

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МУЗЫКАЛЬНЫХ ЗВУКОВ КАК ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ ВОСПРИЯТИЙ

А. А. ВОЛОДИН

(Москва)

Лабораторные исследования восприятия, как правило, основываются на моделировании того или иного характерного стимула, предположительно способного вызвать адекватное субъективное отражение. Для исследования закономерностей восприятия музыкальных звуков такой анализ через синтез, ввиду тонкости и сложности структуры этих звуков, представляется в настоящее время практически единственным эффективным методом, поскольку при оценке результатов восприятия той или иной объективной звуковой структуры необходимо ясное представление содержания этой структуры. В случае использования в качестве стимулов звуков обычных музыкальных инструментов возникают значительные трудности как в отношении достоверного (необходимого и достаточного по содержанию) объективного анализа таких звуков, с учетом различных частных условий их возбуждения, так и в отношении интерпретации результатов анализа по признакам, которые могут быть существенны или несущественны для тех или иных сторон восприятия, а также по наличию или отсутствию существенных связей некоторых признаков. При целенаправленном синтезе музыкальных звуков все элементы структуры звука находятся под контролем исследователя и, при надлежащей постановке опыта, могут варьироваться таким образом, чтобы способствовать выявлению тех или иных сторон восприятия, его закономерностей и характеристик.

Как известно, первые, блестящие для своего времени, как по замыслу, так и по технике, опыты синтеза музыкальных звуков, позволившие установить важнейшие закономерности их восприятия, были поставлены Г. Гельмгольцем еще в 1865 году. Средства современной электроники позволили намного расширить лабораторную базу подобных опытов, что незамедлило сказаться на результатах. Уже в опытах Гельмгольца ясно обнаружилось, что синтез музыкальных звуков и исследование на его основе звуковых восприятий с неизбежностью выходит за рамки психологии музыкальных способностей и, в частности, затрагивает смежные проблемы, относящиеся к восприятию речи. На современной базе такое расширение опыта становится еще более ощутимым. Можно с уверенностью сказать, что электронный синтез звуков создал почти неограниченные возможности для изучения закономерностей и характеристик восприятия любых звуковых объектов, что может иметь существенное значение как для познания целостных (общих) свойств звукового анализатора, так например, и для решения целого ряда вопросов в области слуховых восприятий.

Исследование восприятия музыкальных звуков имеет, пожалуй, два важнейших аспекта. Первый — направлен на вскрытие признаков структуры звуков и элементов их восприятия, функционально важных для постро-

ения музыкальной ткани, т. е. на раскрытие конструктивно-музыкальных элементов звучания. Второй аспект представляет исследование восприятия звуков как прямых носителей образов музыкального значения, способных вызывать определенные настроения и эстетические переживания во время музыкального восприятия.

Анализ музыкально-звуковых восприятий следует проводить в три основных этапа, которые по некоторой (правда, весьма поверхностной) аналогии с разделами классической механики можно назвать статикой, кинематикой и динамикой музыкальных звуков.

Наиболее разработанные к настоящему времени вопросы восприятия статических состояний звука составляют обоснование явлений консонанса и диссонанса, а также, частично, ладо-гармонической структуры. Статическая трактовка интонации не раскрывает, правда, ее выразительных функций, а также зонной природы строя в части художественных норм и принципов интонации, но она необходима как исходная интерпретация строя и гармонии.

Анализ кинематического восприятия, т. е. высотного движения звука, безотносительно к его динамическим вариациям, позволяет дифференцировать интонационные и тембровые функции гармонического спектра и формант, т. е. позволяет внести в понимание процесса восприятия звука новый элемент — слуховое расчленение структурных признаков звука в его высотном движении.

Анализ динамического восприятия звуков, в широком значении этого понятия, позволяет разложить во времени все сложные процессы «внутренней жизни» звука, т. е. определить его музыкально-выразительные функции<sup>1</sup>. Реальные музыкальные звуки тем и отличаются от статических, взятых изолированно звуков, что они входят в «живую» музыкальную ткань, в отражение музыкальной идеи, темы, сюжета, что они вызывают эстетическое переживание, образы и представления. Поэтому исследование законов восприятия музыкальных звуков может быть по настоящему ценным и успешным только тогда, когда оно осуществляется в условиях соответствующего применения таких звуков. Важным дополнением исследования музыкально-звуковых восприятий является анализ их взаимодействия в музыкальной ткани в связи с различным высотным положением, тембром и штриховыми признаками.

