УСТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ В АКУСТИКЕ [1])

Г. Бакгауз

Содержание

IV. Некоторые вопросы электроакустики.

9. Методы исследования нестационарных акустических процессов. 10. Устанавливающиеся процессы в электроакустических аппаратах.

V. Устанавливающиеся процессы в звуках речи.

11. Органы речи. 12. Нестационарные процессы. 13. Согласные.

VI. Нестационарные процессы в музыкальных инструментах.

14. Общий обзор. 15. Смычковые инструменты. 16. Духовые инструменты. 17. Орган. 18. Фортепиано. 19. Ударные инструменты. 20. Электромузыкальные инструменты.

IV. Некоторые вопросы электроакустики

9. Методы исследования нестационарных акустических процессов

В настоящее время при изучении акустических процессов почти исключительно применяется такой метод исследования, при котором процессы, происходящие в звуковом поле, превращаются с помощью микрофона в электрические колебания. При этом в большинстве случаев применяются такие микрофоны, которые регистрируют колебания давления. В рамки настоящей статьи не входит рассматривать различные конструкции микрофонов. Здесь мы коснемся кратко только конструкции конденсаторного микрофона, который для подобных измерений является очень подходящим и поэтому широко применяется. Емкость такого конденсаторного микрофона изменяется под влиянием колеблющегося давления, и эти изменения емкости воспринимаются теми или иными электрическими приборами. При этом существует принципиально два различных метода: по схеме Риггера и Ф. Тренделенбурга[17] микрофон включен в колебательный контур высокой частоты, настройка которого изменяется в зависимости от колебания емкости. Вследствие этого амплитуда колебаний высокой

[1]) См. Успехи физич. наук, 19, 236, 1938.

частоты модулируется в такт с изменениями давления около микрофона. Другой метод состоит в том, что микрофон приключается через большое сопротивление к источнику постоянного напряжения, так что изменения емкости вызывают разрядные и зарядные токи, вызывающие переменное падение напряжения на сопротивлении, которые затем усиливаются. Этот второй метод вследствие своей большей простоты, а также вследствие того, что при нем не приходится соблюдать специальных мер, необходимых при пользовании высокой частотой, нашел наиболее широкое применение. В отношении устранения нелинейных явлений оба метода приблизительно равноценны, так как амплитуды передаются достаточно правильно в широкой области частот. Если же стремиться к точной передаче правильной кривой процесса, то надо принять во внимание, что при низкочастотной схеме возникают фазовые искажения, которые при невысоких частотах (примерно до 200 Hz в зависимости от емкости примененного микрофона) вызывают искажения получающихся на осциллограмме кривых.

В некоторых случаях, особенно при небольшом количестве обертонов, можно удовлетвориться непосредственной записью устанавливающегося процесса. Из полученной кривой могут быть легко вычислены продолжительность установления, постоянная времени и декремент. Если же процесс характеризуется многочисленными и сильными обертонами, то приходится поставить вопрос, в какой степени может здесь оказаться полезным разложение на отдельные колебания. Автор этой статьи[33] одним из первых произвел запись процесса по возможности без амплитудных и фазовых искажений. Для того чтобы установить, какие области частот в определенные моменты времени этого непериодического процесса наиболее сильно выражены, необходимо выполнить гармонический анализ с произвольно выбранным основным периодом. При этом в качестве основного периода принимается период установившегося звука. Если последующие отрезки времени выбранного интервала проанализировать, то те обертоны, которые наиболее близки к реально имеющимся, в результате анализа получатся наиболее усиленными, причем результат будет вполне однозначным. Амплитуды отдельных обертонов могут быть представлены в форме ступенчатых кривых, состоящих из горизонтальных прямых линий (длина которых соответствует их периоду), между которыми, конечно, нет непрерывного перехода. Если эти кривые приближенно представить с помощью непрерывной кривой, то получающиеся результаты не следует понимать в том смысле, что они строго выражают разложения процесса на отдельные обертоны. Совершенно нельзя утверждать, что обертон периодического процесса одинаковой постоянной частоты также присутствует и в устанавливающемся процессе. Однако такой метод построения указывает, насколько сильно выражены те области частот, которые близки к соответствующему обертону, в каждый момент нестационарного процесса.

Вышеописанный метод чрезвычайно трудоемок, так как приходится выполнять многочисленные графические анализы, для того чтобы получить отдельный обертон устанавливающегося процесса. Поэтому были предприняты разнообразные попытки упростить методику. Известные автоматические методы анализа в данном случае не применимы вследствие ограниченной скорости анализирующих аппаратов. Подобный анализ требует даже при особо благоприятных условиях по крайней мере несколько секунд. Однако эта методика может быть применена при анализе непериодических процессов в том случае, если возможно звуковой процесс повторно воспроизводить достаточно точно. Этим методом Мейер и Бухман[28] исследовали устанавливающиеся и спадающие звуковые процессы и нашли у музыкальных инструментов во многих случаях не только гармонические линейные спектры, но и непрерывный звуковой спектр. Однако к этим результатам, даже в том случае, если они хорошо воспроизводимы, надо относиться с осторожностью, так как более быстро изменяющиеся компоненты при некоторых обстоятельствах могут оказаться недостаточными для того, чтобы быть замеченными, и их совпадение с частотой „зондирующего" тона анализатора может оказаться в значительной степени случайным.

Исследование быстро изменяющихся акустических процессов для определения изменения во времени отдельных обертонов, строго говоря, невозможно, да и нет в этом особой необходимости. Достаточно установить, в какие моменты времени колебания, лежащие в определенной области частот, более или менее сильно выражены. Для достижения этой цели был разработан целый ряд методов, общей чертой которых является применение частотных фильтров. Ф. Тренделенбург и Франц[63] применили для этой цели октавный фильтр по схеме Тило и Штейделя[71], в котором пропускаемые полосы частот с интервалом в одну октаву включаются по очереди так, что может быть перекрыта вся область частот от 37,5 до 9 600 Hz. При этом должно быть снято несколько осциллограмм для каждой октавы, а также одновременно и не отфильтрованный процесс для того, чтобы можно было удостовериться в его повторяемости. Дальнейшее развитие этой идеи представляет так называемый „звуковой частотный спектрометр" по схеме Фрейстеда[65]. Здесь уже для каждой октавы применены 3 фильтра в логарифмической последовательности. Эти фильтры по очереди включаются с помощью вращающегося переключателя, пропущенные ими колебания вызывают отклонение катодного осциллографа, который приключается к соответствующим фильтрам. Весь процесс записывается с помощью кинематографического аппарата. Наконец, надо упомянуть метод „Осциллографированич с помощью октавных фильтров", который был одновременно и независимо друг от друга разработан Ф. Тренделенбургом и Францем[88], с одной стороны, и Фирлингом[64], с другой стороны. Этот метод состоит в том, что звуковое колебание, вос-

*

принятое микрофоном, одновременно поступает на 6 октавных фильтров в области от 100 до 6400 Hz по 6 каналам, причем пропущенные через фильтры звуки одновременно подаются на 6 осциллографов, и, кроме того, 7-й осциллограф записывает непрофильтрованный процесс. Тренделенбург [88] подробно исследовал возможности этого метода. Он пришел при этом к заключению, что звуковые процессы, протекающие с декрементом, большим, чем собственный декремент примененного октавного фильтра, недопустимо искажаются. В октавных фильтрах для одновременного применения собственные декременты были порядка 0,21, при ранее применявшихся фильтрах [63] (переключаемых отдельно) собственный декремент был порядка 0,7. При исследованиях речи и звуков музыкальных инструментов декремент порядка 0,21 является вполне достаточным.

10. Устанавливающиеся процессы в электроакустических аппаратах

О качестве электроакустических аппаратов раньше судили почти исключительно на основании их частотной характеристики, т. е. на основании того, насколько одинаково передаются различные частоты. На основании известных теоретических соотношений между резонансными кривыми и устанавливающимися процессами можно считать принципиально такой критерий совершенно достаточным. Но эти соотношения могут быть использованы, как показал автор [33], только для очень простых форм резонансной кривой и не могут быть непосредственно перенесены на те более сложные кривые, которые встречаются главным образом в громкоговорителях и иногда также и микрофонах. На этом основании представляются совершенно необходимыми экспериментальные исследования устанавливающихся процессов в громкоговорителях и микрофонах. В других электрических передающих аппаратах, как усилители и трансформаторы, искажения, вызванные только что названными причинами, могут быть устранены с помощью методов, разработанных в электротехнике. Соответствующее описание указано Бюрком, Котовским и Лихте [83] (стр. 10). Вопрос, на который должен быть получен ответ на основании эксперимента, может быть сформулирован так: мешают ли передаче побочные частоты, получающиеся в соответствующем аппарате при передаче нестационарных звуковых процессов вследствие возникновения затухающих колебаний собственной частоты с достаточно большой амплитудой. Или, иначе говоря, передает ли аппарат данный нестационарный процесс без заметных искажений.

Исследуя безрупорные громкоговорители с большой поверхностью, автор [33] путем записи процессов нарастания и процессов спадания в звуковом поле, а также записи движения мембраны, возбуждаемой толчком, показал, что в этом случае имеют место слабо затухающие собственные колебания с частотой около 50 Hz.

