

Инж. Л. Е. ТРЕГУБЕНКО

ГРАММОФОННЫЕ
АДАПТЕРЫ
(ЗВУКОСНИМАТЕЛИ)



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ПО ВОПРОСАМ РАДИО
МОСКВА 1937

Ответственный редактор *Г. Гинкин*.
Техн. редактор *А. Соколов*
Корректор *А. Борноза*

Сдано в производство 2 июня 1937 г. Подпи-
сано к печати 10 сентября 1937 г. Об'ем 1 печ.
л. = 0,94 арт. л. Формат $\frac{1}{16}$ доля 60×92 см.
Упоном. Главлита № Б-269.7. Изд. № 23.
Тираж 20000 экз. Зак. тип. 442.

Типография и цинкография Жургазоб'единения,
1-й Самотечный пер., 17.

Звукосниматели

Звукосниматели или, как их чаще называют, адаптеры получили в течение последних лет очень большое распространение. Адаптер преобразует механические колебания граммофонной иглы при проигрывании пластинок в соответственные колебания электрического напряжения. Полученное от адаптера переменное напряжение подводится на вход усилителя низкой частоты, откуда после усиления поступает в громкоговоритель. Чаще всего в качестве усилителя используется низкочастотная часть обычного радиовещательного приемника. Во всех современных радиоприемниках предусматриваются специальные гнезда или клеммы для включения адаптера.

Электрическое воспроизведение записи граммофонных пластинок при помощи адаптера по сравнению с обычным акустическим воспроизведением (посредством мембраны) имеет ряд существенных преимуществ, главнейшие из которых следующие:

1. Значительно большая художественность передачи записи.
2. Возможность получения очень большой громкости.
3. Легкая возможность в широких пределах изменять громкость воспроизведения (при помощи регулятора громкости).
4. Возможность посредством регулятора тона менять тембр звучания.

Из многочисленных конструкций адаптеров, предлагавшихся в свое время, только два типа получили в настоящее время широкое практическое распространение, это: 1) электромагнитные адаптеры, 2) адаптеры пьезоэлектрические.

Электромагнитный адаптер

Типичный образец группы электромагнитных адаптеров показан на рис. 1.

В поле небольшого по размерам постоянного магнита помещается катушка с многослойной намоткой. Катушка тем или иным способом закрепляется неподвижно между двумя полюсами магнита, к которым крепятся железные полюсные наконечники.

В междуполюсном пространстве (внутри катушки) помещается важнейшая часть звукоснимателя—железный якорь, который закреплен (обычно при помощи резины) таким образом, что он может слегка колебаться в ту или иную сторону под действием прило-

женной к его концу внешней силы. Якорь имеет приспособление, при помощи которого в нем может быть закреплена обыкновенная граммофонная игла, которую можно легко сменить.

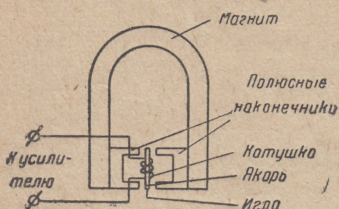


Рис. 1. Устройство электромагнитного адаптера

Существует довольно много вариантов выше описанной системы адаптеров. Так, например, в некоторых типах якорем служит сама металлическая граммофонная игла.

Проходя по бороздкам граммофонной пластинки, игла, а следовательно, и якорь звукоснимателя приходят в колебания, соответствующие извилинам записи звука.

При колебательном движении якоря магнитный поток, проходящий через него, будет меняться как по величине, так и по направлению, индуцируя в катушке переменную электродвижущую силу, зависящую от скорости колебательного движения иглы (т. е. от частоты и амплитуды записи).

Вследствие инерции подвижной системы звукоснимателя, необходимости демпфирования (крепления) его якоря и т. д. полной пропорциональности между напряжением, развиваемым адаптером, и частотой звука, записанной на пластинке, не получается—адаптер вносит некоторые искажения при воспроизведении пластинок. Кривая, показывающая зависимость напряжения, развиваемого звукоснимателем, от частоты записи на граммофонной пластинке (при определенной для данной частоты амплитуде записи) называется частотной характеристикой адаптера.