На первом этапе анализа (восприятие статических звуков) необходимым и в значительной мере достаточным является синтез звукового объекта из элементарных (синусоидальных) компонентов, в связи с чем может быть применен набор электрических генераторов тональных частот с воспроизведением их через телефон. Для синтеза музыкальных звуков в их типичном движении син-

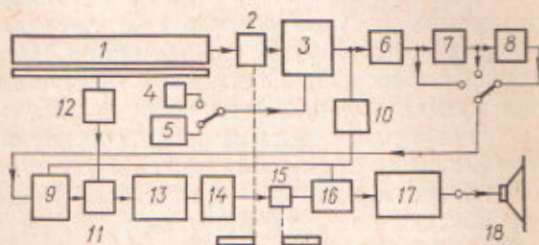


Рис. 1. Функциональная схема инструмента «Эк-водина».

1 — клавиатура с подклавишным механизмом, 2 — регулятор глissандо (с педальным приводом), 3 — задающий генератор, 4 — преобразователь клавишной (пальцевой) вибрации, 5 — генератор автоматического вибрато, 6, 7, 8 — октавные делители частоты, 9 — преобразователь состава спектра, 10 — коррелятор тембра по высоте звука, 11 — амплитудный модулятор, 12 — подклавишный манипулятор и схема формирования амплитудной огибающей звука, 13 — формантный фильтр, 14 — фильтр среза боковых частот, 15 — регулятор громкости (с педальным приводом), 16 — коррелирующий фильтр, 17 — усилитель, 18 — акустическая воспроизводящая система

<sup>1</sup> К этому разделу примыкает анализ шумов, а также анализ звуков с негармоническими обертонами, единство которых по восприятию обуславливается связью во времени.

тезатор неизбежно превращается в своеобразный музыкальный инструмент, в котором, помимо необходимых исполнительских средств управления звуком, обеспечивается заданная структура звука и ее необходимое изменение в связи с теми или иными параметрами (например, высотой и громкостью) звука, а также в связи с требованиями выразительного исполнения музыки. Следуя по этому пути и применяя метод последовательных приближений, автор построил ряд моделей электронного музыкального инструмента «Экводин» (1932—1967 г. г.), который, помимо прикладного, чисто музыкального значения, позволил при работе с ним уточнить ряд аспектов восприятия музыкальных звуков. На рис. 1 показана функциональная схема инструмента (модель «В-11»). Назначение функциональных элементов этой схемы приведено в подрисуночной спецификации. Инструмент позволяет синтезировать следующие важнейшие элементы музыкально-звуковой структуры, вызывающие адекватные элементы восприятия:

1) ступенчатое изменение высоты звука с помощью клавиатуры в диапазоне 3-х октав с большой терцией, а с учетом возможности переноса диапазона по октавам, в целом — в диапазоне 7-ми октав с большой терцией (от «до» контроктавы до «ми» 5-й октавы);

2) плавный переход от звука к звуку по высоте в пределах диапазона клавиатуры с помощью педали, регулирующей время плавного перехода в пределах от 10 мсек до 1 сек;

3) возможность вибрации звука (по частоте) при соответствующем вибрационном движении пальцев на клавиатуре, а также использование автоматического вибрато от источника подтонального сигнала регулируемой амплитуды и частоты (в пределах от 3 до 9 гц);

4) выбор спектральных структур колебаний в пределах 7-ми вариантов (монотонно спадающий амплитудный ряд, нечетный ряд, ряд, соответствующий спектру струны, возбуждаемой смычком, ряды с преобладанием четных компонентов);

5) выбор формантной характеристики в пределах 12-ти вариантов, в составе до 6-ти формантных частот;

6) выбор общей полосы воспроизведения звука в пределах 7-и вариантов частот среза и крутизны среза;

7) возможность автоматической корреляции состава спектра и полосы воспроизведения с изменением высоты звука по принципу, приближающемуся к аналогичному принципу корреляции тех же характеристик у смычковых и некоторых других инструментов;

8) возможность формирования амплитудной огибающей звука в части: вариации фронта его возникновения, длительности и порога затухания после возникновения (в пределе — получение незатухающих звуков) и длительности конечного затухания (демпфирования);

9) возможность вариации уровня громкости с помощью педали с автоматическим расширением полосы воспроизводимых частот по мере увеличения громкости;

10) возможность нюансировки полосы частот, воспроизводимых в процессе исполнения музыки.

Использование перечисленных средств находится в конкретной связи с воспроизводимым звуковым образом, традиционными или специфическими приемами отображения содержания музыкального произведения, выражаемого данным звуковым образом, и других условий звукового контекста.

