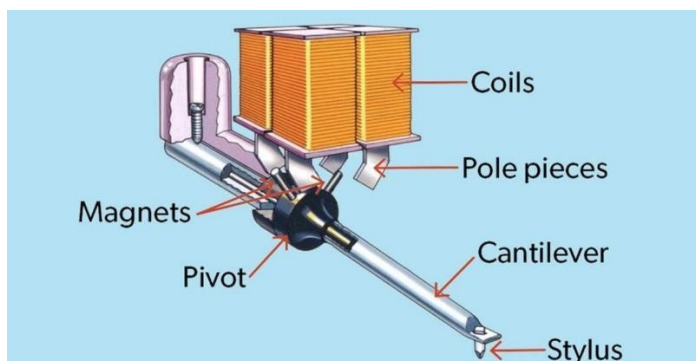


## Разделение тележек ММ на электрические части с индивидуальными передаточными функциями



Билл Шурвинтон,  
Дагфинн Расмуссен,  
Ханс Полак

04/04/2023

### Введение:

Фонокартридж с подвижным магнитом состоит из двух важных частей - блока щуп/кантилевер и электрической части, принимающей сигнал с кантилевера, которая здесь и далее обозначается как генератор.

Целью данной работы было выяснить, влияют ли эти две части друг на друга или могут рассматриваться как независимые.

### Выводы:

- 1) В данной работе было показано, что связь между консолью и генератором настолько слаба, что взаимодействие одного с другим или взаимная обратная связь могут считаться пренебрежимо малыми.
- 2) Часто упоминаемая модель резонирующей иглы/кантилевера, электрически корректируемой генератором с гораздо более узкой ФР, оказалась неверной.
- 3) Модель консольной сборки, полученная в результате исследования, также позволила найти правдоподобное объяснение того, почему Cartrons проседает в своих FR в районе 5 КГц.
- 4) Прелесть наличия точной схемы замещения для генератора "консоль плюс" заключается в том, что можно моделировать любые нагрузки и оптимизировать их для

получения наилучшего отклика.

# Содержание

1) Сменные диаграммы для генератора картриджей MM.	3
2) Измерение частотных характеристик комплектных тележек	4
3) Определение передаточной функции для консольного узла	6
4) Построение схемы замены консольного узла	6
5) Окончание Cart с нагрузкой, значительно меньшей 47K (Damped Loading)	11
6) Сравнение модели, представленной в данной работе, с другой моделью.	14
7) Дальнейшие направления исследований	15
8) Использованная литература	15

## 1) Сменные диаграммы для генератора картриджей MM.

Некоторые простые измерения показали, что заводские спецификации параметров картриджного генератора, в частности индуктивности и сопротивления, как правило, неточны. Поэтому первым шагом было составление диаграмм замещения генераторов с помощью векторного анализатора сети. С этого и началась вся работа.

Билл, имеющий большую коллекцию всевозможных тележек, предоставил для измерения восемь совершенно разных тележек, см. ссылку ниже:

<https://www.diyaudio.com/community/threads/cartridge-dynamic-behaviour.320026/page-72#post-5792099>

В результате одного из первых испытаний было установлено, что нет никакой разницы в том, закреплен консольный узел или нет, даже в мельчайших деталях, хотя используемый ВНА с высокой точностью измеряет частоты до 10 МГц.

Можно также подать сигнал на генератор, но это никогда не приведет к движению иглы. Таким образом, генератор "не видит" консольную сборку.

Необходимо было ответить на вопрос, верно ли и обратное, т.е. видит ли консольный узел генератор таким образом, что его поведение зависит от нагрузки генератора?

Испытания, проведенные при замыкании одного канала, показали, что "электрического демпфирования", о котором иногда говорят, не существует, но необходимы дальнейшие испытания.

Появилась принципиальная схема, топология которой может быть использована для представления всех генераторов Cart. Ниже приведен один из примеров, представляющий собой схему замещения Audio Technica AT150.

Слева сверху - результаты измерений ВНА, которые в конечном итоге привели к схеме замещения в LTSpice, которая точно повторяет результаты ВНА и дает гораздо более точную электрическую модель генератора, чем имевшиеся ранее