По частотной характеристике адаптера можно судить о его качестве, т. е. насколько равномерно он передает („пропускает“) те или иные частоты, а также можно определить его чувствительность, характеризующуюся средним выходным напряжением. В идеальном случае частотная характеристика звукоснимателя выражается прямой линией.

Частотные характеристики звукоснимателей снимаются в лабораториях при помощи специальных стандартных частотных пластинок.

Большая неравномерность характеристики, резкие подъемы кривой или ее провалы свидетельствуют о плохом качестве адаптера, о наличии нежелательных резонансов его механической системы. Следует однако иметь в виду, что запись на обычных граммпластинках ограничена в среднем полосой от 60—80 до 4000—5000 μ и что, следовательно, только в этом участке важна ровная характеристика.

На качество воспроизведения граммофонной записи влияют еще амплитудные или нелинейные искажения звукоснимателя. Однако, в хороших современных звукоснимателях они незначительны и ими можно пренебречь. Особенно малы такие искажения в пьезоэлектрических адаптерах.

Пьезоэлектрический адаптер

В течение самых последних лет за границей получил значительное распространение новый тип звукоснимателя, основанный на пьезоэлектрическом свойстве некоторых кристаллов.

Пьезоэлектрический эффект заключается в способности кристаллов некоторых веществ (кварца, турмалина, сегнетовой соли и т. д.) создавать на своих гранях электрические заряды при механическом давлении на кристалл.

Так как существует прямая пропорциональность между давлением на кристалл и возникающим электрическим потенциалом, то вышеуказанный пьезоэффект может быть использован для конструирования звукоснимателей. В пьезоэлектрических адаптерах механическое давление граммофонной иглы (при ее боковом перемещении по извилинам бороздки на граммофонной пластинке) создает переменные усилия, прилагаемые к элементу, состоящему из двух склеенных пластинок кристаллов сегнетовой соли. Под влиянием этих деформаций на кристаллах возникают переменные электрические заряды. Созданное зарядами на кристалле напряжение посредством серебряных контактов (электродов) передается на вход усилителя низкой частоты.

Так как пьезоэлектрический адаптер не является проводником и работает как емкость, то непосредственное присоединение его электродов (обкладок) к сетке-нити лампы невозможно, потому что в этом случае лампа была бы заблокирована (заперта) и усилитель перестал бы работать. Поэтому пьезоэлектрические адаптеры всегда замыкают сначала на какое-либо балластное сопротивление (несколько сотен тысяч ом), с которого как с потенциометра и снимается напряжение на сетку лампы. Это балластное сопротивление используется обычно в качестве регулятора громкости.

Схема включения пьезоадаптера приведена на рис. 2.

Пьезоэлектрический звукосниматель, являясь последним словом адаптерной техники, имеет значительные преимущества по сравнению с электромагнитными адаптерами старых систем, а именно:

- 1) лучшую частотную характеристику,
- 2) значительно лучшую амплитудную характеристику,
- 3) большую чувствительность,
- 4) меньший вес и следовательно меньше изнашивает пластинки,
- 5) нечувствительность к влиянию окружающих электромагнитных полей (например, к индукции от электрического граммотора),
- 6) большую простоту устройства и, следовательно, дешевизну (при массовом производстве).

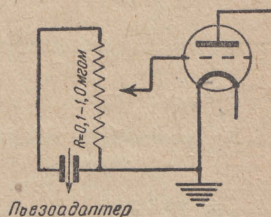


Рис. 2. Схема включения пьезоадаптера

Установка звукоснимателя

Адаптер укрепляется на тонарме акустического граммофона вместо акустической мембраны, или же на специальном вращающемся держателе, таким образом, чтобы игла, закрепляемая в адаптере, могла следовать по бороздкам записи звука на граммофонной пластинке. Выводы от начала и конца катушки звукоснимателя (электромагнитного типа) присоединяются к адаптерным гнездам приемника.

При применении пьезоэлектрического звукоснимателя необходимо, как мы уже говорили, включение (по схеме потенциометра) высокоомного сопротивления. Такое включение очень часто применяется и при обычных электромагнитных адаптерах для регулировки громкости в том случае, если отсутствует регулятор громкости в низкочастотной части приемника, применяемого для работы с адаптером. Очень часто регулятор громкости монтируется в стойке держателя адаптера, составляя с ним одно конструктивное целое.