Продолжительность установления при более хороших громкоговорителях составляла приблизительно 40 *мсек*, для более плохих доходила до 1 сек. Причина этого заключается в том, что в громкоговорителях этой конструкции вследствие мягкого прикрепления мембраны наблюдаются сильно выраженные колебания с собственной частотой около 50 Hz. Своеобразный глухой тембр, наблюдающийся при громкоговорителях исследованной конструкции, обусловлен, очевидно, этими низкими собственными колебаниями, все время возникающими при воспроизведении неустачовившихся процессов. Конструкция может быть значительно улучшена с помощью более мягкого прикрепления мембраны, так чтобы собственная частота сместилась бы к нижней границе области слухового восприятия, а также с помощью более сильной демпфировки. Увеличение затухания в электродинамических громкоговорителях, как указал Нейман [30], подобно тому, как это имеет место в гальванометрах с вращающейся катушкой, может быть осуществлено с помощью усиления магнитного поля. Нейман экспериментально показал, что это мероприятие весьма благоприятно влияет как на форму частотной кривой, так и на ход нестационарных процессов. В рупорных громкоговорителях с относительно маленькой мембраной собственная частота вследствие влияния упругости переходной камеры смещается в сторону более высоких частот, одновременно наблюдается также довольно значительное увеличение затухания. Мак Лаклан и Мак Кей [52] показали это теоретически. Экспериментальные результаты, относящиеся к этому случаю, были получены Шафштейном [62]. Передающие аппараты и главным образом громкоговорители в отношении искажений при устанавливающихся процессах были исследованы также Бюрком, Котовским и Лихте [53] с помощью вышеописаной методики (см. III, 7). При этом оказалось, что вблизи собственного резонанса в небольших громкоговорителях наблюдаются значительные постоянные времени. При высоких частотах в минимуме между двумя резонансными кривыми наблюдаются „отрицательные“ постоянные времени (т. е. возбуждение импульсов), что может быть объяснено детекторным действием громкоговорителя. Названные исследователи пришли к заключению, что хотя в громкоговорителях и наблюдаются заметные искажения при устанавливающихся процессах, но они значительно меньше мешают восприятию, чем искажения, обусловленные другими причинами, среди которых унтергармонические колебания мембраны (так называемый „son rauque“) [49] являются наиболее существенными.

Устанавливающиеся процессы в микрофонах, обладающих сравнительно малой поверхностью, имеют значительно меньшее значение, чем в громкоговорителях. Высоко настроенный микрофон, обладающий достаточно ровной и в пределах области слухового восприятия горизонтальной частотной характеристикой, не дает, как это легко понять, заметных нестационарных процессов. С другой стороны, экспериментальное исследование микрофона в отношении

процессов установления не так просто, как громкоговорителя, так как трудно подать на микрофон тон без процесса установления. С помощью телефона или громкоговорителя это осуществить невозможно. Поэтому Барта [50] в своем подробном исследовании этого вопроса возбуждал микрофон или с помощью термофона или же с помощью электростатического „щипка". Он показал, что высоко настроенный конденсаторный микрофон подходящей конструкции действительно не дает никакого заметного процесса установления. При дальнейшем исследовании других микрофонов конденсаторный микрофон применялся для сравнения одновременно с исследуемыми микрофонами, возбуждаемыми громкоговорителем. С помощью этого метода были исследованы: 1) конденсаторный микрофон конструкции Риггера, 2) ленточный микрофон, 3) высококачественный угольный микрофон конструкции Рейса, 4) обыкновенная микрофонная капсюла микротелефонной трубки, 5) электромагнитный микрофон (телефон). Результат исследования может быть формулирован так: для того чтобы правильно передать все устанавливающиеся процессы, встречающиеся в речи и в музыке, микрофон должен в течение приблизительно 3 *мсек* практически устанавливаться. Этому требованию соответствует некоторое предельное затухание $D_{\lim} = \frac{\vartheta_{\lim}}{\pi}$, где ϑ означает логарифмический декремент. Опыты показали, что при микрофонах 1 и 3 это предельное затухание уже перейдено, при 2 как раз достигнуто, при 4 и 5 еще не достигнуто. Этому соответствует определенная форма резонансной кривой, из которой равным образом может быть определено затухание.

V. Устанавливающиеся процессы в звуках речи

11. Органы речи

Механизм образования звуков речи подробно выяснен в последних работах В. Тренделенбурга и его сотрудников [59, 60, 77, 78]. Ими было установлено [59] (в полном согласии с воззрениями Гельмгольца [6]), что голосовые связки в гортани при фонации пропускают короткие импульсы воздуха, вызываемые увеличенным давлением в легких, а затем совершенно закрываются. При этом фаза закрытия продолжается (особенно при низких тонах) иногда дольше, чем фаза открытия; при высоких тонах это может и не наблюдаться. Процесс, происходящий в течение одного периода, можно представлять себе так, что примыкающие к гортани полости глотки, носа и рта приводятся в собственные колебания вследствие этого короткого импульса воздуха. При этом возникают затухающие колебания, которые можно отчетливо наблюдать на осциллограммах некоторых звуков речи. В. Тренделенбург [78] установил, что все гласные, записанные на осциллограммах, снятых с помощью микрофона, начи-

наются группой сильно выраженных колебаний, которые занимают приблизительно $^1/_3$—$^1/_5$ часть периода. Эта „начальная группа" очень точно совпадает во времени с открытием голосовой щели, как это было установлено при одновременной записи звуков голоса и движений голосовой щели на препарате гортани.

Из полученных кривых гласных было установлено на основании их формы в начале каждого периода, что колебательный процесс начинается именно этой начальной группой, возникающей вследствие отрывистого раскрытия голосовой щели (рис. 17). При этом было подтверждено, что эта начальная группа действительно возникает вследствие открывания голосовой щели. При звуках более высокого регистра, при которых фаза раскрытия занимает значительно большую долю периода, начальная группа получается менее отчетливо выраженной.

Это исследование процессов, происходящих в течение одного периода, значительно разъясняет механизм действия органов речи. Для полного же объяснения образования звука речи это исследование недостаточно. Для этого еще необходимо принять во внимание, что упомянутые раскрывания голосовой щели происходят периодически через определенные интервалы времени, и следовательно, необходимо иметь в виду этот строго периодический или по крайней мере почти периодический процесс. Является весьма целесообразным произвести разложение этого периодического процесса в ряд Фурье и не только исходя из чисто математических соображений, но главным образом из соображений физических, принимая во внимание свойство нашего уха как анализатора частот („по Фурье"). Импульсы воздуха пропускаются голосовой щелью в такт с основной частотой и заключают в себе значительное количество гармонических обертонов с довольно значительной амплитудой. Возникающий акустический процесс, который мы называем звуком речи, получает характеризующий его оттенок, свой тембр, вследствие того, что соответственные обертоны усиливаются благодаря резонансу в полостях носа, глотки и рта. Это представление о механизме образования звуков речи эквивалентно во всех отношениях ранее изложенному представлению о процессах, происходящих в течение одного периода. При строгом и логическом развитии этих двух теорий, очевидно, должны получаться совершенно одинаковые результаты. Поэтому совершенно необоснованно разрабатывать различные теории образования гласных звуков, исходя из этих двух эквивалентных друг другу основных предпосылок. В. Тренделенбург [59] заметил многие черты сходства в механизме действия органов речи и смычковых инструментов. Две связанные между собой системы, а именно струна и корпус инструмента, соответствуют голосовым связкам и резонирующим полостям. Затухание в первом случае уменьшается благодаря действию смычка, во втором — благодаря току вдуваемого воздуха. Соответствующую электрическую аналогию, как это показал автор [81], представляет ламповый генератор с промежуточным контуром. В. Тренделенбургу

удалось, далее, показать на основании своих опытов с препаратами путем изменения примыкающих к гортани резонансных полостей, что колебания голосовых связок при этом заметно не изменяются. На основании этих опытов следует заключить о наличии очень слабой связи между этими двумя колебательными системами.

12. Нестационарные процессы при образовании гласных

При фонации изолированных гласных вступительная фаза нарастания колебаний не наблюдается. Автор [33] установил, что при обычном произнесении гласной характеризующая этот звук форма колебаний вполне образуется уже по истечении немногих миллисекунд. В. Тренделенбург [78] также установил, что при резком произнесении гласной стационарные колебания начинаются непосредственно (рис. 17). На основании этого можно считать, что у гласных совершенно отсутствует тот отличительный признак, который у других звуков, особенно у звуков музыкальных инструментов, служит для характеристики самого звука. В гласных начальная фаза не имеет никакого значения, так как они могут быть с полной уверенностью распознаны на основании их стационарного тембра, на основании их формант. В случае звуков музыкальных инструментов положение совсем другое. Этот факт автору данной статьи [33] удалось обосновать теми соображениями, что области резонанса, на которые настраиваются при произнесении гласных полости рта и носа, очень широки. Характеризующие данную гласную области формант вследствие этого усиливают не какой-либо определенный обертон, но целую область обертонов. Этот размытый резонанс обусловливается сильным затуханием вследствие трения о мягкие стенки резонансных полостей. Это большое затухание должно вызывать, кроме того, быстрое прекращение процесса нарастания колебаний, как это и было установлено при исследовании гласных. Эта теория была подтверждена исследованиями В. Тренделенбурга [77], который произвел запись звуковых колебаний, возникающих в полости рта, настроенного для произнесения соответствующей гласной и возбуждаемого с помощью короткого импульса. Из полученных таким способом кривых были определены собственные частоты и декремент полости рта. Импульсы, вызывающие колебания полости рта, осуществлялись или с помощью резкого отрыва губ при быстром открывании рта, или с помощью резкого удара пальцем, или же, наконец, при разрыве слюнной пленки, которая легко может быть образована между губами. При правильной настройке полости рта были установлены чрезвычайно большие декременты затухания порядка 0,2—0,37 и, кроме того, были определены области формант. Эти цифры очень хорошо совпадают со значениями декремента, ранее полученными Ф. Тренделенбургом и Францем [63] с помощью осцилло-

