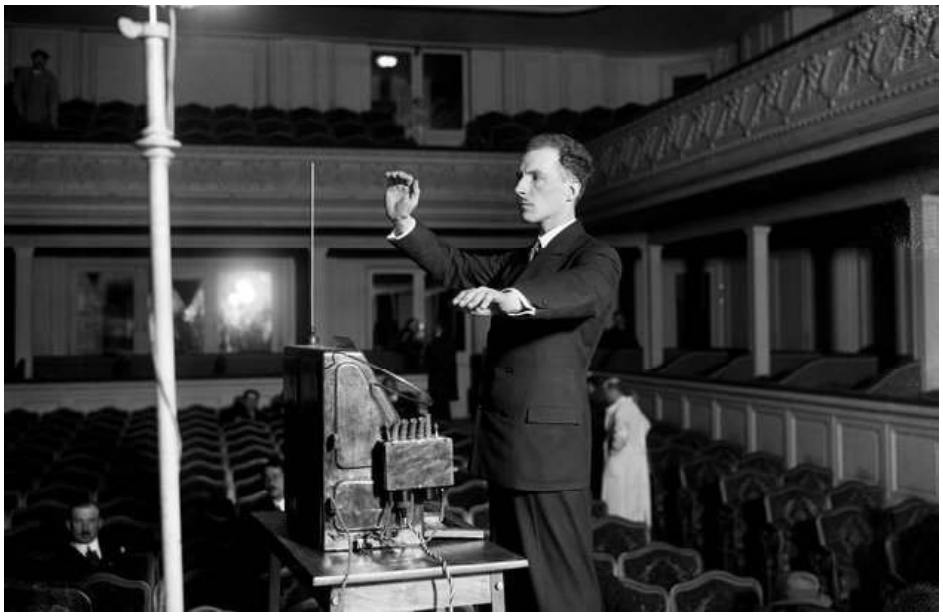


Рис. 2. Лев Сергеевич Термен демонстрирует изобретенный им электронный музыкальный инструмент – терменвокс (декабрь 1927 года) (фото: Bettmann, Corbis – http://tygodnik.onet.pl/35,0,57107,sowiecki_faust,artykul.html (polish), Общественное достояние, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23704011)

Классический терменвокс по конструкции Л. С. Термена представляет собой аппарат с двумя антеннами: вертикальная прямая антенна отвечает за изменение тона звука, а петлеобразная боковая – за изменение громкости. Играть на таком инструменте нужно стоя. Л. С. Термен лично изготовил несколько подобных инструментов, один из которых хранится сегодня в Потитехническом музее (рис. 3). Сегодня выпускается целый ряд моделей классических терменвоксов, которые могут быть оснащены дополнительными панелями регулировки (рис. 4); например, терменвокс можно приобрести, воспользовавшись сервисом «Яндекс.Маркет». А при желании можно и построить терменвокс самому: никакой тайны из этого не делается, а схемы доступны в Интернете, например в статье из «Моделиста-Конструктора» (https://theremintimes.ru/ru/archives/1380).

Терменвокс Ковальского – сконструирован К. И. Ковальским (первым исполнителем и учеником Л. С. Термена). В этой модификации, на которой играют сидя, высота звука регулируется правой рукой, левая задействована на кнопочном манипуляторе для управления общими параметрами звука, а громкость регулируется ножной панелью (рис. 5).

Матрёмин – созданный в 1999 году в Японии (конструктор – руководитель школы игры на терменвоксе Масами Такэути) музыкальный инструмент в виде русской матрёшки (рис. 6). Частота звука меняется при приближении и удалении руки. Существуют большие оркестры исполнителей на матрёмине; так, в сентябре 2019 года в Книге Рекордов Гиннеса был зафиксирован самый большой оркестр терменвоксов в мире из 289 исполнителей, которые в городе Кобе (Япония) совместно исполнили на матрёминах «Оду к радости» Бетховена.