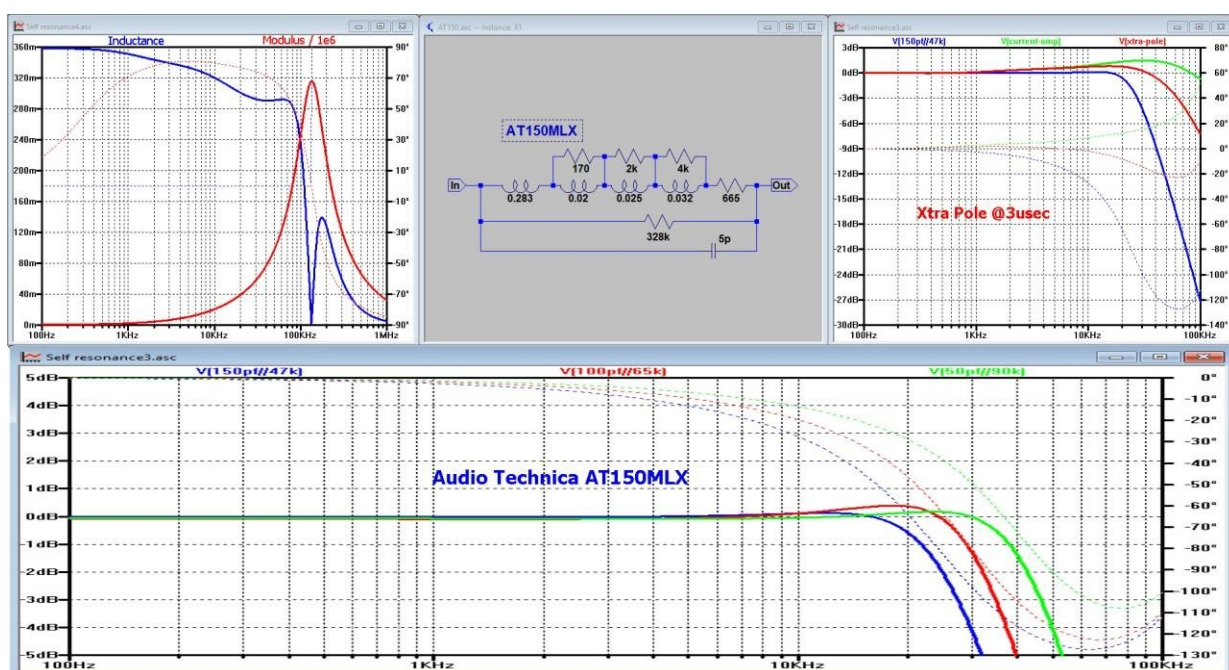


Рисунок 1 Исследование генератора AT150

При подаче на эти имитационные генераторы сигнала возникает ФР, зависящий от их нагрузки, под которой понимается общая емкость межблочного соединения плюс входная емкость предусилителя плюс входное сопротивление. В качестве нагрузочного сопротивления чаще всего используется сопротивление 47К. Однако результирующий FR сильно зависит от этой нагрузки, как видно из нижней части изображения. Поэтому при измерении FR всей тележки важно точно знать предельную нагрузку.

Возможны и альтернативные конфигурации заделки, например, использование значительно меньшего сопротивления нагрузки, что практически исключает влияние общей мощности нагрузки, демпфированная нагрузка, как ее иногда называют. [6]

При использовании сопротивления, где Rload и Lcart образуют полюс 75 мксек, примерно 4К в случае AT150, полюс 75 мксек в сети R1aа предусилителя можно отбросить, но можно использовать и другие частоты полюсов, но тогда они потребуют дополнительной и более сложной компенсации в предусилителе.

В правом верхнем углу рис. 1 синим цветом показаны оба варианта с использованием полной компенсации R1aа, оконеченной 47К//150pF, а зеленым - вариант, оконеченный ок. 4К без 75 мксек полюса в сети R1aа, практически нечувствительный к емкостному оконечению генератора.

Для некоторого "усмирения" расширенного FR красным цветом показан эффект от дополнительного 3 мксек полюса. Хотя эти изображения FR все еще без кантилевера, просмотр всех изображений в приведенной выше ссылке DiyAudio может показать, что не каждая тележка может быть счастлива с нагрузкой 75 мксек. Это в значительной степени зависит от свойств используемой комбинации консоль/генератор и объясняет, почему такая схема нагружения предлагалась несколько раз, но так и не была реализована. В настоящее время авторам известен только один фонокаскад не DIY с такой схемой нагружения, изготовленный компанией Phaedrus audio и работающий только с одной моделью картриджа AT.

Дагфинн, делающий все записи FR картриджа, начинал с Luxman, но поскольку нам требовалась очень точная оконечная нагрузка, был модифицирован предусилитель Moon 110LP v2, настраиваемый соответственно на 50pF, 150pF, 270pF и 370pF параллельно 35K, 47K, 58K, 67K, 81k и 100K.

FR был сделан с точностью до 0,1 дБ в диапазоне до 100 кГц.