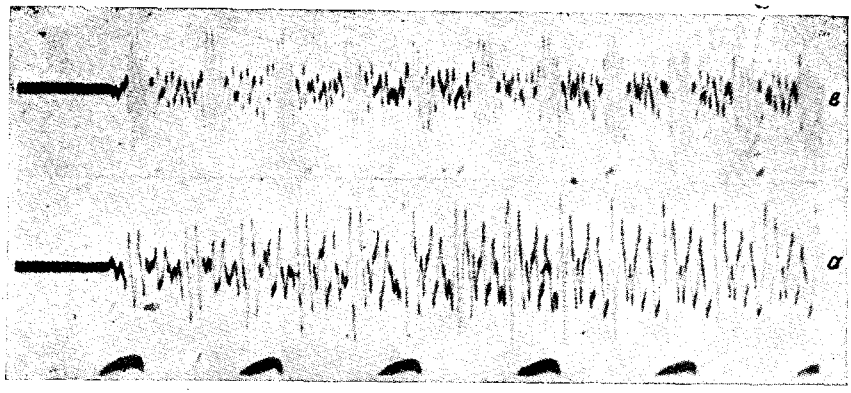

Рис. 17. Осциллограммы резко произнесенных гласных „е“ и „а“ (по В. Тренделенбургу)

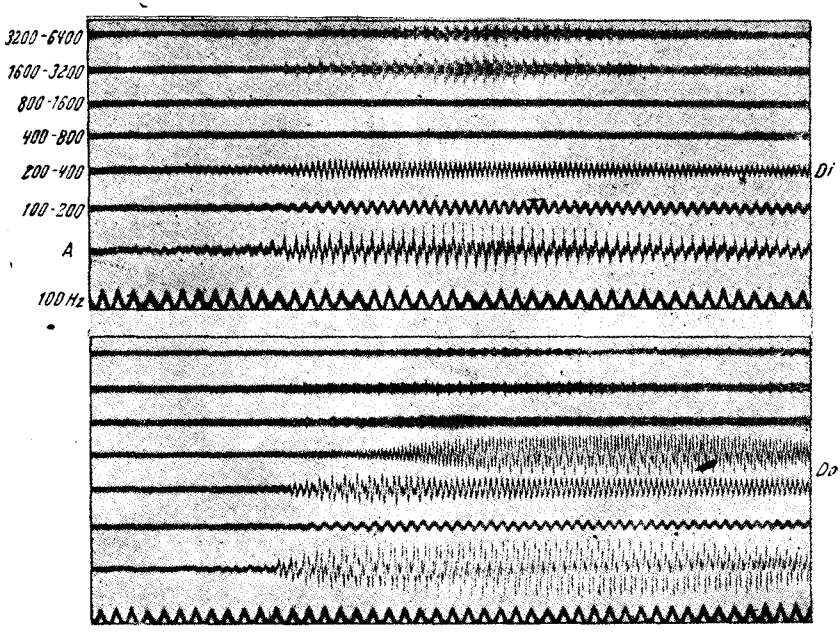

Рис. 18. Осциллограммы слогов Di и Do, снятые с помощью октавных фильтров (по Ф. Тренделен гу и Е. Францу)

грамм, снятых при посредстве октавных фильтров, а именно: для гласной „а“ — 0,13—0,29 а для гласной „и“ — 0,2.

Необходимо твердо подчеркнуть, что гласные принципиально представляют строго периодический процесс, так как время от времени появляются на этот счет неправильные высказывания [76]. Разложение колебаний линейной колебательной системы, за которую мы должны принимать как орган слуха, так и орган речи, по собственным функциям неминуемо приводит к ряду Фурье. Гласный звук, пропетый достаточно долгое время при постоянной высоте и амплитуде и рассматриваемый как целое, во всей своей последовательности, а не только в пределах одного периода, состоит из стационарных строго гармонических обертонов. Именно такой процесс и надо рассматривать как обусловливающий восприятие гласных. В разговоре наблюдаются часто изменения основной частоты, амплитуды и тембра, однако характер гласной при этом нисколько не изменяется. Автор [33] установил, что при произнесении „ба“ и „да“ форманта гласной „а“ по истечении 10 *мсек* наблюдается только в низком диапазоне при 660 Hz, а по истечении 20 *м/сек* возрастает до 1155 Hz. В. Тренделенбург [78] объясняет это тем, что при открывании рта после согласной губы с некоторой скоростью устанавливаются для произнесения гласного звука „а“ и при этом переходе должны пройти через положения, характерные для произнесения „у“ и „о“. В разговорной речи такие переходы между чистыми и отчетливыми гласными и менее четкими формами имеют часто место, как это было установлено Гемелли и Пастори [51,70]. Названные исследователи разделяют различные формы кривых для звука гласных на „типичные“ и „атипичные“. Для установления гласного звука оказывается вполне достаточно двух „типичных“ периодов. Штейнберг [53] произвел более подробные исследования изменений амплитуд и области формант при разговорной речи. Фирлинг и Зенгайзер [96] исследовали как короткие, так и длинные гласные с помощью осциллографирования при посредстве октавных фильтров, причем исследуемый диапазон доходил до 11 200 Hz. Они нашли, что разница между короткими и длинными гласными заключается не только в продолжительности звучания, но при этом наблюдается и значительная разница в спектральном характере. Короткие гласные характеризуются прежде всего значительно большим количеством высоких обертонов, чем длинные гласные, которые до сих пор главным образом и служили предметом исследований. При гласной „а“ все форманты перемещаются в сторону более высоких частот, а при гласной „е“ — только нижняя форманта; в то же самое время возникает новая форманта в области 700—1400 Hz.

13. Согласные

Гласные представляют основу речи. Согласные же являются типичными примерами нестационарных процессов, для которых трудно

указать определенные, характеризующие их в акустическом отношении свойства. Их участие в образовании звуков речи состоит в том, что они влияют как на процесс установления следующей за ними гласной так и на процесс прекращения звучания предшествующей им гласной. Промежуточное положение занимают звонкие полугласные „м“, „н“, „л“, „р“. Сравнительно давно еще Ф. Тренделенбург [18] установил, что эти звуки являются смесью различных звуков, состоящей из сильно выраженных гармонических и не гармонических обертонов, главным образом высокого диапазона. Это было показано особенно убедительно при осциллографировании с помощью октавных фильтров [58]. При этом колебание голосовых связок не является единственным источником звука. Вся кинетическая энергия тока воздуха не превращается в гортани целиком в звуковую энергию, некоторая часть накладывающегося на колебательное движение воздуха постоянного потока в местах сужения в полостях глотки создает шумы, возникающие главным образом вследствие образования вихрей. Ф. Тренделенбург определил частоты, характеризующие звуки „л“, „м“, „н“, в полном согласии с прежними наблюдениями Штумпфа [20]; однако подробно рассматривать эту работу мы здесь не будем, так как это не входит в рамки нашей статьи. Гемелли и Пастори [51] установили, что при произнесении звуков „л“, „м“, „н“ сопровождающие их гласные влияют на характер звучания согласных и именно в том смысле, что придают им форманты, характеризующие соответствующую гласную. Так например, звук „л“ в слове „кабала“ сопровождается формантой гласной „а“, а в слове „мокколо“ сопровождается формантой „о“.

Некоторые особенности имеет звук „р“. При произнесении „р“ небно-зубного (linguale) с помощью колебания языка или при произнесении „р“ задненебного (uvulare) с помощью вибрации небного язычка наблюдаются перерывы тока воздуха, происходящие с частотой 20—40 Hz. Вследствие этого возникает модуляция звука по амплитуде. Ф. Тренделенбург [18] показал, что этот процесс следует рассматривать как наложение друг на друга двух близких синусоидальных колебаний, которые вообще не находятся в гармоническом соотношении друг другу. Следовательно, „р“ надо рассматривать как смесь различных звуков.

К смеси различных звуков надо, далее, отнести звонкие шипящие. Ф. Тренделенбург и Франц [63] показали с помощью осциллографирования при посредстве октавных фильтров, что в низком диапазоне до 600 Hz лежат строго гармонические обертоны, возникающие вследствие колебания голосовых связок, а в области высокого диапазона лежат негармонические обертоны, которые возникают вследствие образования вихрей при прохождении тока воздуха около зубов. При глухих шипящих наблюдаются только эти шумы, которые по наблюдениям Грютцмахера [16] при очень резком произнесении простираются до 13 000 Hz.

Особое значение для рассматриваемого вопроса имеют так назы-

ваемые взрывные звуки (Explosivlaute), которые удобно разделить на две группы: первую, состоящую из „б“, „д“, „г“ (Mediae), и вторую, состоящую из „п“, „т“, „к“ (Tenues). Еще Гельмгольц [6] произвел некоторые очень ценные субъективные наблюдения относительно этих звуков. Более подробное исследование было проведено автором этой статьи [33] и Ф. Тренделенбургом и Францем [63, 88] с помощью осциллографирования при посредстве октавных фильтров. При произнесении звуков второй группы („п“, „т“, „к“) голосовая щель остается открытой, а при произнесении звуков первой группы („б“, „д“, „г“) — сначала закрыта, а затем при произнесении начинает колебаться. Вследствие этого звуки первой группы следует рассматривать как звонкие звуки. В зависимости от положения того места, в котором происходит закрывание с тем, чтобы при произнесении звука происходил отрыв, обусловливающий соответствующий звук, разделяются звуки на губные — „б“ и „п“, зубные — „д“ и „т“ и гортанные — „г“ и „к“. Объективное отличие между различными звуками прежде всего заключается в продолжительности шума, сопровождающего данный звук. Ф. Тренделенбург [88] нашел в среднем следующие продолжительности звучания в миллисекундах, находящиеся в хорошем совпадении с результатами, полученными автором этой статьи [33], именно:

„пе“ — 65, „те“ — 57, „ке“ — 79, „бе“ — 13, „де“ — 19, „ге“ — 22.