Рис. 3. Терменвокс Л.С. Термена, хранящийся в Политехническом музее (фото: Политех на ВДНХ, https://polymus.ru/ru/museum/news/eksponat-termenvoks-pervonachalnyy)

Рис. 4. Современные терменвоксы классической схемы

Существуют также «виртуальные» терменвоксы, реализованные на компьютере программным способом. В этом случае на сенсорном экране рисуется прямоугольная система координат (частота – громкость), звук извлекается касанием экрана пальцем или стилусом, а управление тоном и громкостью – путем перемещения по экрану в этой системе координат. Другая конструкция может быть построена на базе современных пространственных датчиков типа Kinect или Leap Motion, которые позволяют распознавать расположение и перемещения в пространстве руки пользователя (рис. 7). Реализация такого виртуального терменвокса показана в видеофрагменте: https://www.youtube.com/watch?v= cNwDKULhAsw&feature=emb_logo. Вообще же идея терменвокса как инструмента достаточно проста и может быть реализована с помощью любой системы распознавания положения пальцев на плоскости (сенсорные панели различных типов) или в пространстве (в последнем случае появляется возможность одной рукой управлять сразу тремя параметрами звука, например частотой, громкостью и тембром).

Исполнителей, умеющих играть на терменвоксе, всегда было немного. Однако су-

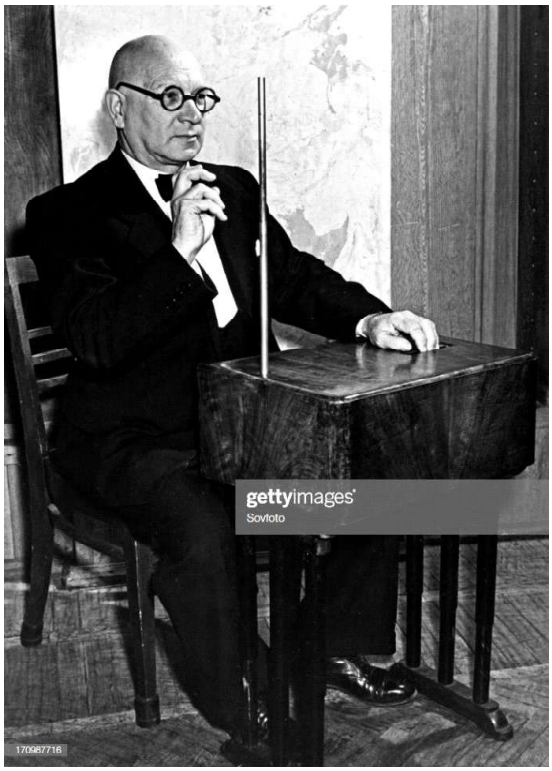


Рис. 5. К. И. Ковальский за пультом сконструированной им модификации терменвокса (фото GettyImages, https://media.gettyimages.com/photos/the-orchestra-of-electric-musical-instruments-konstantin-kovalski-picture-id170987716)

Рис. 6. Матрёмин – терменвокс, спрятанный внутри матрешки (фото https://remotedevice.net/tag/theremin)

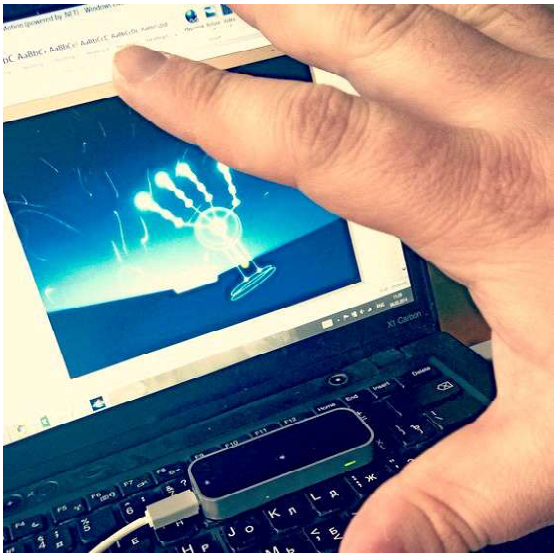


Рис. 7. Пространственный датчик Leap Motion позволяет отслеживать перемещения руки пользователя в пространстве (фото http://blog.soshnikov.com/wp-content/uploads/2014/03/6tag_060314-1141311.jpg)

ществуют, по крайней мере, две музыкальные школы, посвященные обучению игре на этом своеобразном инструменте. В Европе и на территории бывшего СССР действует «Russian Theremin School» (https://theremin.school), которая работает в Москве и Санкт-Петербурге под руководством Петра Термена (правнука изобретателя терменвокса Льва Сергеевича Термена), – именно Петр Термен подготовил Владимира Иванова к выступлению на конкурсе «Синяя птица». А в Японии школа, обучающая игре на терменвоксе, работает под руководством Масами Такэути – изобретателя матрёмина.