## 2) Измерение частотных характеристик комплектных тележек

Одной из самых больших проблем при измерении частотной характеристики картриджа является подбор подходящей тестовой пластинки. Многие из пластинок "золотой эры" винила имеют потенциальные аномалии, искажающие результаты. Для данного тестирования мы использовали запись розового шума с коррекцией R1aа от 500 Гц до 30 кГц на диске со скоростью вращения 45 об/мин от CH Precision. Она была сгенерирована компьютером для обеспечения точности, которую редко можно встретить в тестовых записях.

Розовый шум имеет равную энергию на октаву, и при отображении ФР с помощью БПФ с фиксированной шириной частотных бинов он будет иметь отрицательный наклон 10 дБ/декаду.

Для проверки корректности записанного на диск сигнала запись воспроизводилась с помощью картриджа Benz LP MC, ФР которого в диапазоне 10 Гц-50 КГц находится в пределах

1 дБ.

Рисунок 2 полностью подтверждает, что Disk можно использовать для наших целей в качестве эталона. До 28,5 КГц отклик находится в пределах  $\pm 0,5$  дБ, а дальше - - 1,5 дБ@30 КГц.

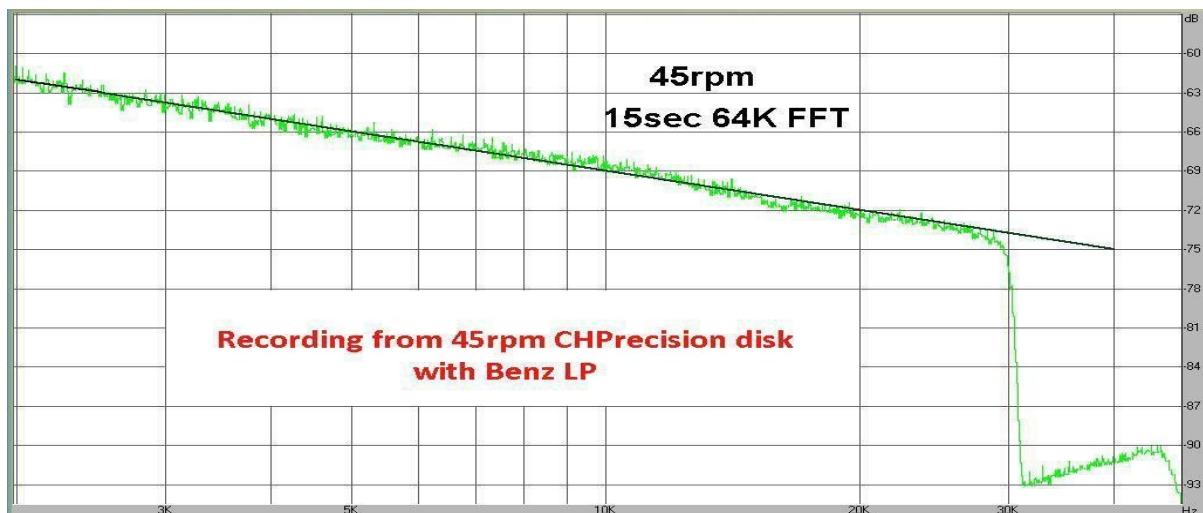


Рисунок 2. Проверка сигнала Test на тестовом диске CHPrecision.

Для получения более наглядного представления о спектре записанный ФР был повернут в Audacity путем умножения его на повышающий наклон 10 дБ/дек, что облегчает его сравнение с ФР, генерируемым имитационной моделью генератора.

Первой измерялась корзина AT24 с изготовленным на заказ сапфировым кантилевером. Для усиления механических аномалий была выбрана модель с большей подвижной массой, чем у заводского картриджа.

На рисунке 3 фиолетовым цветом показаны ФР записи и ФР, смоделированные для Генератора, причем оба показателя в абсолютно одинаковом масштабе.