Те же самые продолжительности наблюдаются и тогда, когда соответствующая согласная звучит между двумя гласными. Обата и Тезима [57] приводят данные относительно продолжительности звучания согласных звуков в китайском и монгольском языках, отчасти совпадающие с вышеприведенными. При произнесении звуков второй группы (Tenues) главным образом выражен шум, характеризующий согласную, при произнесении же звуков первой группы (Mediae) наблюдаются и звонкие компоненты одновременно со значительным ослаблением шумовых компонент. Ф. Тренделенбург [88] в полном согласии с субъективными наблюдениями Гельмгольца [6] установил, что звонкие компоненты возникают раньше, чем шумовые компоненты, характерные для данного звука. При произнесении звуков Mediae между двумя гласными звонкие компоненты остаются, в то время как при произнесении звуков Tenues они совершенно пропадают. Гортанные звуки „г“ и „к“ характеризуются тем, что шумы, специфичные для данных звуков, возникают подобно импульсам. При произнесении звуков Tenues автор [33] установил, что после первого вступления наступает некоторая промежуточная фаза, характеризующаяся придыханием. Особенно сильно наблюдается этот процесс при произнесении звука „п“, как это было найдено Ф. Тренделенбургом [88] и Лихте [67]. При произнесении этого звука наблюдается отчетливый и сильный импульс, создаваемый током воздуха. На основании прежних наблюдений было установлено, что образование формант следующей за Mediae гласной

вообще происходит скорей, чем при произнесении Tenues. Ф. Тренделенбург [88] при этом показал, что это время, необходимое для установления форманты, в очень сильной степени зависит от того, насколько положение языка и настройка полости рта, соответствующие данной согласной, отличаются от необходимой настройки для произнесения гласной. Так например, при произнесении „д“ язык находится около верхних зубов и для произнесения „и“ требуется его только немного отодвинуть, в то время как для произнесения „о“ язык должен быть значительно дальше отодвинут от зубов и между задней частью языка и язычком должно образоваться сужение. Наблюдение вполне подтверждает эти рассуждения. На рис. 18 представлены кривые, снятые Тренделенбургом [88] с помощью октавных фильтров, на рис. же 19 представлены максимальные значения, наблюдавшиеся в отдельных октавных интервалах при произнесении „ди“ и „до“, в зависимости от времени.

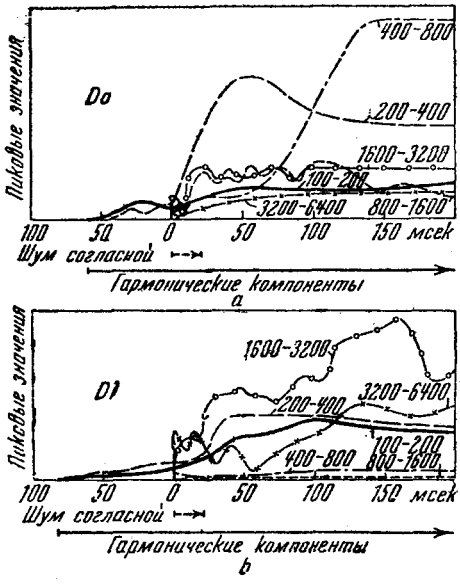

Рис. 19a и b. Пиковые значения в отдельных октавных интервалах при произнесении слогов Di и Do (по Ф. Тренделенбургу и Е. Францу)

VI. Нестационарные процессы в музыкальных инструментах.

14. Общий обзор

В звуках музыкальных инструментов чрезвычайно большую роль играют нестационарные процессы, особенно процессы, происходящие при нарастании колебаний. На основании исследований Штумфа [20] сделалось известным, что установление принадлежности данного звука тому или другому музыкальному инструменту, а также и отличие друг от друга звуков, создаваемых различными музыкальными инструментами, не могут быть выполнены даже опытным музыкантом, если звучит только чисто стационарный звук без сопровождающих его нестационарных процессов, т. е. процессов, происходящих при нарастании и при спадании звука. Отсюда [88] следует заключить, что отличительные черты различия звуков различных инструментов обусловливаются не их „музы-

кальным" тембром (спектром), но главным образом процессами нарастания, очень сильно различающимися у отдельных музыкальных инструментов. Мейер [28] впервые показал, что вряд ли в этом вопросе играют сколько-нибудь большое значение форманты, т. е. те области частот, усиление которых характерно для данного звука. В этом вопросе наблюдаются как раз противоположные соотношения, чем в звуках гласных: резонирующие системы в музыкальных инструментах в большинстве случаев очень слабо задемпфированы, вследствие этого их резонансные кривые часто состоят из острых пиков, как это было показано впервые автором этой статьи [81] при исследовании звуков скрипки. Поэтому здесь не может возникать вопрос о закономерном образовании формант, так как часто соответствующие обертоны возбуждающей системы приходятся в области впадин резонансной кривой. С другой стороны, нестационарные процессы должны быть вследствие незначительного затухания очень отчетливо выражены и относительно продолжительны. Именно в них, главным образом в процессах, происходящих при нарастании колебаний, и лежат главные отличительные признаки, характеризующие звук того или иного музыкального инструмента.

Однако особая важность нестационарных процессов, происходящих в музыкальных инструментах, обусловливается не только вышеупомянутыми причинами. Строго стационарный звук производит монотонное впечатление и мало приятен. Слуховое впечатление делается значительно интереснее, если примешать к стационарному звуку некоторое количество негармонических с ним звуков, что достигается, например, введением в оркестр ударных инструментов. Те музыкальные инструменты, например смычковые инструменты, звук которых легко может быть модулирован, пользуются наиболее широким распространением. Наоборот, вызывает большое сожаление отсутствие возможности к модуляции у органа. Вследствие этого звук приобретает характер как бы застывший, и орган может применяться только для исполнения вполне определенных вещей, для которых создаваемый им эффект является подходящим.

15. Смычковые инструменты

Процесс нарастания в звуках скрипки очень сильно выражен и продолжается приблизительно 100 *мсек*. На рис. 20 представлено постепенное развитие отдельных частичных тонов. В течение первых 30 *мсек* преобладают преимущественно высокие обертоны в области от 3000 до 5200 Hz. Они обусловливаются хорошо известным шумом при движении смычка. Эти же самые обертоны также хорошо выражены и в установившемся звуке. Развитие более низких обертонов, повидимому, происходит вследствие того, что нажатие смычком в первые фазы вступления еще недостаточно

для создания колебаний с преобладанием основного тона. С течением времени нажим смычка увеличивается, вследствие этого порядок преобладающего обертона делается ниже и ниже до тех пор, пока окончательно не начинает преобладать основной тон; это наступает приблизительно по истечении 100 *мсек*. Далее, было установлено с помощью определения амплитуд отдельных обертонов в течение достаточно продолжительного времени, что даже в том случае, когда исполнитель стремится поддерживать все время возможно более постоянный и равномерный звук, все же наблюдаются относительно сильно выраженные изменения в амплитудах отдельных обертонов, неминуемо возникающие вследствие специфических особенностей при движении смычка рукой [33].

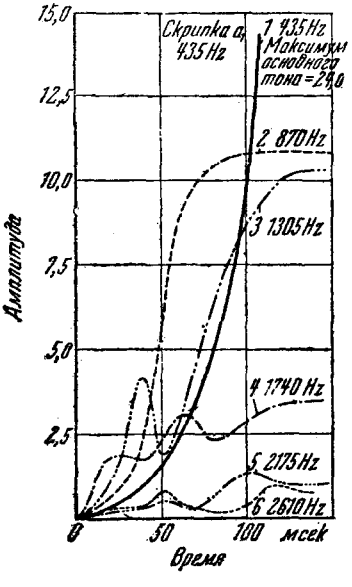

Рис. 20. Изменения во времени отдельных компонент звука скрипки (по Г. Бакгаузу).

Для того чтобы устранить неравномерности, обусловленные движением смычка рукой, автор этой статьи [94] произвел запись устанавливающихся процессов, наблюдающихся в звуках скрипки, при возбуждении звука с помощью специального автоматического приспособления. При исследовании струны, твердо закрепленной с двух сторон, было установлено наличие определенной оптимальной степени нажатия смычка, при которой, с одной стороны, процессы нарастания звуков протекают быстрее и, с другой стороны, основной тон выражен наиболее сильно. Декремент одной струны оказался чрезвычайно малым, приблизительно $\vartheta = 0{,}004$. Вследствие работы, необходимой для деформирования подставки, декремент струны значительно возрастает и делается в среднем приблизительно $\vartheta = 0{,}04$, значение которое также наблюдается и для декремента резонирующего корпуса, так что обе части системы — струна и корпус — практически одинаково сильно задемпфированы. Продолжительность нарастающего процесса отдельных струн оказалась следующей: струна g — 0,4 сек., струна d — 0,24, струна a — 0,16 сек., струна e (металлическая) — 0,16. Эти значения были определены для отдельных струн, натянутых на инструменте. Вычисляемые отсюда затухания $\frac{\vartheta}{\pi}$ оказываются для свободной струны все одного и того же порядка — 0,01.