Впрочем, у терменвокса есть и целая плеяда «родственников» – устройств, сконструированных на том же принципе распознавания положения пальца, руки или иной части тела пользователя в пространстве за счет измерения изменений емкости. Еще Л.С. Термен создал на базе аналогичной терменвоксу схемы емкостного реле охранную сигнализацию, а проекционно-емкостные сенсорные экраны (технология P-CAP) сегодня есть в любом «айфоне» или «айпаде», используются на многих современных ноутбуках, планшетах, смартфонах, в банкоматах и платежных терминалах.

Есть у терменвокса и значительный «потенциал на будущее». На базе этой технологии возможно создать устройство управления компьютером, заменяющее обычную мышь, например, расположив две антенны по краям дисплея (по вертикали и по горизонтали), тогда для перемещения курсора по экрану вообще не потребуется никаких технических приспособлений – система будет просто отслеживать перемещение руки пользователя в пространстве перед экраном (и даже без необходимости при этом «елозить» пальцем по его поверхности). Более того, такая «мышь без мыши» может быть трехмерной (с отслеживанием перемещений по всем трем координатам), а анализ динамики изменения емкостных характеристик позволит задействовать различные жесты в качестве управляющих команд (например, перебирая в воздухе пальцами или вибрируя всей кистью) – тогда работа с компьютером станет подобна работе дирижера, управляющего оркестром.

Рис. 8. Основа системы развертки телевизионного изображения в системе «дальновидения» Л. С. Термена – диск с зеркальцами (фото https://habr.com/ru/company/pult/blog/398435)

НЕ ТОЛЬКО ТЕРМЕНВОКС

Терменвокс был далеко не единственным изобретением Л. С. Термена. Кроме упомянутой выше сигнализации на базе емкостных датчиков, Термен создал множество других удивительных устройств.

Так, еще в 1926 году Л. С. Термен по приглашению академика А. Ф. Иоффе создал систему «дальновидения» – по сути, самые первые в мире телевизионный приемник и передатчик, в которых построчная развертка изображения была реализована по механическому принципу – при помощи фотоэлементов и вращающегося диска или барабана с зеркальцами (http://www.theremin.ru/archive/dalnovid.htm; рис. 8). При этом были созданы не только экспериментальные, но и действующие телевизионные установки такого типа, в том числе одна – по заказу Наркомата Обороны СССР.

Л. С. Термен сконструировал целый ряд электронных музыкальных инструментов. Среди них – «терпситон» (http://www.theremin.ru/archive/terpsiton1.htm) – рис. 9, принцип действия которого аналогичен терменвоксу и в котором исполнение мелодии реализовывалось движениями всего тела исполнителя – по сути, мелодия рождалась в танце, – электронная виолончель, «ритмикон» для формирования любых желаемых музыкантом ритмических структур (www.theremin.ru/archive/rhythmicon0.htm),

«гармониум» для хорового исполнения, проводились эксперименты в области светомузыки (в том числе со стереоскопической проекцией).

В 1940-х гг. в туполевском конструкторском бюро ЦКБ-29 вместе с С.П. Королевым Л. С. Термен участвовал в разработке управляемых по радио беспилотных летательных аппаратов – предшественников современных крылатых ракет и боевых дронов.

Еще одним уникальным изобретением Л. С. Термена стала система прослушивания «Златоуст» [5] на базе микроволнового резонатора, предназначенная для получения разведданных из американского посольства. «Жучок», не имевший аналогов в мире, был вмонтирован в вырезанный из ценных пород дерева герб США, который во время визита в пионерлагерь «Артек» в 1945 году (по случаю 20-летнего юбилея пионерлагеря) посла США Аверелла Гарримана был подарен ему советскими пионерами (рис. 10).