Правильная установка звукоснимателя имеет весьма существенное значение для получения высококачественного воспроизведения и для обеспечения наибольшей сохранности проигрываемых пластинок. При установке адаптера (см. рис. 3), прежде всего, необходимо следить за тем, чтобы угол γ , составляемый плоскостью пластинки и иглой, укрепленной в ябре звукоснимателя, был бы равен 60° . Допустимые отклонения не должны пре-

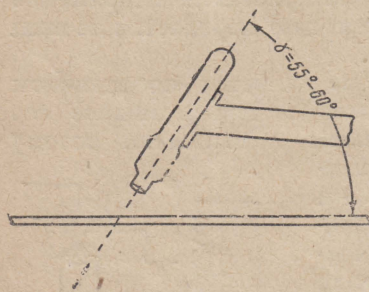


Рис. 3. Правильный наклон адаптера

вышать 5° (в меньшую сторону).

Кроме того, для меньшего износа пластинки необходима правильная установка стойки звукоснимателя по отношению к центру диска, а также правильное крепление самого адаптера к держателю (тонарму).

Часто стойка с адаптером укрепляется таким образом, что закрепленная в последнем игла проходит как раз над центром вращения пластинки (над шпинделем мотора). Такое крепление стойки, очень часто применяемое в прежних конструкциях акустических граммофонов, встречается еще и сейчас и безусловно является неправильным и способствует преждевременному износу пластинок.

При правильной установке звукоснимателя острие иглы должно приходиться не над шпинделем мотора, а несколько за ним, на расстоянии от 13 до 20 мм от центра. Точная величина выноса определяется расчетной (условной) длиной держателя (тонарма) адаптера. Под расчетной длиной держателя следует понимать

расстояние от оси вращения стойки держателя до конца (острия) иглы, закрепленной в звукоснимателе.

Кроме этого сам адаптер должен быть закреплен на держателе таким образом, чтобы вертикальная плоскость, проходящая через иглу (линия $A-G$ на рис. 4) образовала бы с прямой ($B-G$), соединяющей ось вращения тонарма с концом иглы, некоторый угол (α), величина которого зависит также от длины примененного держателя. Практически величина этого угла колеблется от 18 до 28°.

Понятно, что держатель (тонарм) может быть сам по себе какой угодно формы, так как вышеприведенные данные не зависят от его конструктивного выполнения.

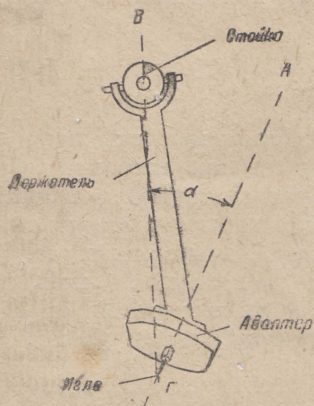


Рис. 4. Угол крепления адаптера

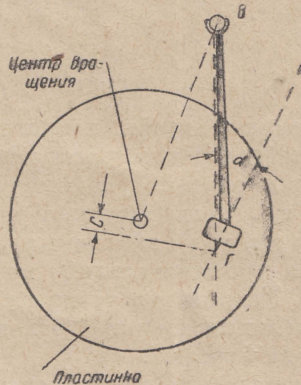


Рис. 5. Установка адаптерной стойки

На рис. 5 показано схематическое изображение установки стойки с звукоснимателем, а в таблице 1 даны цифровые значения угла α и величины выноса (C) адаптера за центр диска в зависимости от расчетной длины держателя.

Обозначения в таблице те же, что и на рисунках 4 и 5.

Таблица 1

1	Расчетная длина адаптера ($B-G$) в мм	300	230	260	240	220	200
2	Вынос C за центр вращения пластины в мм	13	14	15	17	18	20
	Угол α в градусах	18,5	20	21,5	23	25,5	28

Вес звукоснимателя

Нормальное давление конца иглы на пластинку должно быть в пределах от 120 до 170 г. Это давление определяется как весом самого адаптера, так и весом держателя (или его части). При меньшем весе возможны (при обычных электромагнитных звукоснимателях) перескакивания иголки в соседнюю канавку пластинки. При большем весе очень сильно изнашиваются пластинки.