Для укороченных струн наблюдаются приблизительно в 2 раза бо́льшие значения. Вычисленные затухания на основании записей нестационарных колебаний оказываются того же самого порядка

0,01; при этом наблюдается отчетливый максимум в области главного резонанса скрипки — около 500 Hz. Кроме того, затухание возрастает с увеличением толщины струны. При соответствующей обработке корпуса скрипки, при которой получается меньшая толщина деревянных стенок, наблюдается увеличение затухания, очевидно, вследствие увеличения излучения. При устанавливающихся процессах в области главного резонанса наблюдаются особенно простые соотношения для отфильтрованного основного тона, которые должны теоретически происходить в системе с двумя степенями свободы, отдельные части которой обладают одинаковой собственной частотой и одинаковым затуханием. Воспользовавшись теоретически полученными соотношениями, можно на основании записанных кривых вычислить величину коэфициента связи и затухания. Обе эти величины уменьшаются с уменьшением толщины струны, как это было установлено на всех исследованных инструментах. В отношении коэфициента связи этот вывод легко может быть понят, если принять во внимание, что передача колебаний деке скрипки главным образом осуществляется с помощью левой подставки. Для повышения качества скрипки, очевидно, следует рекомендовать возможно более тесную связь между струной и корпусом.

Фирлинг [64] произвел записи устанавливающихся процессов в звуках скрипки с помощью логарифмического усилителя. Он не получил прямолинейного уменьшения и отсюда заключил, что при уменьшении амплитуды колебаний все меньшее количество отдельных частей инструмента принимает участие в колебании, и вследствие этого затухание уменьшается. В скрипках наблюдаемый эффект в значительной степени замаскирован еще тем обстоятельством, что, как это известно из теории свободных колебаний системы с несколькими степенями свободы, здесь нельзя ожидать строго экспоненциального спадания, особенно при наличии сильной связи.

У смычковых инструментов, особенно у виолончели, иногда наблюдаются неустойчивые явления, известные под названием „вольфтона" (Wolfton). Этому вопросу посвящена работа Вольмера [90] (см. также [81]). При исследованиях с помощью октавных фильтров было показано, что при этом возникают сильные биения основного тона, происходящие с частотой приблизительно 10—15 Hz. Раман [8] дал этому явлению объяснение, основанное на энергетических соображениях. Для более отчетливого понимания этого процесса следует напомнить, что механизм действия смычкового инструмента имеет большую аналогию с действием лампового генератора с промежуточным контуром или с действием язычковой трубы. В обоих случаях имеются так называемые явления затягивания, наблюденные Вином и Фогелем у органных труб. Объяснение причины возникновения вольфтона может быть получено из теории Роговского, относящейся к ламповому генератору с промежуточным контуром [15]. Оказывается, что при надлежаще подобранной обратной связи

возможно обе системы при настройке друг на друга раздемпфировать. При этом возникают свободные малодемпфированные колебания связанной системы, которые дают друг с другом биение. Вычисленные на основании этого коэфициенты связи очень хорошо совпадают со значениями, полученными на основании других соображений. Образование вольфтона следует рассматривать как недостаток инструмента. Однако отсюда не следует, что о плохом качестве инструмента можно заключить по одному лишь наличию вольфтона. У некоторых знаменитых скрипичных инструментов часто обнаруживаются вольфтоны. Предпосылкой для образования их является сильно выраженный главный резонанс. Мы можем на основании этого рассматривать вольфтон как нежелательное побочное явление, сопровождающее хорошее качество инструмента. Устранение вольфтона может быть достигнуто или путем увеличения затухания главного резонанса, или же путем помещения резины между корпусом и грифом, или же с помощью соответствующего возбуждения второй струны.

16. Духовые инструменты

В духовых инструментах нестационарные процессы имеют значительно меньшее значение, чем в смычковых инструментах. При длительно звучащем тоне его амплитуда и тембр очень мало меняются. Мейер и Бухман [28] нашли, что в звуках гобоя и фагота можно найти наличие формант. Причиной этого, повидимому, является сильное затухание воздушного столба вследствие узкой мензуры. В соответствии с этим устанавливающиеся процессы у этих инструментов продолжаются очень короткое время. Ф. Тренделенбург и Франц [88] выполнили некоторые измерения с гобоем. Процесс нарастания звука продолжается здесь очень равномерно и продолжается около 10 *мсек*. У кларнета [33] этот процесс продолжается 50—70 *мсек*. Сначала здесь возникают низкие обертоны. Ф. Тренделенбург [88] при этом нашел менее равномерный ход процесса. Ашов [87] произвел наблюдения, на основании которых были выяснены как механизм действия кларнета, так и процессы, наблюдающиеся при „передувании"; при очень сильном нажатии губ возникают биения, напоминающие вольфтон смычковых инструментов и возникающие вследствие аналогичных причин. Автор настоящей статьи [33] нашел продолжительность нарастающего процесса в саксафоне равным приблизительно 40 *мсек*, при этом наблюдается несколько более значительное усиление высоких частот, чем в звуках кларнета. Наиболее поразительным в течение этого процесса оказалось уменьшение амплитуд большинства обертонов в середине звучания. Очевидно, именно этим обусловливается своеобразное завывание, характерное для саксафона. Нарастающий процесс звучания флейты продолжается очень долго, 200—300 *мсек*. Иногда наблюдается [33] более быстрая вступительная фаза, закан-

чивающаяся в течение 50 и 60 *мсек*, после которой звук еще раз уменьшается с тем, чтобы только позднее достигнуть своей полной силы. Часто звук начинается с несколько другой частотой; это обстоятельство надо объяснить неустойчивостью самого механизма для вдувания звука. Вступление звука флейты создает вследствие этого недостаточно определенное, расплывчатое впечатление. Фирлинг [64] получил с помощью осциллографирования, при посредстве октавных фильтров, подобные же результаты. Кроме этого, им было показано, что, несмотря на столь длинный процесс нарастания звука, переход от одного тона к другому происходит значительно скорее, а именно меньше чем в течение половины времени, необходимого для нарастания звука. В процессе этого перехода наблюдается биение, возникающее между быстро вновь возникающим вторым тоном и более медленно затухающим первым тоном.

У медных духовых инструментов процессы нарастания звука до сих пор записаны только у трубы. Автор [33] обнаружил очень быстрое возрастание всех обертонов до максимальной величины с последующим постепенным уменьшением до постоянного значения. Ф. Тренделенбург и Франц [88] нашли, кроме того, в начале процесса звучания наличие негармонических шумов, образующихся при вдувании.

17. Орган

Звук органа возникает вследствие вдувания воздуха в трубы, причем начало и окончание подачи воздуха производятся с помощью специальных механизмов. Звук при этом получается весьма равномерный и монотонный. Изменение силы тона определенного регистра достигается только с помощью очень несовершенного механизма, подобного заслонке. Изменение тембра вообще не может быть получено, если не применять дополнительные трубы. Конструктора органов совершенно бессознательно стремились устранить этот недостаток органа тем, что создавали на различных регистрах самые разнообразные процессы нарастания звуков.

Очень подробные исследования процессов, происходящих при нарастании в звуках органа, были выполнены Ф. Тренделенбургом и его сотрудниками [82], [86]. Ими было установлено, что на регистрах с язычковыми трубами (труба, тромбон, корнет, гобой, человеческий голос) звук вообще возникает быстро и очень устойчиво, на регистрах с трубами без язычков (главный, закрытый, флейтовый, смычковый) стационарное состояние возникает медленно, недостаточно устойчиво и в большинстве случаев сопровождается значительным изменением во времени состава звука. Это наблюдение соответствует вполне тем результатам, которые были получены при исследовании отдельной флейты. Подражание музыкальным инструментам с помощью различных регистров органа представляется обыкновенному слушателю недостаточно удачным.

Причина этого в меньшей степени лежит в различии музыкального тембра, чем в различиях в процессах нарастания звука. Лучше всего удается подражание на регистрах трубы и тромбона, которые характеризуются, как и их образцы, очень быстрым установлением процесса звучания, так же как и на регистре гобоя. На регистре человеческого голоса быстро устанавливающийся звук обладает значительными негармоническими низкими компонентами. Разница между звуком регистра по сравнению с подражаемым звуком объясняется следующим образом. Существует большая аналогия между рассматриваемым здесь процессом и процессами, наблюдаемыми при взрывных согласных, когда за согласной, принадлежащей к группе Mediae, следует гласная. В стационарном звуке при этом главным образом в области высоких формант наблюдается большая аналогия с гласными человеческого голоса. Причину этого Ф. Тренделенбург видит, главным образом, в различной конструкции язычков. На регистрах трубы и тромбона эти язычки делаются короткими, широкими и толстыми, а на регистре человеческого голоса — более длинными, узкими и тонкими.

Особое внимание следует обратить на записи звуков регистра „Lieblich Gedackt" (рис. 21). Звучанию основного тона предшествует тон, частота которого приблизительно в $5^1/_2$ раз больше частоты стационарного тона, т. е. совершенно негармоничный с основным тоном. Тренделенбург [82] объясняет происхождение этих „предшественников" тона тем, что требуется вполне определенное давление воздуха для поддержания звучания стационарного основного тона, вследствие сильной неустойчивости процесса вдувания воздуха. Если необходимое давление воздуха еще не достигнуто, то звук трубы перескакивает на более высокий тон. На этом регистре удается осуществить чрезвычайно своеобразное и красочное звучание, а именно: при очень быстром следовании тонов друг за другом слышатся исключительно тоны-„предшественники", и только в протяжных пьесах возникают стационарные звуки. На другом подобном же регистре Ф. Тренделенбург установил необыкновенно длинный и равномерный процесс нарастания звука, продолжавшийся приблизительно 400 *мсек*. Субъективно это создает впечатление постепенного нарастания звука, которое, вообще, в органах не может быть осуществлено, но здесь создается вследствие особой формы устанавливающегося процесса. Необходимо подчеркнуть, что эти явления были установлены не только на отдельных органах, но что они наблюдаются во всех дорогих и, главным образом, старых инструментах. „В этом красочном разнообразии, представляемом процессами нарастания, главным образом, и лежит причина того глубокого впечатления, которое производит игра на действительно хорошем органе, причем это своеобразное впечатление никогда не может быть достигнуто никакими тембровыми изменениями стационарного звука".