С помощью инструмента «Экводин» получен целый ряд имитаций звучания классических музыкальных инструментов, достоверность которых по восприятию подтверждается многочисленными экспертизами. Кроме того, получен ряд новых тембров, прослушивание которых позволяет сделать вывод, что музыкальность звуков при сложившихся критериях восприятия сохраняется, если в основе структуры новых звучаний заложены функционально значимые

элементы, с параметрами, соответствующими известным звукам, на которых сформировался слуховой анализатор человека (как в филогенетическом, так и в онтогенетическом плане). Объективно (по форме осциллограмм и составу спектра) синтезированные звуки в значительной степени показывают приближения к соответствующим звукам классических аналогов. Ниже, в таблице 1 приводится, для примера, один из протоколов экспертизы звучаний на схожесть со звучанием соответствующих оригиналов (по памяти).

Таблица 1  
ПРОТОКОЛ ОЦЕНОК СХОЖЕСТИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ЗВУЧАНИЙ (ИНСТРУМЕНТ «ЭКВОДИН») СО ЗВУЧАНИЕМ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ОРИГИНАЛОВ

Пример звучания	Оценка эксперта №								Средний балл
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Виолончель	5	4	3	4+	4	4	4	4	4,1
Скрипка	—	2	2	4	—	4	3	3	3,0
Кларнет	4	3	4	4	5	4+	5	4	3,9
Гобой	5	4	3	5	5	5	5	5—	4,8
Фагот	4+	3; 4	3	5	5	—	5	4+	4,2
Контрафагот	—	3	—	5	5	—	5	4	4,4
Флейта пикколо	5	3	2	—	5	—	5	5	4,2
Труба	5	4	2	5	5	5—	4+	4+	4,3
Труба с сурдиной	5	3	2	4—	5	4—	5	4+	3,7
Гавайская гитара	5	3	2	5—	5	3	3	4	3,7
Зурна	5	(3)	—	5	5	5	—	4	4,5
Дудук	—	—	—	—	—	—	—	4	4,0
Балайка	5	2	—	4	3	3	3	4—	3,4
Ударно-затухающие звуки	—	—	2	—	—	—	3	5	3,3
Двухоктавное соединение	—	—	—	—	—	—	—	5	5,0
Общий средний балл									4,03

Вариация оценок в приведенном протоколе довольно характерно связана с несколько различным подходом экспертов к прослушанному материалу, в связи с их профессиональными навыками и склонностями. Так, эксперт № 2 (музыкант-теоретик) в комментариях к экспертизе дает более точные оценки ряда звучаний по регистрам («фагот: 3 — средний регистр, 4 — низкий регистр; труба с сурдиной: 4 — первая фраза, 3 и 2 — остальное...»). Эксперт № 3 (музыкальный акустик с высокими навыками в части звукозаписи) отмечает, что «на всех примерах имеется недопустимый клирфактор, что в большой степени определяет слуховое восприятие». Такое определение, очевидно, весьма субъективно, поскольку оценка клирфактора записи (или ее воспроизведения) в отношении синтетических звучаний едва ли возможна<sup>1</sup>. Эксперт № 5 (психолог), помимо приведенной в таблице оценки схожести, дает для некоторых звучаний оценку по общему музыкальному впечатлению, как правило — более высокую.

Большинство экспертов оказалось в затруднении при оценках звучаний, мало им известных (дудук), или не являющихся прямой имитацией известного инструмента (ударно-затухающие звуки, двухоктавное соединение).

Необходимо отметить, что при достигнутом уровне техники синтеза еще далеко не во всех случаях синтезированные структуры могут быть признаны

<sup>1</sup> Синтезированные звучания предъявлялись экспертам в записи на магнитную пленку и представляли собой небольшие фрагменты известных музыкальных произведений, в основном — для соответствующих классических инструментов — аналогов, исполнявшихся на «Экводине» с аккомпанементом фортепиано.

полностью адекватными классическим аналогам, т. е. опыт иллюстрации синтеза в данном случае еще не имеет исчерпывающего значения.

Приведенная на рис. 1 схема синтеза музыкальных звуков находится в известном противоречии со схемой, основанной на наиболее распространенной до настоящего времени методической концепции гармонического синтеза. Синтез музыкального звука определяется обычно как задача противоположная анализу звука. Поскольку объективный анализ звука (имеющий, обычно, чисто физическое содержание) состоит в разложении сложного звукового колебания на элементарные тоны, то, следовательно, для синтеза звука представляется естественным получение сложных структур путем соединения элементарных тонов. Выше автор отвел некоторое место такой технологии синтеза в разделе целесообразных средств построения статических звуковых структур, однако необходимо указать на то, что эта технология или методика синтеза, рассматриваемая в качестве основной, неизменно заводит в тупик все попытки создать синтетическим путем яркие и живые звуковые образы, пригодные для психологического анализа и применения в музыкальных целях.