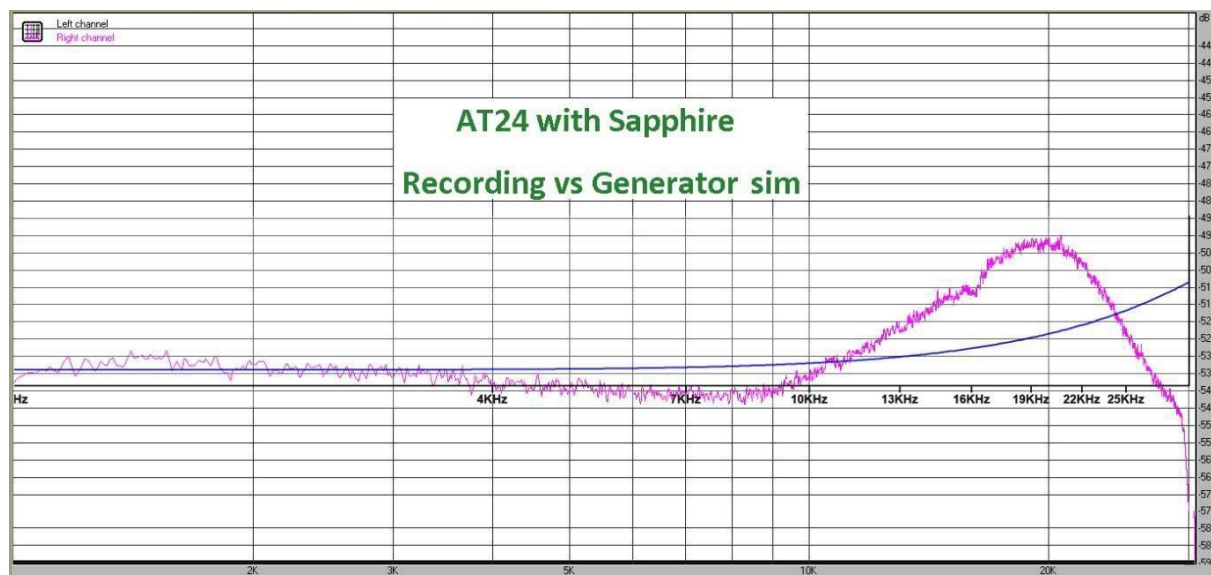


Рис. 3, записанные ФР с AT24 и смоделированные ФР для его генератора, оба для 48K5//192пФ.

Таким образом, поскольку консольный узел добавляет свою передаточную функцию, разница между двумя показателями должна быть вызвана ЦФ этого консольного узла.

### 3) Определение передаточной функции для консольного узла

Таким образом, чтобы получить передаточную функцию сборки, следующим шагом должно было стать вычитание обеих кривых - ФР генератора и ФР записи. Пренебрегая небольшим провалом на частоте около 16 кГц на рис. 2 и 3, который оказался связанным с диском, теперь можно было определить ЦФ для консолей до 30 кГц.

Теперь сделаем те же действия для AT22 со штатным бериллиевым кантилевером, а также для Denon DL-107 и Denon DL-109 и получим значения ФР для четырех консольных узлов.

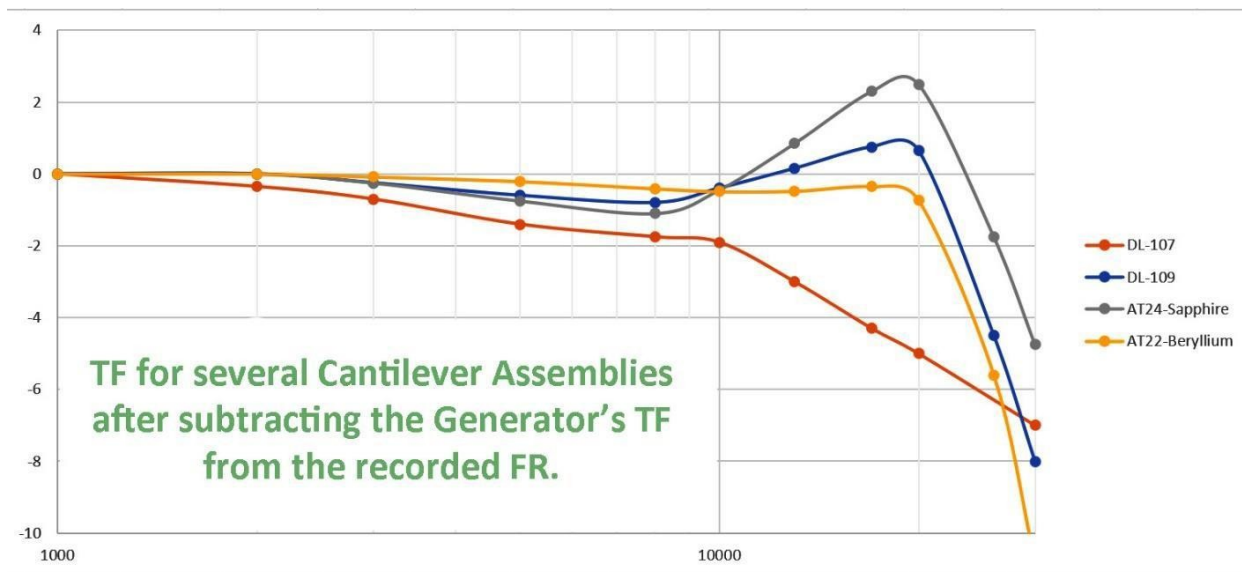


Рисунок 4. Частотная характеристика для четырех консольных узлов.