При применении пьезоэлектрического адаптера давление может быть значительно уменьшено, так как вследствие легкого демпфирования якоря таких адаптеров, опасность самопроизвольного перескакивания из одной бороздки пластинки в другую отпадает.

Шумы

Опытным путем выяснено, что шумы, слышимые при проигрывании пластинок, особенно изношенных, в значительной мере обязаны резонансу адаптера на высоких частотах (порядка 3500—4000 ц). Для подавления этих шумов применяются специальные фильтры, так называемые „регуляторы тона“, при помощи которых можно в значительной мере уменьшить неприятное „шипение“ иглы. Устройство таких фильтров и схемы их включения описаны в отдельном выпуске „Электрические фильтры“, серии „В помощь радиолюбителю“.

Уменьшению шума способствует применение, вместо стальных, деревянных граммофонных иголок, которые к тому же совершенно не портят пластинок.

Скорость вращения пластинок

Для правильного художественного воспроизведения граммофонной записи скорость вращения пластинки при проигрывании должна быть совершенно одинакова со скоростью вращения диска при первоначальной записи звука на пластинку. Все современные советские и заграничные пластинки записаны при стандартной скорости вращения диска равной 78 оборотов в минуту. С этой скоростью и должны проигрываться все пластинки при воспроизведении. В синхронных электрических граммофонных моторах переменного тока скорость вращения диска не регулируется и поддерживается постоянной, достаточно близкой к стандартной, при условии питания такого мотора от электрической сети соответствующей частоты. В электромоторах других систем, а также в обычных граммофонах с пружинным приводом скорость вращения диска устанавливается при помощи центробежного регулятора. Для того, чтобы проверить и установить требуемую скорость вращения очень удобно применять так называемый стробоскопический диск. Такой диск, рассчитанный на 78 оборотов, дан на от-

дельном листе в конце книги. Вырезав его и наклеив на картон, диск помещают на проигрываемую пластинку, туго надев на выступающую ось (шпиндель). Диск освещают неоновой лампочкой или обыкновенной маловаттной лампочкой (10—25 *вт*) накаливания от сети освещения переменного тока с частотой 50 *гц*. При числе оборотов, равном 78, черные деления диска будут как бы „стоять“ на месте, т. е. стробоскопический диск будет казаться неподвижным и лишь слегка дрожащим. Если деления диска кажутся идущими вперед или назад по отношению к направлению вращения пластинки, то установленная скорость неправильна (соответственно больше или меньше 78 оборотов) и при помощи регулятора скорости следует установить правильное число оборотов. (Пружинные механизмы граммофонов редко сохраняют требуемую постоянную скорость при проигрывании пластинки от начала до конца). При применении неоновой лампы стробоскопический эффект (кажущаяся неподвижность диска) проявляется много отчетливей чем при обычной лампочке накаливания.

Наши звукосниматели

Теперь перейдем к краткому описанию наиболее распространенных адаптеров, выпущенных советской промышленностью, причем везде, где это возможно, приведены основные электрические данные звукоснимателей и их частотные характеристики. В описание включены и типы адаптеров, уже снятых с производства.

Все наши электромагнитные адаптеры принадлежат к высокоомным типам, т. е. их катушка имеет достаточно высокое сопротивление, и такие адаптеры можно включать непосредственно в гнезда адаптера, т. е. присоединять к сетке-нити первой лампы усилителя низкой частоты.

Первые адаптеры

Одним из первых звукоснимателей, выпущенных советской промышленностью, был адаптер Киевского радиозавода. По принципу работы—это электромагнитный адаптер с подковообразным магнитом. Этот адаптер не отличался высоким качеством воспроизведения, плохо передавал низкие частоты и имел плохое демпфирование якоря, вследствие чего его частотная характеристика была очень неравномерна, что приводило к подчеркиванию некоторых частот („выкрикам“). Невысокими качествами отличались и адаптеры, выпущенные заводом „Украинрадио“ в Харькове. Несколько лучшие характеристики имели адаптеры, изготовленные Ленинградским филиалом НИИС.