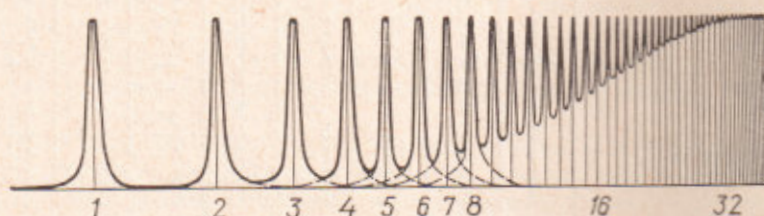


Рис. 2. Уменьшение локализации тоновых ощущений по мере уплотнения гармоник.

Можно не оспаривать положение, что задача синтеза звуков является в целом обратной задаче анализа, но тогда анализ музыкальных звуков должен не ограничиваться, как это пока часто бывает, выявлением спектральной структуры статических звуков, а охватывать звуки во всех формах их движения и внутренней жизни, т. е. в тех формах, которые собственно и представляют интерес с позиций музыкального восприятия и психологического опыта. Это кардинальный вопрос методики синтеза и его необходимо четко уяснить.

Предположим, что мы располагаем техническими средствами образования сложных звуков из необходимого числа свободно контролируемых по интенсивности синусоидальных компонентов. Составление сложного звука из отдельных гармоник с технической стороны делает все компоненты синтеза равнозначными, в то время как их индивидуальное значение в комплексе быстро падает с увеличением порядкового номера, ввиду уменьшения их смежного интервального коэффициента и реальной дифференцировки на рецепторе слухового анализатора. Находясь на позициях любой теории частотной избирательности слухового анализатора невозможно признать, что под действием одного простого тона возбуждение возникает только в одном нервном окончании. Очевидно, что избирательность слухового рецептора не безгранична и, следовательно, в корковой проекции звукового анализатора слева и справа от максимума возбуждения, вызываемого действием каждого тона, будут иметь место более или менее пологие участки спадающей интенсивности возбуждения, напоминающие скаты резонансной частотной характеристики. Ясно, что по мере уменьшения относительного интервала тонов и, тем более, по мере повышения разностного порога ощущения по частоте, все более и более будет возрастать роль ощущений в зонах перекрестного раздражения (интерференции тонов).

На рис. 2 представлено вероятное распределение интенсивности раздражения вдоль частотной оси рецептора с учетом ее ограниченной селективности. В качестве раздражителя принят гармонический спектр звука, охватывающий значительный диапазон частотных ощущений.

На эюре рис. 2 легко установить, что по мере повышения частоты степень дифференцированности ощущения становится все меньше и в конце концов возникает непрерывное ощущение. Из этого обстоятельства, однако, даже в музыкальном аспекте, совершенно не следует, что гармоники высоких номеров могут быть исключены, так как в действительности, оставаясь неразличимыми в своем индивидуальном качестве, они выступают в реальных звуковых структурах как носители тембровых (формантных и светлотных) признаков, примерно соответствующие, в силу непрерывности, шумовому спектру. Этот последний, кстати сказать, в полном составе своих признаков, не может быть синтезирован из тоновых (устойчивых по интенсивности) компонентов.

Некоторые звуковые объекты таковы, что их спектральные компоненты составляют только определенную тембровую среду, не воспринимаемую слухом в своей внутренней структуре, а проявляющуюся только как носитель звукового образа, который в своем воспринимаемом содержании со структурой этой среды не связан. Рассмотрим, например, тикание часов. Спектр этого звукового процесса (вернее, его огибающая) приведен на рис. 3. Период баланса часов составляет 0,4 сек и, поскольку он вполне регулярен, мы вправе считать тембровым спектром таких часов ряд гармонических компонентов, отстоящих друг от друга по частоте на 2,5 гц. Очевидно, что по крайней мере первые пятьдесят гармоник этого ряда дают для слухового отражения, как ввиду ничтожной чувствительности слухового анализатора в этой области частот, так и ввиду малой относительной интенсивности объективных компонентов. Последующие гармоники имеют при этом такую высокую плотность расположения, что их отдельное ощущение совершенно невозможно. Слухом воспринимается только суммарное действие компонентов в его характерном распределении энергии по частотной оси. Очевидно, что в описанном случае гармонический синтез не только не соответствует содержанию звукового явления, но и чрезвычайно сложен в техническом отношении.