Отметим, что AT-22 - это высококлассный ММ конца 70-х годов, рассчитанный на легкие тонары, а DL-107 - это картридж для радиодиджеев, выпущенный в том же году, что и DL-103 MC, рассчитанный на тяжелые тонары и ограниченную частотную характеристику. Это позволило получить хороший разброс доступных конструкций при проведении всего нескольких тестов

### 4) Построение схемы замены консольного узла

На основе полученных данных можно построить электрическую аналогию, описывающую все четыре модели с одной и той же топологией, просто меняя значения компонентов.

Для того чтобы это было точно, необходимо учитывать несколько факторов.

- При повышении частоты на пластинке, записанной с помощью RIAA, скорость и ускорение увеличиваются для данного уровня входного сигнала. Это приводит к тому, что вмятина на пластинке становится более глубокой от силы ускорения в вогнутой или



толкающей части наконечника, в отличие от силы и вмятины выпуклой части синусоиды. Как следствие, наконечник не следует точно за центром трека, а отклоняется в зависимости от частоты и массы наконечника, *что проявляется в виде меньшей амплитуды.*

По-видимому, это и является причиной провалов, которые многие Carts показывают в своих TF.

от 5 КГц до 10 КГц.

На рисунке 5 ниже показан круглый наконечник щупа, расположенный в канавке, где в красном цвете сверху видны контактные площадки между наконечником и стенкой канавки.

Черная линия под наконечником - это путь, по которому должен двигаться наконечник, но из-за вдавливания упруго-выпуклой стенки под действием больших ускоряющих сил на очень маленькой контактной поверхности щуп фактически движется по красной пунктирной линии.

Благодаря такому сокращению Cart будет выдавать меньший сигнал, как и предполагалось.

С увеличением частоты площадь контакта из-за вдавливания будет быстро увеличиваться, уменьшая силу на единицу квадратной поверхности, что приведет к тому, что вдавливание прекратится с определенной частоты.

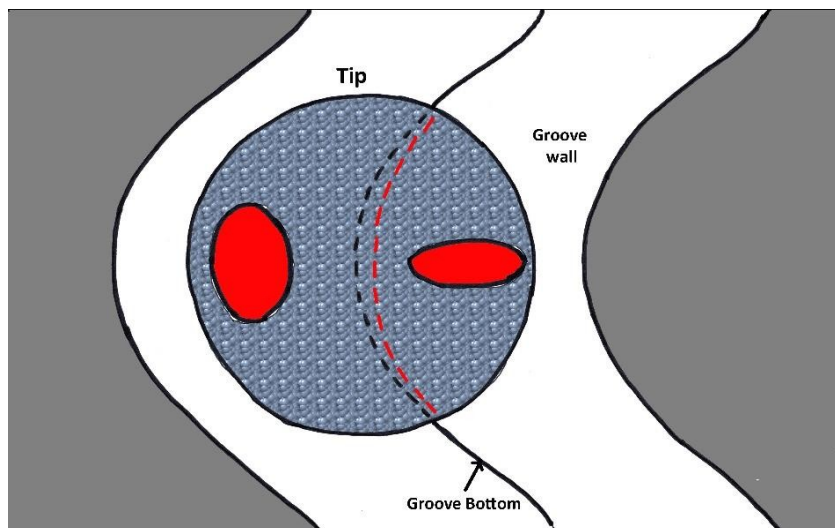


Рисунок 5, Сокращение пути, по которому движется наконечник из-за отступа

- b) При дальнейшем увеличении частоты резонанс между щупом и канавкой снова приводит к увеличению мощности Cart.

$$f_r = (0,632/\pi \sqrt{m}) * (E_0^2 F_{VR})^{1/6} \quad [4].$$

При этом  $m$  - эквивалентная масса наконечника.

$E_0$  - модуль Юнга,  $3,76e9 \text{ Н/м}^2$  для винила

$F_v$  - усилие на щупе, обычно 2 грамма

$R$  - радиус касания наконечником стенки дорожки.

Таким образом,  $f_r$  пропорционально  $F_v^{1/6}$ , чем больше сила на щупе, тем больше  $f_r$ , независимо от скорости движения.

- с) Затем существует третий механизм, называемый  $f_c$  - частота среза, при которой тележка не дает никакого выхода.

Представьте себе свободную массу, прикрепленную к пружине. При увеличении частоты возбуждения масса движется в одном направлении, а фазовый сдвиг становится все больше и больше, вплоть до того, что масса перестает двигаться. Дальнейшее увеличение частоты приводит к тому, что масса начинает двигаться в противоположном направлении.

Именно это и происходит между виниловой "пружиной" и массой наконечника.

$$f_c = 1,51(V/\pi) * (E_0/F_{VR})^{1/3} \quad [4]$$

$V$  - скорость движения по трассе.