Механизм всех вышеупомянутых адаптеров был заключен в металлический кожух и они (кроме адаптера Киевского радиозавода)

выпускались без стойки, т. е. предназначались для работы с обычным тонармом акустического граммофона.

Массового выпуска вышеупомянутых адаптеров на рынок не было.

Адаптеры завода „Электроприбор“

Эти адаптеры также относятся к электромагнитным типам и предназначаются для установки взамен акустической мембраны на тонарме обычного граммофона. На рис. 6 показан разрез механизма адаптера „Электроприбор“, где 1—подковообразный магнит, 2—катушка, внутри которой проходит якорь, демпфированный резиной. Весь механизм заключен в никелированный кожух цилиндрической формы, диаметром 60 мм и высотой 20 мм. Его основные данные:

вес адаптера 150 г,
сопротивление катушки—550 ом,
индуктивность катушки—0,5 гн.

Якорь адаптера закреплен наглухо у верхнего конца.

Этот адаптер обладает низкой чувствительностью вследствие больших зазоров между концом якоря и магнитом и малым количеством витков проволоки на катушке. Частотная характеристика адаптера также мало удовлетворительна.

Этот адаптер давно снят с производства. В настоящее время „Электроприбор“ выпускает звукосниматели типа ЭЛА-2, являющиеся лучшими на нашем рынке. Описание ЭЛА-2 приведено ниже.

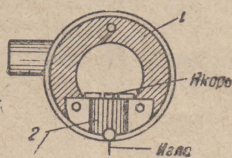


Рис. 6. Механизм адаптера „Электроприбора“

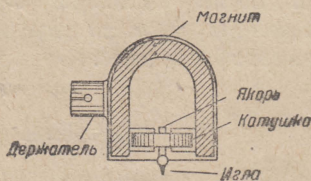


Рис. 7. Адаптер „Радист“

Адаптер завода „Радист“

Самым распространенным адаптером является, без сомнения, звукосниматель завода „Радист“. По своему устройству он несколько напоминает адаптер „Электроприбора“, однако, отличается от последнего как лучшим внешним оформлением, так и своими электрическими характеристиками. Схематическое изображение механизма адаптера „Радист“ дано на рис. 7.

Следует отметить, что якорь этого адаптера не закреплен (как в адаптере „Электроприбора“), что значительно улучшает работу адаптера „Радист“.

Механизм адаптера „Радист“ заключен в разъемный кожух из разноцветной целлулоидной массы. Его основные данные:

вес адаптера около 140 г,
сопротивление обмотки около 2000 ом,
индуктивность обмотки—1,5 м.

Чувствительность адаптера „Радист“ значительно выше всех предыдущих типов. Напряжение на выходе равно в среднем 0,3 в, что обеспечивает достаточно громкую передачу при двухламповом усилителе низкой частоты с трансформаторной связью.

Частотная характеристика адаптера „Радист“ приведена на рис. 8.

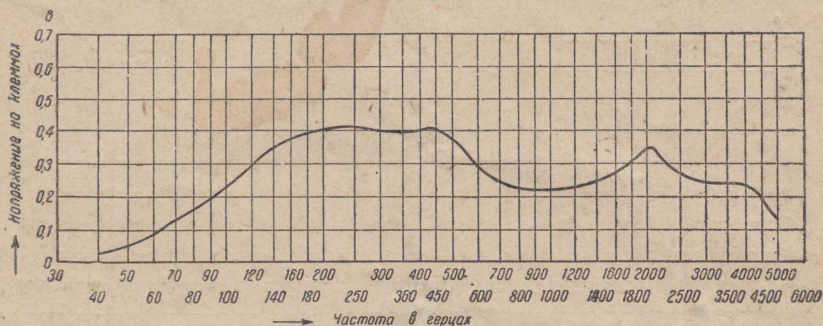


Рис. 8. Частотная характеристика адаптера „Радист“

Примечание. Все приводимые ниже частотные характеристики адаптеров являются ориентировочными, так как они различны для отдельных экземпляров.

В последнее время завод „Радист“ выпускает помимо вышеописанного адаптера, предназначенного для работы с акустическим тонаром, те же адаптеры, смонтированные вместе с держателем и регулятором громкости.