Возвращаясь к звукам прямого музыкального значения, можно отметить, что и здесь не представляется возможным ограничиться малым числом гармонических компонентов синтеза. Не существует общего критерия достаточности числа гармоник в низком и высоком звуковом регистре. Синтез по отдельным гармоникам часто приводит к неверному предположению, что достаточное и характерное соединение гармоник в каком-либо одном регистре сохраняет свою достаточность и воспринимаемую характерность в другом регистре. Вместе с тем, совершенно очевидно хотя бы то, что в области очень высоких музыкальных звуков (например, звуков с основной частотой 4 кгц) 4-я или 5-я гармоники являются уже безусловно избыточными (находящимися за пределом ощущений), в то время как для звуков низких (например — 100 гц) 30-я или 50-я гармоника будут находиться в зоне высокой слуховой чувствительности.

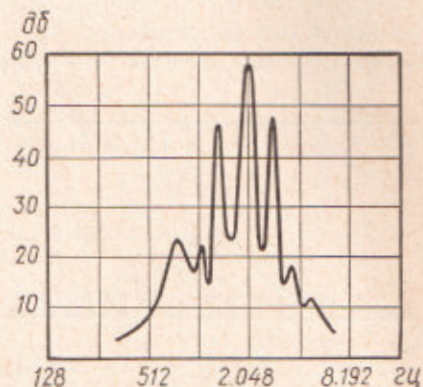


Рис. 3. Спектр тикания карманных часов (по Флетчеру).

Таким образом, даже в тех случаях, когда гармонический синтез возможен, результаты его требуют вдумчивого применения. Высказанные соображения, по-видимому, хорошо согласуются с данными смежного направления — синтеза речевых звуков, особенно, если рассматривать синтез не изолированных гласных звуков, а динамически развернутый речевой фонетический материал.

Возвращаясь к схеме синтеза по рис. 1, автор выражает уверенность, что такая схема, если не в отдельных деталях, то по принципу формирования

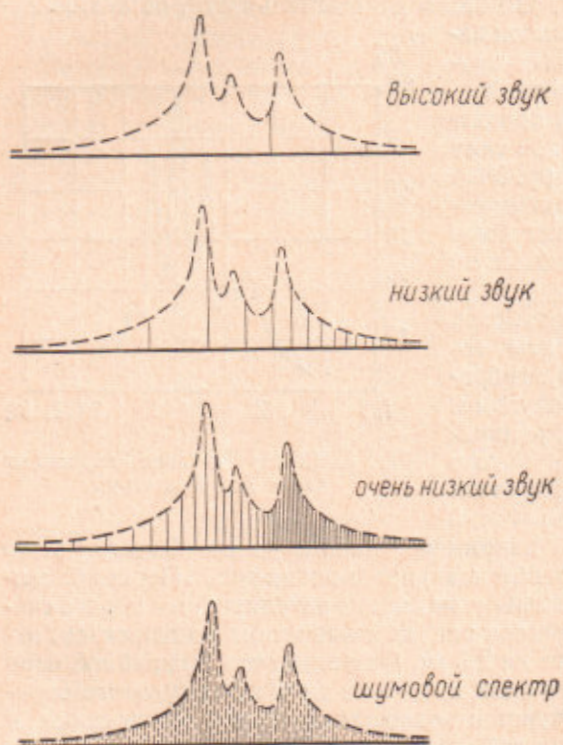


Рис. 4. Проекция гармонических спектров звуков различной высоты и шумового спектра на формантную характеристику.

звуковых объектов из функционально определенных и существенных по восприятию элементов их структуры, является наиболее содержательной и результативной.

В рамках настоящей статьи не представляется возможным охватить все те наблюдения и выводы по восприятию музыкальных звуков, которые были сделаны при работе описанной схемой синтеза. Следует, однако, отметить, что в ряде случаев исследование отдельных конкретных аспектов восприятия требует специальных построений схемы синтеза и методики опыта. В качестве иллюстрации такого особого случая ниже приводится описание исследования, относящегося к двухкомпонентному восприятию высоты музыкальных звуков.

Как известно, в шумах и некоторых звуках речи высота воспринимается нерасчлененно, как некоторый параметр, определяемый «эпизентром тяжести» частотного распределения в спектре и обусловленный сосредоточением энергии в тех или иных частотных максимумах — формантах. При импульсном возбуждении звуков натуральные частоты формант в сущности определяют высоту таких звуков. Другое дело — звуки музыкальные. Здесь существует вынужденный ритм возбуждения формант на частоте звука, точнее — возникает формантное отображение (формантная проекция) гармонического спектра, компоненты которого могут тождественно не совпадать с частотами формант, а лишь более или менее им близко соответствовать. Это положение иллюстрируется рис. 4, где приведено несколько частотных значений проекции звука с гармоническими обертонами (частных значений высоты звука) на одну и ту же формантную характеристику (частотную характеристику инструмента — звукоизлучателя) и, для сравнения, проекции на ту же характеристику шумового спектра. Видно, что на гармоническом спектре (в частности, и в вокальных интонированных звуках) форманты прослушиваются постольку, поскольку они «прорисовываются» (свируются или скандируются) гармониками звука в его высотном движении. При этом в известной мере их собственные

частоты в качестве формантной высоты дифференцируются от восприятия основной (собственной) высоты звука и притом тем более четко, чем контрастнее выражены зоны формантного сосредоточения энергии спектра.