$f_c$  обратно пропорциональна  $F_v^{-1/3}$ , чем больше усилие на щупе, тем меньше  $f_c$ . Для  $f_c$  установлено на уровне 0,88

Из-за  $V$ ,  $f_c$  является динамическим параметром, зависящим от оборотов и положения на пластинке Vinyl.

В нашем тесте мы используем диск со скоростью вращения 45 об/мин и диаметром 16,5 см, в результате чего  $F_c$  для круглого наконечника диаметром 0,65 мил составляет 46 КГц. Чтобы показать огромную зависимость от оборотов и положения на пластинке для этого 0,65-миллиметрового наконечника, переходящего с 60 КГц на почти 20 КГц, см. ниже рисунок 5.

Для сравнения, для 5um наконечника Shibata можно умножить все значения  $f_c$  на 1,5.

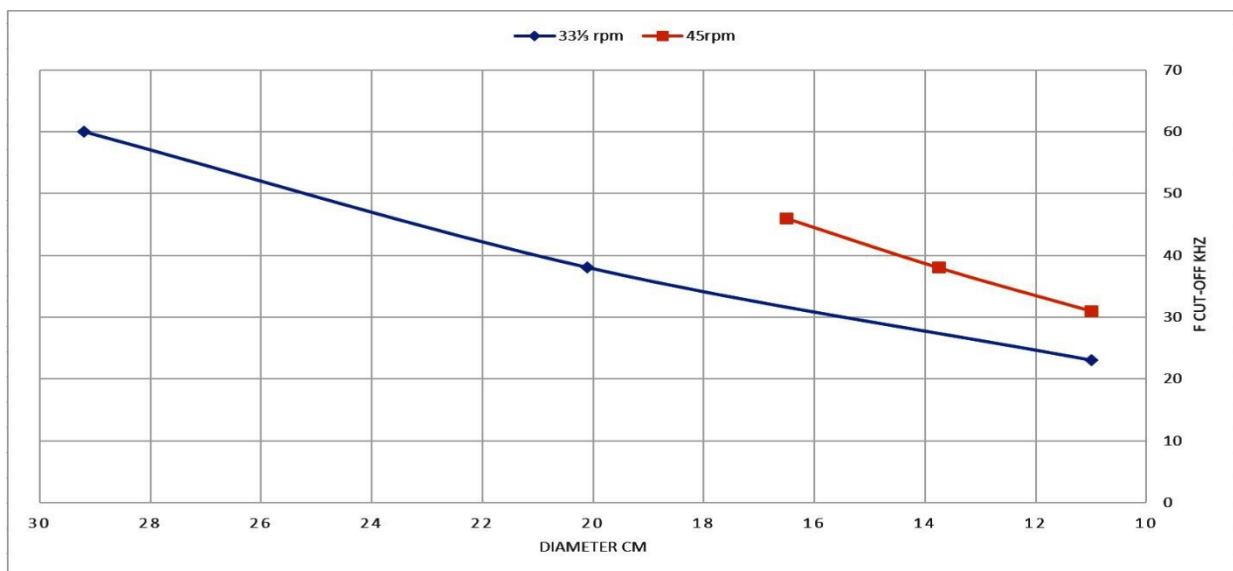


Рис. 6, Зависимость частоты среза от числа оборотов и положения для круглого наконечника диаметром 0,65 мм.

Складывая все вышеперечисленное, мы получаем общую модель замещения для консолей, генератора и заделки, как показано на рис. 7.

Существуют и другие модели, приведенные в работах [No], но ни одна из них не смогла полностью соответствовать испытанным тележкам с рисунка 3.