Следует отметить, что, будучи по своей работе достаточно удовлетворительными, адаптеры завода „Радист“ все же уступают современным высококачественным адаптерам как по своей чувствительности, так и по частотной характеристике.

Адаптер Москоопкульта

Этот адаптер также электромагнитного типа (рис. 9) выпускала кустарная мастерская.



Рис. 9. Адаптер Москоопкульта

Как видно из рисунка, адаптер соединен со стойкой, что значительно упрощает и облегчает установку его на граммофон. Адаптер и стойка черного цвета.

Длина адаптера со стойкой около 220 мм. Адаптер высокоомного типа (сопротивление около 1 000 ом).

Конструктивной особенностью адаптера Москоопкульта является отсутствие зажимного винта для иголки. Игла вставляется в адаптер и автоматически зажимается в нем. Вынимание иглы производится без труда. Головка адаптера может поворачиваться на 90°, что облегчает и ускоряет смену иглы.

Следует отметить хорошую частотную характеристику этого адаптера (рис. 10), дающую почти равномерное воспроизведение частот в полосе от 80 до 4 000 *гц*.

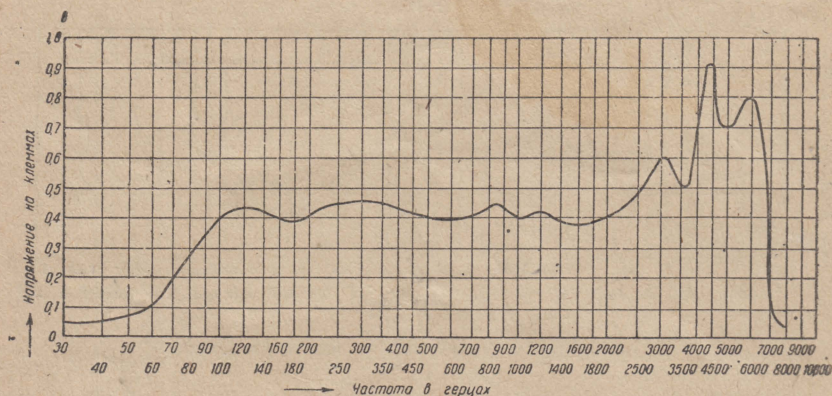


Рис. 10. Характеристика адаптера Москоопкульта

Вообще по качеству воспроизведения данный адаптер для своего времени (1934—35 гг.) был наилучшим из всех имевшихся на рынке, обеспечивал хорошую передачу и давал возможность любителям сконструировать вполне современную установку для воспроизведения граммофонных пластинок.

В настоящее время этот адаптер не производится.

Адаптер типа ЭЛА-2

Новый адаптер завода „Электроприбор“, выпущенный на рынок в 1936 г., как по своим электрическим качествам, так и по внешнему оформлению является лучшим электромагнитным звукоснимателем советского производства.

Общий вид адаптера ЭЛА-2 и схема его включения приведены на рис. 11.

В стойку адаптера вмонтирован регулятор громкости, от которого идет провода для включения к приемнику или усилителю.

Длина держателя (от центра вращения до конца иглы) равна 220 мм. Головка адаптера правильно скорректирована, образуя угол по отношению к прямолинейному тону в $25,5^\circ$, что обес-

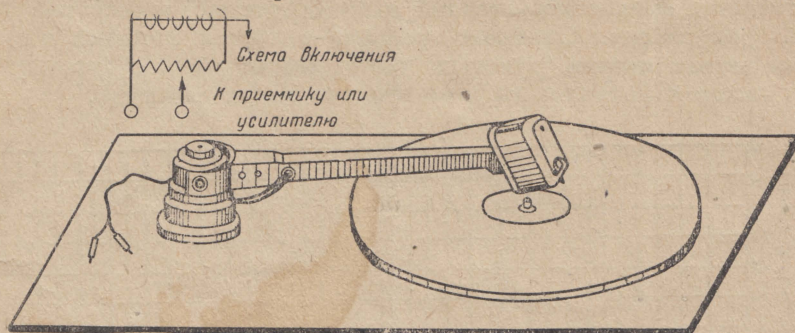


Рис. 11. Адаптер ЭЛА-2

печивает малый износ пластинок при условии соблюдения при укреплении стойки звукоснимателя правильного выноса (порядка 18 мм) за центр оси диска для пластинок. К каждому адаптеру прилагается схема его правильной установки.