Имеется, однако, особый механизм формантного восприятия, относящийся к некоторым музыкальным инструментам, характеризующийся тем, что несколько формант образуют своими частотами когерентно коррелированную систему, в частности, систему гармонически кратных частот (что, в частности, может быть обусловлено наличием в системе источника музыкального звука резонатора с рассеянной массой и упругостью, способного к проявлению волнового резонанса). В этом случае слуховой анализатор объединяет формантные частоты в систему по принципу «формантной высоты» так же, как он объединяет гармонические частоты возбуждающего спектра в высоту звука. Эта вторая, формантная высота не противоречит основной высоте звука, так как она образуется на гармониках основного звука, и только представляет другую форму ассимиляции, высотной надстройки, или «высоты в высоте» («звука в звуке»). При этом чрезвычайно обостряется формантное восприятие без разрушения основного высотного восприятия звука, поскольку мелодическое движение приковывает сознание к ассоциации высотного содержания с основной высотой звука<sup>1</sup>. На рис. 5 приведена функциональная схема и характеристика электронного синтезатора, позволяющего наиболее четким образом продемонстрировать расчлененность восприятия основного и формантного компонентов высоты<sup>2</sup>.

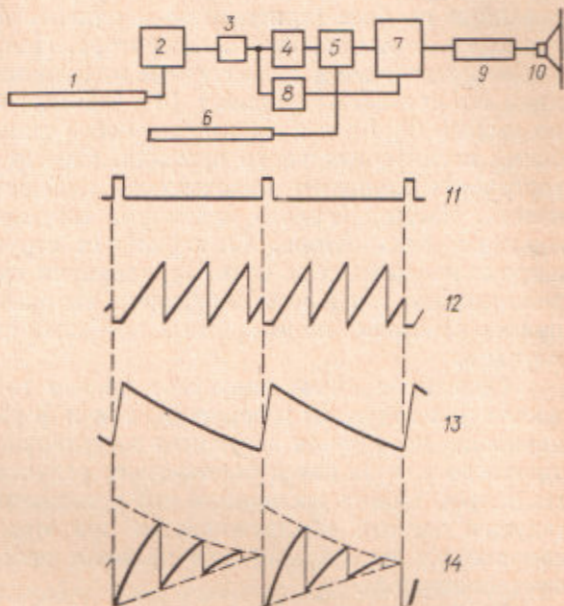


Рис. 5. Функциональная схема и колебательные характеристики формантного релаксатора.

Здесь, 1 — клавиатура или гриф, воздействующий на частоту ведущего генератора (2); 3 — каскад формирования синхроимпульсов; 4 — синхронизатор, воздействующий на релаксационный генератор 5, действующий на частоте форманты (формантный релаксатор); 6 — клавиатура или гриф, управляющий частотой формантного релаксатора (5); 7 — модулятор, представляющий собой каскад с двойным управлением: напряжением формантного релаксатора (5) и напряжением, подаваемым на модулятор (7) через блок 8 — преобразования синхроимпульсов в колебания экспоненциальной формы с частотой ведущего генератора (2); 9 — усилитель; 10 — акустическая воспроизводящая система.

Действие схемы иллюстрируется приведенными на том же рисунке осциллограммами. Кривая 11 представляет импульсы синхронизатора,

<sup>1</sup> Относительность движения основной и формантной высоты постоянно проявляется в восприятии вокальной музыки, при исполнении на амбушюрных инструментах с применением «квакающих» сурдин, а также при игре на так называемом «варгане» (друмба, кумыз, чанг<sup>2</sup> и т. п.).

<sup>2</sup> Авторское свидетельство № 113 886.



возникающие под действием напряжения основного ведущего генератора и, в свою очередь, воздействующие на формантный релаксатор. Натуральная (собственная) частота релаксатора (5), характеризующаяся внутрипериодным делением кривой 12, определяет формантную частоту с ее гармоническими подкреплениями (поскольку колебания формантного релаксатора имеют сложную, пилообразную форму). Нормально, частота формантного релаксатора должна быть выше частоты ведущего генератора, однако, практически возможны случаи, когда она оказывается относительно ниже и тогда формантный эффект в сущности отсутствует.