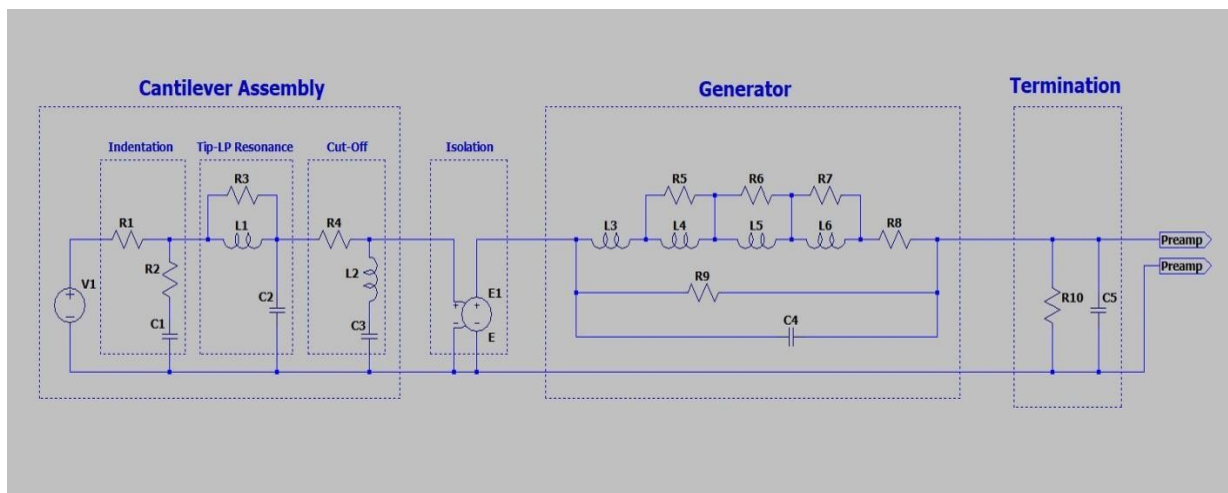


Рисунок 7, Типовая модель для системы Cart plus termination

Теперь введение нужных значений компонентов в эту общую схему замены AT24 с сапфировым кантилевером дает точно такой же общий ФР, как и записанный, просто потому, что он был построен таким образом путем вычитания ФР генератора из записанного ФР. При использовании эллиптического наконечника диаметром 0,24 мм  $f_c$  составила 64 КГц в используемом положении на пластинке 45 об/мин.

В результате получается приведенная ниже схема.

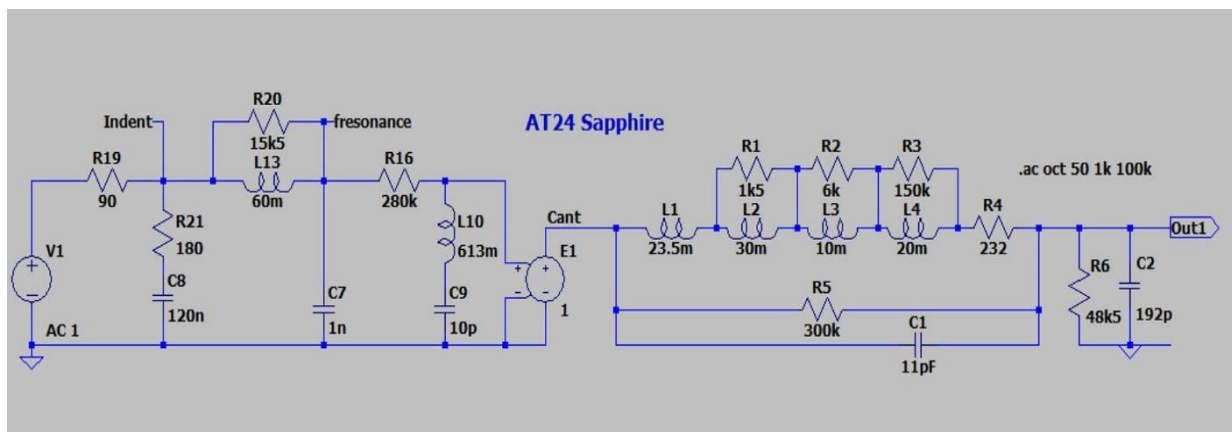


Рисунок 8, Принципиальная схема AT24 с сапфировым кантилевером и эллиптическим

наконечником диаметром 0,24 мм

Ниже на рис. 9 показаны частотные характеристики: красным цветом - вдавливание пластинки, синим - резонанс наконечника, зеленым - отсечка, а тилловым - результирующая общая характеристика.