Катушка адаптера ЭЛА-2 имеет 4500—5000 витков проволоки с эмалевой изоляцией, диаметр провода 0,05 мм, сопротивление

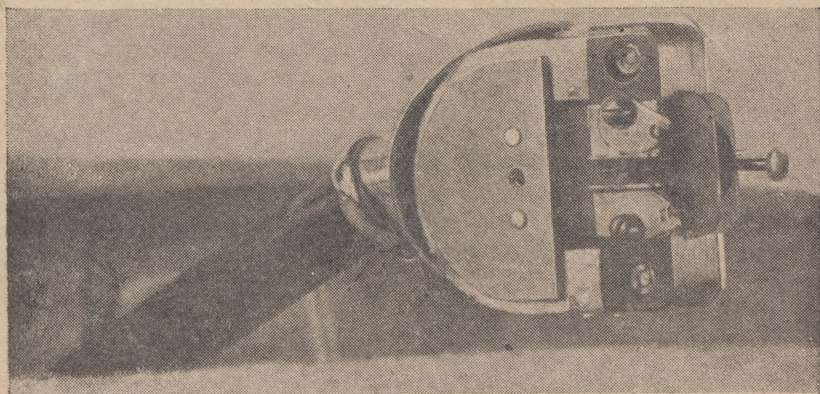


Рис. 12. Внешний вид адаптера ЭЛА-2 (со снятой крышкой)

катушки в среднем равно 1750 ом. Сопротивление регулятора громкости около 50 000 ом. Для уменьшения давления на пластинку в стойку адаптера вмонтирована плоская пружина, несколько отжимающая всю систему кверху. Назначение этой пружины—замена обычно применяемого при тяжелых адаптерах противовеса. В стойке имеются упоры, ограничивающие боковое перемещение адаптера. Головка адаптера вместе с тонармом может быть отки-

нута вверх и оставлена в таком положении. Общий вид адаптера приведен на рис. 12.

Частотная характеристика адаптера ЭЛА-2 дана на рис. 13. Она отличается вполне достаточной равномерностью, и широкой полосой пропускания. Особенно ценным является хорошая передача даже весьма низких звуковых частот (от 50 μ) и отсутствие резких пиков и провалов на всем участке характеристики.

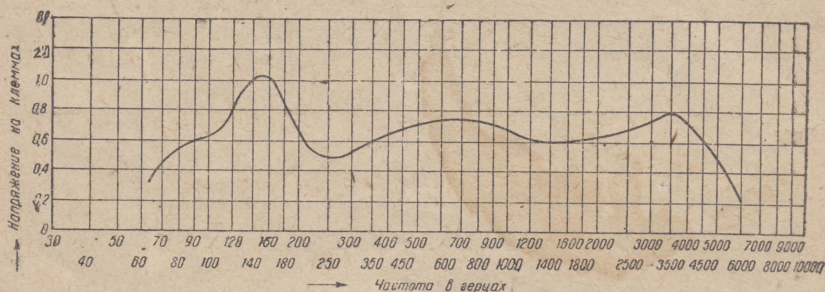


Рис. 13. Характеристика адаптера ЭЛА-2

Электродвижущая сила, развиваемая на зажимах катушки адаптера, в среднем равна 0,7—0,8 в, таким образом и по своей чувствительности этот звукосниматель превосходит все предыдущие образцы.

К недостаткам описываемого адаптера можно отнести несколько тугой ход его при боковом передвижении и безусловно неудачную конструкцию отжимной пружинки. Отверстие для иглы рассчитано на стандартные стальные иглы (ОСТ 3355).

В связи с увеличивающимся распространением деревянных (бамбуковых) игл, без сомнения, было бы целесообразнее выпускать эти адаптеры также и с трехгранным отверстием соответствующего размера для удобного крепления неметаллических иглолок. Адаптер ЭЛА-2 разработан лабораторией Института радиоприема и акустики (ИРПА).