Существенным условием нормального действия схемы является совершенный эффект синхронизации начальной фазы колебательного процесса формантного релаксатора в начале каждого периода ведущего генератора. Кривая 12 изображает колебания формантного релаксатора, синхронизированные по фазе (приводимые к нулевой фазе) импульсами 11 в каждом периоде частоты основного генератора. Полученное от релаксатора напряжение подвергается амплитудной модуляции от источника (8), с напряжением по кривой 13. Кривая 14 изображает результирующее напряжение на выходе (9, 10) и представляет собой типичные пачки затухающих колебаний несинусоидального профиля. Спектр полученных колебаний характеризуется наличием максимумов, находящихся в гармоническом отношении. Частота первого максимума соответствует частоте колебаний формантного релаксатора. Спектральная структура, вообще говоря, может широко изменяться за счет варьирования волновых форм как формантного релаксатора, так и модулирующего напряжения от блока 8. Приведенный пример сочетания пилообразных профилей является только одним частным случаем.

Описанная схема допускает вполне гибкую и широкую перестройку частот как ведущего генератора, так и формантного релаксатора, а также вариацию показателя затухания модулирующего напряжения (13). Эффективное затухание пачек формантного релаксатора может быть сделано весьма малым, вплоть до полного его исключения, так что период повторения ведущей частоты обнаруживается при этом только в форме скачка фазы напряжения релаксации при наличии небольшой площадки от действия синхроимпульса.

В режиме нулевого затухания, особенно, если частота формантного релаксатора существенно (в 5—8 раз) превышает низкую частоту ведущего генератора (100—200 гц), а «метки» синхроимпульсов невелики, система позволяет ясно обнаружить автономное восприятие формантной высоты. При воспроизведении такого комплекса через акустическую систему 10, (по рис. 5), если его частоты неизменны, человек оказывается сначала не способным четко ориентироваться в содержании звуковой структуры; слышатся как бы два смешанных звука: один низкий — на частоте ведущего генератора и другой, высокий — на частоте формантного релаксатора.

При неподвижных частотах того и другого никакого предпочтения той или иной высоте слуховой анализатор не проявляет. При всей раздробленности звучания, эффект сохраняет известную целостность восприятия. Если теперь прибегнуть к вариации формантной частоты, то слух отчетливо определяет высотный характер этого движения, не отделяя его, однако, целиком от «фундамента» — частоты повторения импульсов ведущего генератора. При этом, между прочим, очень отчетливо обнаруживается увеличение субъективной интенсивности (громкости) звука при прохождении формантной частоты через зону 2—4 кгц (область наибольшей чувствительности слуха по звуковому давлению).

Если теперь оставить частоту формантного релаксатора постоянной и варьировать частоту ведущего генератора, то слух немедленно и без колебаний приспособляется к преимущественному восприятию этой

основной высоты; формантная высота при этом перестает восприниматься и переходить в область подчиненных, тембровых признаков, а раздвоенность восприятия почти исчезает. Таким образом, обнаруживается и доказывається, что ассимиляция основной высоты является чрезвычайно развитой, доминирующей функцией слухового анализатора, а формантная четкость звуков с ярко выраженной гармонической структурой требует специальных, благоприятных условий для восприятия. Из этого опыта можно сделать далеко идущие выводы об оптимальной структуре синтезированного речевого сигнала и о технических средствах такого синтеза, касающихся как параметров спектра возбудителя, включая формы его модуляции, так и параметров формант, включая формы их перестройки.

С позиций музыкального использования, улучшение восприимчивости формант при движении формантной частоты дает повод к созданию системы, в которой формантные частоты могли бы так или иначе несколько варьироваться, например, за счет вибрации. Систему такого рода, основанную на присоединении к резонансному контуру, имитирующему форманту, непрерывно вращающегося конденсатора переменной емкости, предложил в свое время Ф. Траутвейн (прибл. 1930—1935 г.). Система форматного релаксатора дает для этого случая весьма гибкое и полное решение, поскольку ввод в систему релаксатора дополнительного управляющего частотой напряжения любой формы не представляет затруднений.

Существенным развитием системы является применение нескольких одновременно действующих формантных релаксаторов, образующих целое поле для исследования самых тонких условий в области восприятий формантной структуры. Свойство схемы легко поддаваться настройке оказывается в этом случае неоценимым преимуществом данного устройства по сравнению с любым другим устройством подобного назначения, во всяком случае — на поисковом этапе того или иного исследования. Именно на такой основе, используя шесть параллельно действующих релаксаторов с независимой настройкой, автору в свое время удалось четко и точно установить корреляцию формант в таком тонком и сложном случае, как синтез звучания в скрипичном тембре.