Очевидно, эти вопросы, касающиеся процессов установления звуков, имеют чрезвычайно большое значение для конструкторов орга-

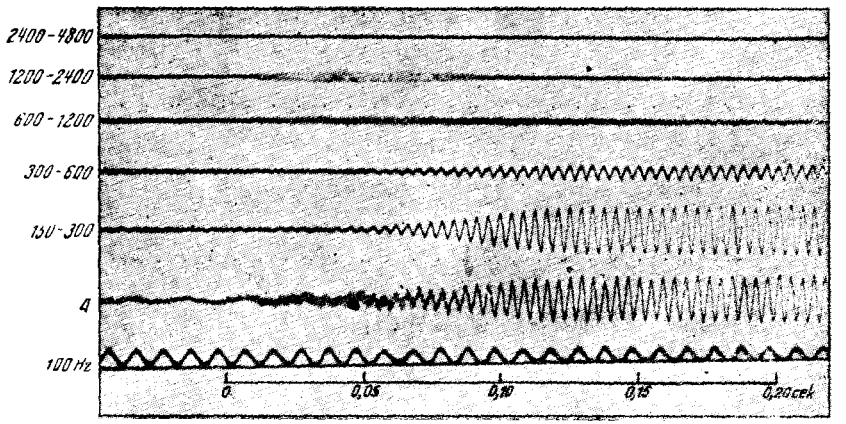

Рис. 21. Добавочное звучание для органного регистра „Lieblich Gelacki", высота тона c^1 (по Ф. Тренделенбургу и Е. Францу)

нов. Гаусман[43] исследовал влияние органных мехов и формы клапанов на процессы установления колебаний в органных трубах. В тех случаях, когда необходимо, чтобы основной тон особенно скоро начинал выделяться из звука органа, необходимо такое устройство пульта управления и клапанов, при котором труба, подводящая воздух, была бы возможно более короткой и возможно более прямолинейной.

Однако исследования Ф. Тренделенбурга совершенно не приводят к заключению, что желательно во всех случаях такое звучание, при котором выделялся бы основной тон.

18. Фортепиано

Звуки, издаваемые фортепиано, являются в основном нестационарными. Мейер и Бухман[28] установили, что, кроме гармонического линейного спектра, имеется еще и непрерывный спектр. Источником шума, представленного этим непрерывным спектром, является сама струна при низких и средних тонах вследствие расстройки при ударе молоточком. В области более высоких тонов становится заметным шум самого молоточка, причем компоненты этого шума могут доходить до основного тона приведенной в звучание струны. Это может быть объяснено тем, что струна должна быть достаточно жесткой для того, чтобы возбудить звучание молоточка. А это возможно только при более низких частотах, чем собственная частота струны. Такие же результаты были получены Ф. Тренделенбургом и Францем[88] с помощью метода осциллографирования с октавными фильтрами. Кроме того, они установили собственные колебания резонирующих частей фортепиано, возникающие вследствие отдельных ударов и негармоничные с основным тоном; особенно отчетливо это наблюдалось при звучании высоких тонов. Мейер и Бухман произвели запись процессов нарастания и спадания колебаний отдельных обертонов с помощью анализатора с зондирующим тоном. При этом было установлено при процессах спадания колебаний наличие отчетливых биений, как это, впрочем, и следовало ожидать у подобной связанной системы со многими степенями свободы. Подобные же результаты были получены Вольфом и Сетте[73]. Ланге[61] произвел подробное исследование движения струны и молоточка, а также излучаемого звука. При этом было установлено, что скорость движения молоточка в момент удара является функцией только скорости движения клавиши. Отсюда следует, что исполнитель имеет только единственную возможность для изменения характера звука, а именно путем изменения скорости движения клавиши. Это, впрочем, и следовало ожидать, несмотря на противоположные взгляды многих музыкантов, так как молоточек в момент удара движется совершенно свободно и не находится в соединении с клавишей, поэтому единственной могущей изменяться величиной является его скорость. Гарт, Фуллер

и Лезби[55] получили подобные же результаты, производя одновременное фотографирование как движения молоточка, так и воспроизводимого звука. Гош[74] установил, что форма колебаний фортепианных струн не зависит от скорости движения молоточка. Однако, с другой стороны, известно, что тембр изменяется в зависимости от силы удара. Согласно наблюдениям Мейера и Бухмана[28] количество обертонов возрастает при увеличении силы удара. Фирлинг[64, 72] установил, что тон, который возник вследствие сильного удара, вначале очень скоро затухает, в то время как тон, который возник вследствие слабого удара, вначале значительно слабее затухает. Затухание, главным образом, обусловлено потерями энергии в самом инструменте и только незначительная часть обусловлена излучением; это было установлено путем удаления сильно колеблющихся частей резонирующей деки. Эта зависимость от сил трения может быть объяснена, как полагает Фирлинг, тем, что при более сильном ударе значительно большая часть инструмента приводится в колебание, чем при более слабом. Однако это представление не было подтверждено исследованиями Грюцмахера и Леттермозера[85], которые измеряли колебательное движение отдельных частей инструмента. Названные ученые весьма подробно исследовали затухающие кривые фортепианных звуков с помощью самопишущего измерителя силы звука (Pegelschreiber). Они установили, так же как и Саваде[39], на основании процесса спадания колебаний значительно выраженные связанные колебания между струной и резонирующей декой. Вблизи области собственной частоты резонирующей деки наблюдаются сильные биения. Это напоминает вольфтон, наблюдаемый у смычковых инструментов. При некоторых обстоятельствах наблюдается чрезвычайно быстрое спадание амплитуды в начале процесса, вследствие чего звучащий тон представляется сухим и малокрасочным. Настройщик фортепиано устраняет этот недостаток тем, что он слегка расстраивает струны, отвечающие данному тону друг относительно друга. Фирлинг[95] получил подобный же результат на основании записи звука с помощью октавных фильтров. Затухание различных инструментов в общем возрастает от низких тонов к высоким.

Фирлинг[64] установил, что в звуках фортепиано более высокие компоненты затухают медленнее, чем низкие. Впоследствии[95] он этот вопрос подробно разъяснил с помощью опытов на моделях. С помощью электростатического возбуждения колебаний струны и записи колебаний при помощи октавных фильтров было установлено, что увеличенное затухание низких компонентов наблюдается только в том случае, если струна действует на резонирующую деку, которая особенно сильно отвечает именно на низкие частоты и вследствие этого заимствует много энергии от соответствующих компонент.

Ланге[61] с помощью наблюдения колебаний фортепианных струн, возбуждаемых специальным конденсатором, как в направлении движения молоточка, т. е. в вертикальном направлении, так и в пер-

пендикулярном, т. е. в горизонтальном направлении, установил, что движение в вертикальном направлении происходит в соответствии со звуком, в то время как горизонтальное движение получается совсем другого характера. Отсюда он заключил, что действием горизонтальной компоненты можно пренебрегать. Однако Фирлинг[95] в противоположность этому нашел, что если ограничиться только вертикальным движением струны или подставки (Steg), то при передаче не получается правильного фортепианного тона. Для того чтобы получить сильное спадание звука непосредственно после удара, чрезвычайно характерное для фортепианного тона, необходимо присоединить горизонтальное движение подставки. Он объясняет происхождение этого движения возникновением крутильных колебаний подставки, которые особенно при первых больших амплитудах передаются резонирующей деке. С этой точки зрения делается понятным, что правильная передача звука не может происходить в местах значительного искривления подставки, так как в этих местах подставка представляет значительное препятствие для крутильных колебаний. В противоположность этому фортепиано с прямой подставкой обладает очень равномерным тоном в пределах всего диапазона.

В заключение следует еще упомянуть об исследованиях Урбаха и Шлезингера[91], которые произвели исследование звука пианино и роялей, применяя механизм, регулирующий силу удара по струне. Ими было установлено, что продолжительность спадания звука вообще уменьшается с увеличением высоты тона.

В пианино продолжительность спадания при низких тонах значительно короче, при высоких — длиннее, чем у концертных роялей. Если представить силу тона и в зависимости от силы удара, то значительная крутизна подобных кривых является весьма характерной для различных конструкций инструментов. В области „пиано“ средняя крутизна больше всего у салонных роялей, в области же „фортиссимо“ наблюдается наибольшее значение крутизны у концертных роялей при низких и средних тонах.

19. Ударные инструменты

Анализы звука ударных инструментов были выполнены Мейером и Бухманом[28]. Эти звуки разлагаются, как следовало ожидать, в почти исключительно непрерывный спектр с более или менее ясно выраженными отдельными гармоническими областями. Исключение представляют звуки треугольника и колокола, которые дают отчетливые, хотя в большинстве случаев негармонические, обертоны. Конструкция некоторых индийских барабанов (как сообщает Раман) такова, что толщина мембраны увеличивается по направлению к краям с помощью соответствующих наслоек. Вследствие этого обертоны становятся почти гармоничными с основным тоном, и по-

лучается значительно большее благозвучие. Подобный же звуковой эффект достигается и у японского инструмента „тудуми", звуковые особенности которого были исследованы Обата и Озава[32]. Этот инструмент состоит из деревянного полого внутри корпуса, в средней своей части наиболее тонкого и утолщающегося колоколообразно по направлению к краям. На эти два открытые конца прикреплены натянутые на деревянные рамы мембраны, так что они значительно выступают по сравнению с корпусом. Натяжение мембран можно было изменять с помощью шнурка, соединяющего две деревянные рамы и могущего быть притянутым с помощью другого шнурка по направлению оси. Этот инструмент дает очень немногочисленные и почти гармонические обертоны, как в этом можно было убедиться на основании записи звука.