Пьезоэлектрический адаптер типа АП-1

Общий вид пьезоэлектрического адаптера, разработанный той

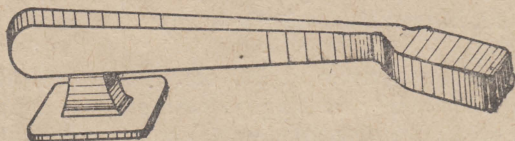


Рис. 14. Пьезоэлектрический адаптер АП-1

же лабораторией, что и адаптер ЭЛА-2, показан на рис. 14. Держатель адаптера сделан из целлулоида.

В качестве рабочего элемента в адаптере применены пластины кристаллов сегнетовой соли. С особенностями работы пьезоэлектрических адаптеров мы уже познакомились выше. Следует лишь отметить, что адаптер АП-1 как по своему внешнему оформлению, так и по своим электрическим свойствам представляет собою вполне современный прибор, рассчитанный на художественное воспроизведение записи граммофонных пластинок.

Частотная характеристика адаптера приведена на рис. 15. Сравнивая эту характеристику с характеристиками даже лучших образцов адаптеров электромагнитного типа, можно легко видеть пре-

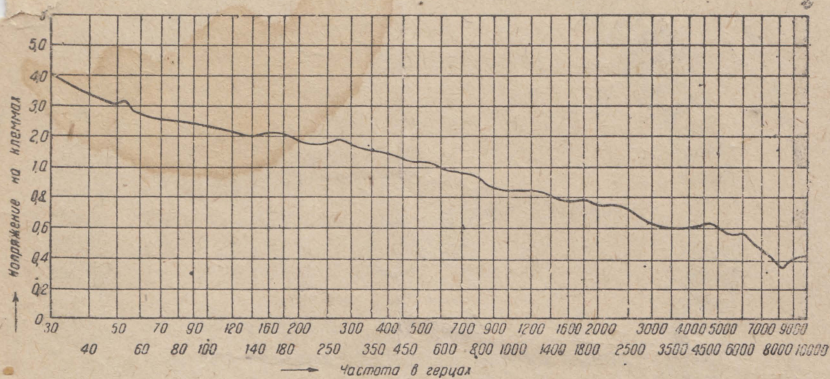


Рис. 15. Характеристика адаптера АП-1

имущества пьезоэлектрического адаптера: отсутствуют провалы и резкие пики (некоторый подъем на стороне низких частот наоборот способствует улучшению качества воспроизведения), кроме того адаптер развивает на клеммах напряжение в среднем выше 1 в.

Полоса пропускания частот адаптера чрезвычайно велика, доходит до 10 000 ц и не имеет предела на нижнем диапазоне. Такая ширина полосы значительно превосходит возможности записи современных пластинок обычного типа. Однако, за последнее время появились (пока только за границей) новые пластинки с улучшенной записью, для которых требуются адаптеры с подобной характеристикой.

Вес адаптера АП-1 очень незначителен, кроме того адаптер имеет соответствующую корректировку. Поэтому износ пластинки даже при применении стальных иголок очень мал.

К сожалению, наша промышленность до сих пор не приступила к массовому выпуску пьезоэлектрических адаптеров. Лабораторией выпущена лишь очень небольшая партия адаптеров типа АП-2, вследствие чего стоимость их очень высока, хотя само их устройство крайне несложно и применяемые материалы недороги.

Заканчивая этим описание различных звукооснимателей и их работы, мы считаем нужным обратить внимание еще на одно обстоятельство. Следует всегда помнить, что адаптер является лишь одним звеном цепи, включающей в себе граммофонный мотор, иглу,



Рис. 16. Стробоскопический граммофонный диск

пластинку, усилитель и, наконец, громкоговоритель. Как бы хорош ни был адаптер сам по себе, но, если мотор вращается недостаточно равномерно, усилитель и громкоговоритель имеют плохие параметры, то получить высокохудожественное воспроизведение никогда не удастся. Поэтому, собирая современную граммофонную установку с применением радиоэлектрических методов воспроизведения, следует обращать внимание на работу всех отдельных звеньев в цепи воспроизведения. Только в этом случае можно получить действительно высококачественные результаты.

Положите на вращающийся диск

При 78 оборотах в минуту черные
линии будут казаться неподвижными

Наблюдайте при
электрическом свете от переменного тока