Конечно же, контрразведка США тщательно проверяла подарок. И – ничего не обнаружила! Никаких источников питания и никаких электромагнитных излучений. Но изобретение Термена и не нуждалось ни в каких источниках питания: оно приводилось в действие микроволновым излучением, ис-

Рис. 9. Терпситон Л.С. Термена (фото https://habr.com/ru/company/pult/blog/398435)

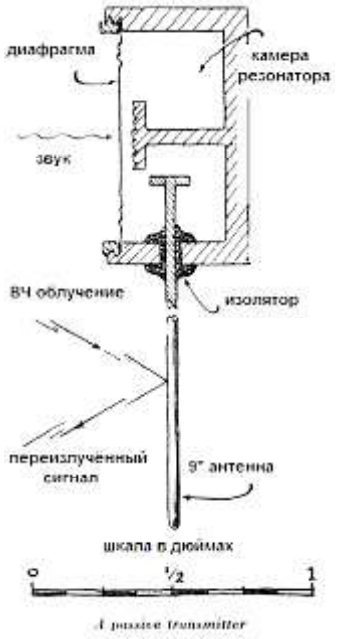


Рис. 10. Подарок американскому посольству с вмонтированной в него системой прослушивания «Златоуст», разработанной Л.С. Терменом, – сегодняшний экспонат музея ЦРУ в Лэнгли, штат Вирджиния (*слева*; фото https://habr.com/ru/company/pult/blog/398435) и схема микроволнового резонатора конструкции Термена (*справа*; https://topwar.ru/33369-zlatoust-v-amerikanskom-posolstve-shedevry-russkogo-shpionazha.html)

точник которого мог находиться где угодно в радиусе 100 метров от «жучка».

«Златоуст» прослушивал посольство США до 1952 года, когда «жучок» был обнаружен по чистой случайности: в эфире была обнаружена трансляция сигнала с него. Американские спецслужбы буквально перевернули вверх дном все посольство, осмотрели каждую мелочь. И… вообще не догадались, что перед ними: устройство состояло только лишь из металлической проволоки длиной 9 дюймов, полой камеры-резонатора и мембраны – и никаких батареек и даже радиодеталей!

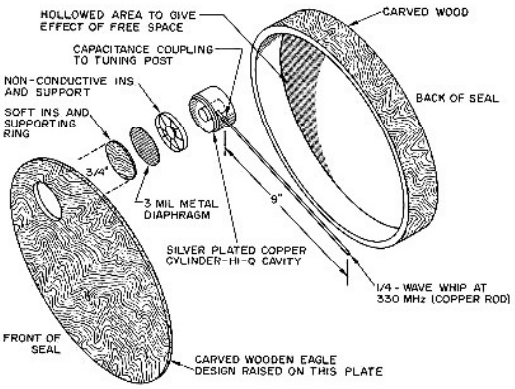


Рис. 11. Обнародованная американцами схема обнаруженного ими «жучка» (https://topwar.ru/33369-zlatoust-v-amerikanskom-posolstve-shedevry-russkogo-shpionazha.html)

Разобраться в принципах работы «Златоуста» американцам помог британский ученый Питер Райт, и знакомство с микроволновым резонатором Термена буквально шокировало западные спецслужбы. Американские специалисты признали, что если бы не случайность, то буквально вечный «жучок» мог бы по-прежнему прослушивать Посольство США в Москве. Позор оказался настолько велик, что американцы даже не решались раскрыть факт обнаружения «прослушки». И только через 8 лет, когда противовоздушная оборона СССР сбила незаконно пересекший советскую границу американский самолет-разведчик U-2, пилотируемый Пауэрсом, американцы в качестве «контраргумента» в ответ на обвинение в шпионаже обнародовали обнаружение устройства Термена (рис. 11, 12).

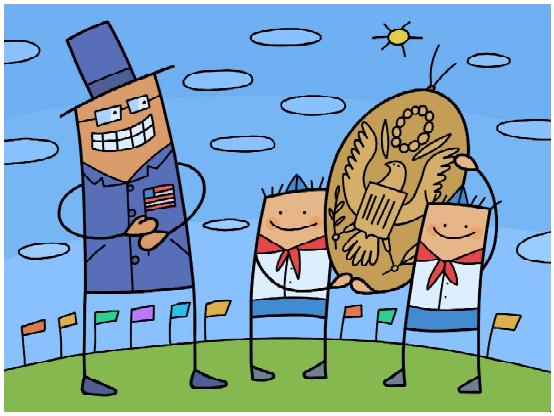
Интересно, кстати, что американцы и британцы пытались скопировать разработ-

Рис. 12. Обнародование американцами обнаружения подслушивающего устройства Л.С. Термена на заседании ООН (https://habr.com/ru/company/pult/blog/398435)