Наиболее интересную проблему в звучании колоколов представляет так называемый „ударный тон" (Schlagton). Результаты старых работ Рэлея[2], Биле[10], Джонса[23] приводят к заключению, что обертоны колокола практически являются негармоническими. Далее, было установлено на основании большого количества исследований, что звук колокола тем приятнее, чем ближе находятся его компоненты в отношении: 1 : 2 : 2, 4 : 3 : 4 (строй минорный) или в отношении 1 : 2 : 2, 5 : 3 : 4 (строй мажорный). Непосредственно вслед за ударом особенно выделяется 5-й обертон, а по прошествии нескольких секунд начинает преобладать 3-й обертон. При субъективном прослушивании звуку колокола приписывается частота, которая по Джонсу на октаву ниже, чем 5-й обертон, т. е. лежит в области, близкой ко 2-му обертону. Этот тон, так называемый „ударный тон", однако, не может быть объективно установлен при анализе звука и не может быть также усилен резонаторами.

Особенно важное значение для объяснения этого поразительного явления дают исследования Мейера и Клаэса[42]. Ими были произведены методом зондирующего тона анализы звука колокола, приводимого в звучание с помощью ударов, следующих друг за другом через правильные промежутки времени. У исследованного ими колокола второй обертон был равен 495 Hz, а ударный тон равнялся 530 Hz. Анализы подтвердили, что ударный тон не может быть установлен физическими методами. 5-й и 7-й обертоны соответственно были равны 1072 и 1605 Hz. На основании этого можно было думать, что ударный тон является не чем иным, как субъективным разностным тоном первого порядка между этими двумя обертонами. Чтобы проверить эту гипотезу, был применен в качестве приемного микрофона угольный микрофон, обладавший нелинейностью, подобной уху. При этом действительно удалось ударный тон получить объективно при анализе. При этом возникают также и другие комбинационные тоны; однако ударный тон, возможно вследствие своего совпадения с объективно имеющимися обертонами, особенно сильно выражен. С помощью этой методики можно было измерить соответствующими фильтрами время его за-

тухания. Определенное таким способом время затухания оказалось совпадающим с субъективно наблюдаемым. Для решения вопроса, не является ли „ударный тон“ унтероктавой 5-го обертона и, следовательно, является результатом субъективного восприятия, производилось прослушивание звука колокола, подаваемого с помощью тщательно сконструированного передающего устройства на громкоговоритель. При этом, с помощью фильтров сначала пропускались только первые два обертона. Ударный тон был сначала не слышен и продолжал оставаться неслышимым вплоть до добавления 5-го обертона включительно. Только при добавлении 7-го обертона возникло восприятие ударного тона. Эта теория, рассматривающая ударный тон как разностный тон, основывается (это подчеркивают сами авторы) на наблюдениях, выполненных только на одном колоколе. Джонс[97] возражает против этого заключения, так как колокол, исследованный Мейером и Клаэссом, имел унтероктаву 5-го обертона, очень близко совпадающую с разностным тоном между 5-м и 7-м обертонами. Исследовав колокола, у которых такое близкое совпадение не имело места, Джонс считает возможным заключить, что совпадение наблюдаемого ударного тона с унтероктавой 5-го обертона значительно лучшее, чем с разностным тоном. При этом он заключает, что возникновение этого разностного тона усиливает действие унтероктавы.

20. Электромузыкальные инструменты

Широкие возможности, которые дают катодные лампы для генераций колебаний и для их усиления, явились причиной многочисленных попыток строить электромузыкальные инструменты. Относящаяся к этому вопросу литература собрана Фирлингом[34, 35] и Яновским[41]. Здесь можно различать два принципиально различных метода. Наиболее последовательный метод состоит в том, чтобы целиком и воспринимать и создавать колебания электрическими способами; другой метод состоит в том, что колебания возбуждаются механическими способами, а электрические аппараты их воспринимают, усиливают и воспроизводят. Автор этой статьи[44] имел уже случай указывать на то обстоятельство, что при конструкции этих инструментов вопрос заключается не только в том, чтобы подражать музыкальному тембру известных инструментов или создавать новые музыкальные тембры. Подобный электромузыкальный инструмент может выдержать сравнение с хорошим механическим музыкальным инструментом только в том случае, если он будет способен давать возможность тонкой модуляции как по частоте, так и по амплитуде при звучании длительных звуков, а также будет обладать свойствами создавать такие же нарастающие и спадающие процессы, как и те, которые в звуках механических инструментов представляются столь красочными.

Из инструментов, генерирующих электрические колебания, наиболее широкое распространение получил так называемый трауто-

ниум, сконструированный по идее Траутвайна[27, 47]. В этом инструменте специальная лампа генерирует релаксационные колебания, частота которых изменяется в зависимости от сеточного напряжения, регулируемого с помощью соответствующей клавиатуры. Эти колебания возбуждают специальные контуры (формантные контуры), которые могут приключаться для изменения тембра. Механизм возбуждения промежуточных контуров получается аналогичным тому механизму, который имеет место как в голосе человека, так и у некоторых музыкальных инструментов. Ашов[93] указал, как можно легко изменять форму звучания и даже имитировать процессы, аналогичные процессам, происходящим в звуках инструментов с ударяемой струной, с помощью введения специальной лампы, сеточное напряжение которой изменяется во времени с помощью разряда конденсатора.

С помощью чисто электрического инструмента легче и проще всего имитировать орган и гармониум. Практически выполнимое решение было предложено Фирлингом[48]. В качестве генератора электрических колебаний служила лампа тлеющего разряда, приключенная к разрядному контуру и стабилизованная самоиндукцией (идея Кока[45]). С помощью изменения напряжения, подаваемого на лампу, можно было получить широкое изменение тембра. „Вибрато" могло быть осуществлено с помощью приключаемого устройства для модулирования напряжения с частотой модуляции в 8 Hz. Подобные инструменты дают возможность осуществить непрерывное изменение силы тона и в этом отношении превосходят обычные органы и гармониумы. Пока остается неясным, удастся ли с помощью достаточно простых способов получить при посредстве электрических органов ту своеобразную красоту, которой отличается звук старых органов, вследствие чрезвычайного разнообразия процессов, происходящих при нарастании колебаний.

Другой метод, при котором колебания возникают с помощью механических способов, был применен прежде всего Нернстом и Фирлингом, построившими 2 клавишных инструмента, имевших то преимущество, что они обходились без резонирующей деки. Фирлинг[72] пришел к заключению, что механические генераторы колебаний представляют большие возможности, чем электрические, и что с помощью механических методов значительно легче воспроизводить разнообразные процессы нарастания и спадания колебаний. Превращения механических колебаний в электрические может быть выполнено или электромагнитными или электростатическими приемниками. Для магнитного приема колебаний удар обычного фортепианного молоточка является неподходящим; вследствие слишком большой амплитуды и вследствие нелинейности воспринимающего устройства возникает недопустимый шум при ударе. Саваде[39] исследовал возможности производить удар струны с помощью „микромолоточка", приводимого в действие пневматически; при этом способе удара указанный шум уже не имел места. Фирлинг[72] указал на другую возможность устранить искажения, вносимые недопустимо

большим возрастанием первой амплитуды. Для этой цели он использовал то обстоятельство, что при ударе молоточком возникают также и колебания, перпендикулярные направлению удара и постепенно нарастающие. Если при этом воспринимающие звук адаптеры сместить несколько вбок (сдвиг находится в зависимости от высоты тона), то получается весьма удовлетворительный прием, при котором звук становится чрезвычайно напоминающим звук настоящего фортепиано. Фирлинг нашел в магнитных приемниках вследствие нелинейности недопустимые искажения и вследствие этого стал применять электроакустические приемники. При этом представляется возможным значительно видоизменять тембр путем надлежащего выбора места расположения приемника вдоль струны.