В заключение следует отметить, что с физической и технической стороны система форматного релаксатора не является единственным средством построения кратно-частотных систем, она лишь позволяет в наиболее ясной начальной форме установить закономерности кратно-формантного восприятия. В этом следует признать ее важное значение, так как осознание когерентности музыкальных формант представляет факт фундаментального музыкально-психологического значения. Признак когерентности является основным в различии музыкальных и речевых формант, поскольку голосовой аппарат содержит только форманты, основанные на одиночных резонаторах, в то время как для музыкальных инструментов характерны в целом ряде случаев формантные системы с определенным соотношением довольно многочисленных частотных максимумов. Это различие между голосовым и инструментальным тембром существенно не только потому, что структура инструментального звука оказывается в своей статической характеристике значительно более сложной, но и потому, что, как было показано, наличие кратных резонансов создает дополнительный механизм восприятия, без которого тембровая различимость интонированных звуков, подчиненных в своем высотном движении жестким условиям отображения мелодического рисунка, никогда не смогла бы быть столь выразительной и многообразной. Восприятие кратности, как должно быть ясно из предыдущего, не только не приводит к рассеиванию формантного эффекта, но усиливает высотное восприятие первой — «основной» форманты. «Оберформанты» не ощущаются самостоятельно, а лишь ассимилируются высотным восприятием нижней форманты. Психологический механизм этого явле-

ния по существу полностью соответствует механизму восприятия сложного гармонически построенного звука, когда воспринимается не рассеянная сумма тонов, а единство, характеризующееся общим высотным качеством. Формантно-гармоническая ассоциация (объединение) является частной ассоциацией гармоник спектра по высотному признаку, уложенной в общую высотную ассоциацию.

Подобно тому, как аккорд из сложных звуков, при кажущейся нагроможденности и путанице в объективной спектральной структуре созвучия, приводит к более ясному восприятию суммы высот входящих в него звуков, чем аккорд простых тонов, «аккорд» формантных гармонических ассоциаций представляется по восприятию более ясным и образным, чем «аккорд» одиночных формант. Это обстоятельство приводит к объяснению того факта, что некоторые тембровые структуры, свойственные, например, звукам смычковых инструментов, при определенной четкости по восприятию совершенно ненаглядно отражаются спектральными характеристиками, получаемыми в результате объективного гармонического анализа. Сложная геометрия дек смычковых инструментов в сочетании с анизотропной их структурой создает определенные условия для образования сложных (волнового типа) резонансов, обуславливающих такую огибающую амплитуд спектра, которая отличается внешней хаотичностью, в то время как именно в этом случае слуховой анализатор воспринимает изысканно стройную систему аккорда кратных формант.

Четкость формантного эффекта гармонической ассоциации позволяет распространить его на область низких звуков, где непосредственное ощущение одиночной форманты физиологически невозможно. Так, для звуков контроктавы (33—66 гц) представляет интерес форманта с частотой 100—150 гц. Одиночный резонанс на таких частотах не может дать четкого высотного ощущения; вместе с тем, гармоническая ассоциация с основной частотой 100—150 гц вполне воспринимается на том же основании, что и для восприятия звука такой же высоты с гармоническим спектром. В этом случае не является обязательным усиление именно первой формантной частоты, но достаточно интенсивного излучения на вышележащих кратных формантных частотах.

Кратно-формантные системы решают также вопрос о сочетании формантного и светлотного признака тембра: концентрация энергии в зоне одиночного резонанса приводит к уменьшению энергии высоких частот, что придает звуку в восприятии более тусклый, тяжелый характер. При наличии подкрепляющих гармонических оберформант эффективная протяженность спектрального ряда сохраняется или даже увеличивается, но то, что в простом случае (рис. 2) будет лишь вуалью дискретных нижележащих гармоник, здесь будет средой усиления формантного эффекта.

На рассмотренном примере анализа восприятия формантной высоты можно видеть, что использованный метод анализа через синтез, в частности — электронный синтез, дает большие возможности для уточнения или получения новых данных о процессе музыкального восприятия. Разумеется, существует еще целый ряд аспектов психологического исследования в области звукового восприятия, где описанные приемы могут оказаться чрезвычайно эффективными.

---

THE ELECTRICAL SYNTHESIS OF MUSICAL SOUNDS AS A BASIS  
FOR INVESTIGATING THEIR PERCEPTION

A. A. Volodin

*Summary*

The paper is devoted to the study of the efficiency of analysis through synthesis for investigating sound perception. An optimum scheme of synthesis of musical sound structures is substantiated and data obtained in the system of synthesizer (a musical instrument Evodin) are presented. A partial scheme of synthesis is given for sounds with multiple-harmonic formants and the role is considered of formants coherency in musical sound perception