ку Л.С. Термена: но проект «Мягкое кресло», проводимый под руководством ЦРУ, вообще не дал результатов (американские инженеры так и не смогли добиться нужного качества отраженного сигнала), а британская разработка «Сатир» обеспечивала передачу сигнала всего-навсего на 30 ярдов (примерно 28 метров). Ну и, конечно же, был уже утрачен «элемент неожиданности» – теперь все страны уже знали о возможности подобного прослушивания и были начеку…

Наконец, еще одно изобретение Л. С. Термена также стояло на вооружении советской разведки: это инфракрасный микрофон «Буран» (рис. 13), способный выполнять прослушку по вибрации оконных стекол под действием звуковых волн (прообраз современных систем лазерной прослушки).

За свою долгую жизнь (97 лет, а в марте 1991 года в возрасте 95 лет даже вступил в ряды КПСС, как когда-то обещал В.И Ленину) Л. С. Термен создал множество удивительных изобретений. Его вполне можно считать «советским Эдиссоном» или «советским Тесла». Но, увы, в нашей стране никогда не умели ценить гениев. Началось смутное время «перестройки», СССР (не без помощи некоторых заокеанских «друзей») рассыпался, а наука и образование превратились для новых «гос.господ», заинтересованных только лишь в выкачивании денег в собственный карман, лишь в «обузу для бюджета». Лев Сергеевич доживал свои дни в «коммуналке», в полной нищете и забытье. В 1992 году неизвестные разгромили его комнату-лабораторию, при этом были разбиты все его инструменты и выкрадена часть архивов. Милиция, как в те времена бывало практически повсеместно, это преступление, конечно же, не раскрыла. В печати стали появляться лживые статейки, как, например, в газете «Совершенно секретно» под заго-



«Жучок», не имевший аналогов в мире, был вмонтирован в вырезанный из ценных пород дерева герб США...

Рис. 13. Инфракрасный микрофон «Буран» конструкции Л. С. Термена (https://habr.com/ru/company/pult/blog/398435/)

ловком «Он подслушивал Кремль», после которой в адрес Льва Термена и его семьи стали поступать угрозы расстрела. А когда в 1991 году Лев Термен и его дочь Наталья по приглашению должны были ехать на музыкальный фестиваль во французском Бурже, по их билетам за рубеж поехал кто-то из Министерства культуры… Зато в 1992 году в Москве появился «Термен-центр», ставящий главной задачей поддержку музыкантов и звуковых художников, работающих в области экспериментальной электроакустической музыки, однако сам Лев Термен к созданию этого центра, названного его именем, не имел никакого отношения. Более того, Лев Сергеевич обращался к руководителям «центра» с просьбой убрать из названия его присвоенное без разрешения имя, однако руководители центра на эту просьбу никак не отреагировали.

Л. С. Термен умер 3 ноября 1993 года. Российские газеты позднее написали об этом так: «В девяносто семь лет Лев Термен ушёл к тем, кто составлял лицо эпохи, но за гробом, кроме дочерей с семьями и нескольких мужчин, несущих гроб, никого не было…». Судьба, к сожалению, так характерная для «перестроечных времён» и для тех, чьё богатство заключалось в таланте и интеллекте, а не в энном количестве денежных знаков…

Литература

1. Термен, Лев Сергеевич // Википедия {электронный ресурс}. URL: https://ru.wikipedia.org/?oldid=102986273

2. Колебательный контур // Википедия {электронный ресурс}. URL: https://ru.wikipedia.org/?oldid=101985646

3. Биения // Википедия {электронный ресурс}. URL: https://ru.wikipedia.org/?oldid=94754668

4. Терменвокс // Википедия {электронный ресурс}. URL: https://ru.wikipedia.org/?oldid=101383124

5. Лев Термен — от музыки «из воздуха» до прослушки без «жучков» {электронный ресурс}. URL: https://habr.com/ru/company/pult/blog/398435

6. Чтобы помнили. ТЕРМЕН Лев Сергеевич: Ученый, конструктор и изобретатель (*текст размещен в сообществе по просьбе родственников Льва Термена*) {электронный ресурс}. URL: https://chtoby-pomnili.livejournal.com/483956.html

Усенков Дмитрий Юрьевич,
ГБОУ СОШ № 1360, г. Москва.