Затухание струн у фортепиано без резонирующих дек чрезвычайно мало. Для получения тонов, напоминающих фортепианные, очевидно, необходимо ввести добавочное затухание. Нернст[39] применил для этой цели затухание с запозданием, которое заключается в том, что первый удар происходит без затухания и только вслед за этим включается затухание. Для возбуждения длительных тонов применяют очень маленькие амплитуды. Затухание, зависящее от амплитуды, при этом очень не велико. Этот метод дает возможность получать звуки, напоминающие звуки деревянных духовых инструментов. Для изменения характера процессов нарастания колебаний Фирлинг пользовался двумя струнами, которые одновременно путем удара приводились в колебание. При этом одна из струн была не демпфирована, а другая, наоборот, сильно задемпфирована. В электрической схеме приема два звукоснимателя включаются последовательно и так, что обе струны дают равные и противоположные потенциалы, которые компенсируют друг друга. Благодаря этому первые импульсы уничтожают друг друга, и возникает процесс колебаний, который в дальнейшем более или менее медленно затухает в зависимости от величины затухания отдельных струн.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Mach, Lotos, S. 23, 1873.
2. Lord Rayleigh, Phil. Mag. (5), **29**, 1. 1890; Sci. Pap., **3**, 318, 1902.
3. O. Heaviside, Electromagnetic Theory, London 1899.
4. Waetzmann, Resonanztheorie des Hörens, Braunschweig 1912.
5. G. Leimbach, Ann. Physik (4), **39**, 251, 1912.
6. H. v. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen, 6 Ausg. Braunschweig 1913.
7. K. W. Wagner, Arch. Elektrotechn., **4**, 160, 1916.
8. C. V. Raman, Phil. Mag. (6), **32**, 391, 1916.
9. T. J. I. A. Bromwich, Proc. Lond. math. Soc. (2), **15**, 401, 1916; Phil. Mag. (6), 37, 407, 1919; Proc. Camb. phil. Soc., **20**, 411, 1921; Proc. Lond. math. Soc. (2), **28**, 438, 1928; **31**, 209, 1930.
10. J. Biehle, Physik. Z., **20**, 429, 1919.
11. J. R. Carson, J. Am. Inst. electr. Engr., **38**, 345, 1919; см. также J. R. Carson, Elektrische Ausgleichsvorgänge und Operatorenrechnung, Berlin 1929.
12. H. Vogel u. M. Wien, Ann. Physik (4), **62**, 649, 1920.

13. C. V. Raman, Nature, **104**, 500, 1920.
14. E. Lübcke, Z. techn. Physik, **2**, 52, 1921.
15. W. Rogowski, Arch. Elektrotechn., **10**, 1, 1922.
16. K. Küpfmüller, Elektr. Nachr. Techn., **1**, 141, 1924; **5**, 19, 1928.
17. F. Trendelenburg, Wiss. Veröff. Siemens-Konz., **3**, H. 2, 43, 1924.
18. F. Trendelenburg, Wiss. Veröff. Siemens-Konz, 4, H. 1, 1, 1925.
19. H. Backhaus, Wiss. Veröff. Siemens-Konz., 4, H. 2, 209, 1925.
20. C. Stumpf, Die Sprachlaute, Berlin 1926.
21. M. Grützmacher, Elektr. Nachr.-Techn., **4**, 533, 1927.
22. G. v. Békésy, Physik. Z., **29**, 793, 1928.
23. H. T. Jones, Phys. Rev. (2), **31**, 1092, 1928; J. acoust. Soc. Am., **1**, 382, 1930; A. T. Lones a. G. W. Alderman, J. acoust. Soc. Am., **3**, 207, 1931; **4**, 331, 1933.
24. H. Schmidt, Z. Physik, **59**, 117, 1929; **60**, 269, 702, 1930.
25. G. v. Békésy, Physik. Z, **30**, 115, 1929.
26. M. Grüzmacher, Z. techn. Physik, **10**, 570, 1929.
27. F. Trautwein, Elektrische Musik, Veröff. der Rundfunkversuchsstelle bei der Staatlichen Akademischen Hochschule der Musik, Bd. 1, Berlin 1930.
28. E. Meyer u. G. Buchmann, Berl. Ber., 1931, 735.
29. G. v. Békésy, Ann. Physik (5), **8**, 851, 1931.
30. H. Neumann, Z. techn. Physik, **12**, 627, 1931.
31. G. W. Stewart, J. acoust. Soc. Am., **2**, 325, 1931.
32. J. Obata a. Y. Ozawa, Proc. physic.-mat. Soc. Jap. (3), **13**, 93, 1931.
33. H. Backhaus, Z. techn. Physik, **13**, 31, 1932.
34. O. Vierling, Z. VDI, **76**, 625, 741, 1932.
35. O. Vierling, Elektrotechn. Z, 53, 155, 1932.
36. G. v. Békésy, Ann. Physik (5), **16**, 844, 1933.
37. G. u. Békésy, Physik. Z., **34**, 577, 1933.
38. V. Steudel, Hochfr.-Techn. u. Elektroakust., **41**, 116, 1933.
39. S. Sawade, Z. techn. Physik, **1**[1], 353, 1933.
40. W. Prager, Ing.-Arch, **4**, 16, 1933.
41. W. Janovsky, Elektrotechn. Z., **54**, 674, 727, 1933.
42. E. Meyer u. J. Klaes, Naturwiss., **21**, 697, 1933.
43. J. R. Hausmann, Diss. Aacher, 1933.
44. H. Backhaus, Musikinstrumente, Handb. d. Exper. Physik Bd., 17, 111, S. 177, 1934.
45. W. Kock, Z. techn. Physik, **15**, 577, 1934.
46. E. Meyer u. E. Thienhaus, Z. techn. Physik. **15**, 630, 1934.
47. P. Kotowski u. W. Germann, Elektr. Nachr.-Techn., **11**, 389, 1934.
48. O. Vierling, Z. VDI, **78**, 1217, 1934.
49. F. v. Schmoller, Telefunken-Ztg., **15**, 47, No 67, 1934.
50. St. Barta, Diss. Karlsruhe 1934.
51. A. Gemelli e G. Pastori, L'Analisi Elektroacust. Del Linguaggio, Mailand 1934.
52. N. W. McLachlan, Loud Speakers, p 204 F, Oxford 1934; N. W. McLachlan a. A. T. McKay, Proc. Camb. phil. Soc., **32**, 265, 1935; Elektr. Nachr., Techn., **13**, 251, 1936.
53. J. C. Steinberg, J. acoust. Soc. Am, 6, 16, 1934.
54. W. T. Batholomew, J. acoust. Soc. Am., **6**, 25, 1934.
55. H. C. Hart, M. W. Fuller a. W. S. Lusby, J. acoust. Soc. Am., **6**, 80, 1934.
56. J. Obata, M. Hirose a. T. Tesima, Proc. imp. Acad. Tokyo, **10**, 326, 1934.
57. J. Obata a. T. Tesima, Proc. imp. Acad. Tokyo, **10**, 322, 636, 1934.
58. F. Trendelenburg, Klänge und Geräusche, Berlin 1935.
59. W. Trendelenburg u. H. Wullstein, Berl. Ber. 399, 1935.
60. W. Trendelenburg, Berl. Ber., 525, 1935.
61. W. Lange, Hochfr.-Techn. u. Elektroakust., **45**, 120, 159, 1935.
62. G. Schaffstein, Hochfr.-Techn. u. Elektroakust., **45**, 294, 1935.

63. F. Trendelenburg u. E. Franz, Z. techn. Physik, **16**, 513, 1935.
64. O. Vierling, Z. techn. Physik, **16**, 528, 1935.
65. E. Freystedt, Z. techn. Physik, **16**, 533, 1935.
66. G. v. Békésy, Elektr. Nachr.-Techn., **12**, 71, 1935.
67. W. Bürck, P. Kotowski u. H. Lichte, Elektr. Nachr.-Techn., **12**, 278, 1935.
68. W. Bürck, P. Kotowski u. H. Lichte, Elektr. Nachr.-Techn., **12**, 326, 1935.
69. W. Bürck, P. Kotowski u. H. Lichte, Elektr. Nachr.-Techn., **12**, 355, 1935.
70. K. Ketterer, Naturwiss., **23**, 685, 1935.
71. G. Thilo u. U. Steudel, Wiss. Veröff. Siemens-Konz., **14**, H. 1, 79, 1935.
72. O. Vierling, Diss. Univ., Barlin 1935.
73. S. K. Wolf a. W. J. Sette, J. acoust. Soc. Am., **6**, 164, 1935.
74. R. N. Ghosh, J. acoust. Soc. Am., **7**, 27, 1935.
75. J. R. Tolmie, J. Acoust. Soc. Am., **7**, 29, 1935.
76. E. W. Schripture, Nature, **136**, 223, 1935.
77. W. Trendelenburg, Berl. Ber., 308, 1936.
78. W. Trendelenburg, Berl. Ber., 338, 1936.
79. W. Bürck, P. Kotowski u. H. Lichte, Ann. Physik (5), **25**, 433, 1936.
80. W. Bürck, P. Kotowski u. H. Lichte, Hochfr.-Techn., u. Elektroakust., **47**, 33, 1936.
81. H. Backhaus, Z. techn. Physik, **17**, 573, 1936.
82. F. Trendelenburg, Z. techn. Physik, **17**, 578, 1936.
83. W. Bürck, P. Kotowksi u. H. Lichte, Elektr.-Techn., **13**, **1**, 1936.
84. H. Thiede, Elektr. Nachr.-Techn., **13**, 84, 1936.
85. M. Grützmacher u. W. Lottermoser, Akust. Z., **1**, 49, 1936.
86. F. Trendelenburg, E. Thienhaus u. E. Franz, Akust. Z., **1**, 59 1936.
87. V. Aschoff, Akust. Z., **1**, 77, 1936.
88. F. Trendelenburg u. E. Franz, Wiss. Veröff. Siemens-Konz., **15**, H. 2, 78, 1936.
89. H. D. Boumann, Z. Biol., 97, 44, 1936.
90. W. Vollmer, Diss., Karlsruhe 1936.
91. F. Urbach u. H. Schlesinger, Wiener Anz., No 21, **208**, 1936.
92. W. Kock, J. acoust. Soc. Am., **7**, 56, 1935; **8**, 23, 1936.
93. V. Ashoff, Hochfr.-Techn. u. Elektroakust., **49**, 138, 1937.
94. H. Backhaus, Z. techn. Physik, **18**, 98, 1937.
95. O. Vierling, Z techn. Physik, **18**, 103, 1937.
96. O. Vierling u. F. Sennheiser, Akust. Z., **2**, 94, 1937.
97. A. T. Jones, J. acoust. Soc. Am., **8**, 199, 1937.