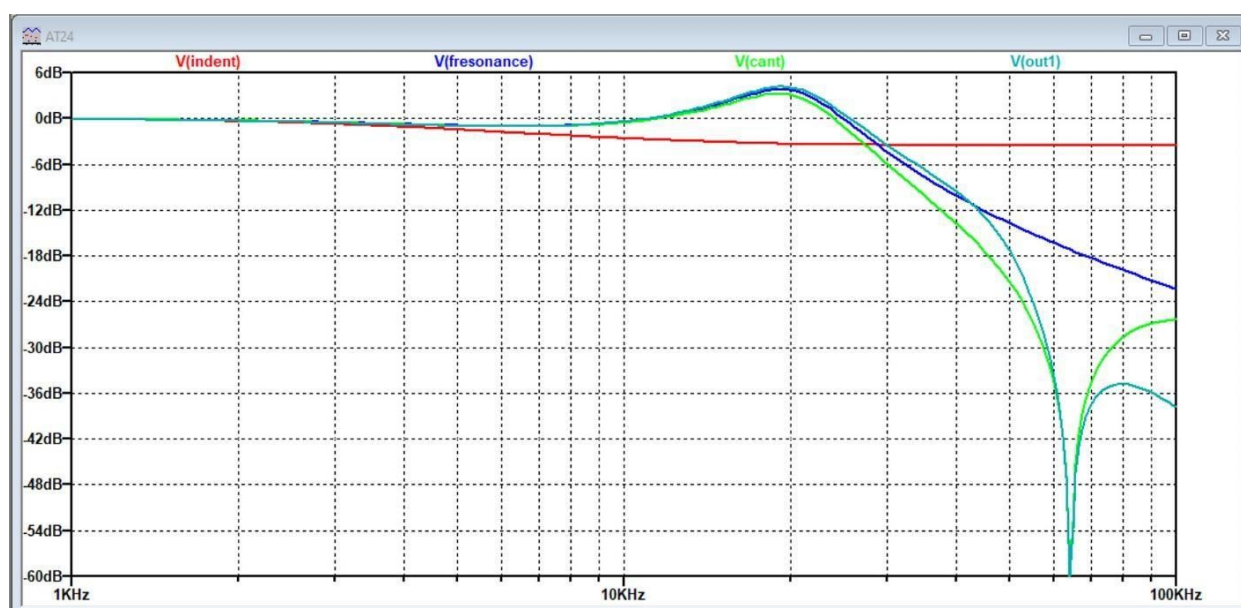


Рисунок 9, Частотные характеристики в различных точках от принципиальной схемы AT24-Sapphires

Для проверки тезиса о том, что консоль не видит генератор из-за очень слабой связи, была записана другая нагрузка 7K1 вместо 48K5 и одновременно смоделирована полная схема замещения в LTSpice.

Результат, полученный при проецировании различных кривых в одном изображении друг на друга, прекрасно подтверждает тезис, приведенный на рис. 10. Таким образом, электрическая модель с двумя независимыми принципиальными схемами для сборки корзины и генератора может успешно прогнозировать ФР со всеми видами оконечной нагрузки.

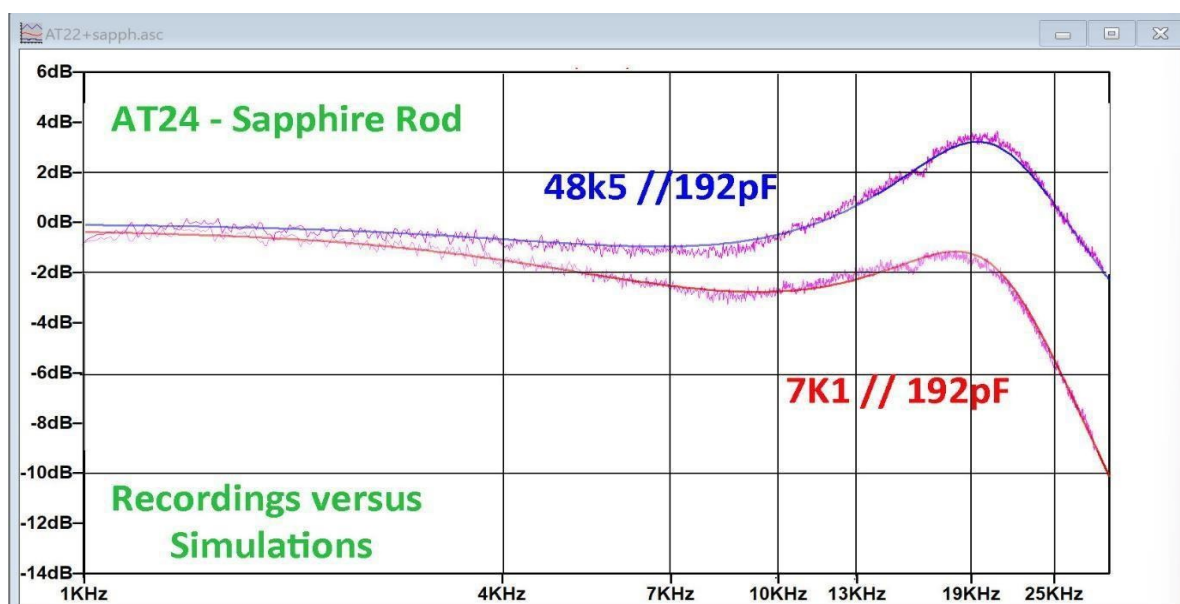


Рис. 10, Зарегистрированные и смоделированные ФР для двух очень разных ситуаций нагрузки

А вот результаты для двух других карт, выполняющих те же тесты, сравнивая записи с диаграммой замещения LTSpice, для AT22 с бериллиевым кантилевером ATN23 и наконечником Shibata 6um, и для AT150 с бериллиевым кантилевером ATN152 и наконечником Shibata 5um, имеющих два совершенно разных генератора.

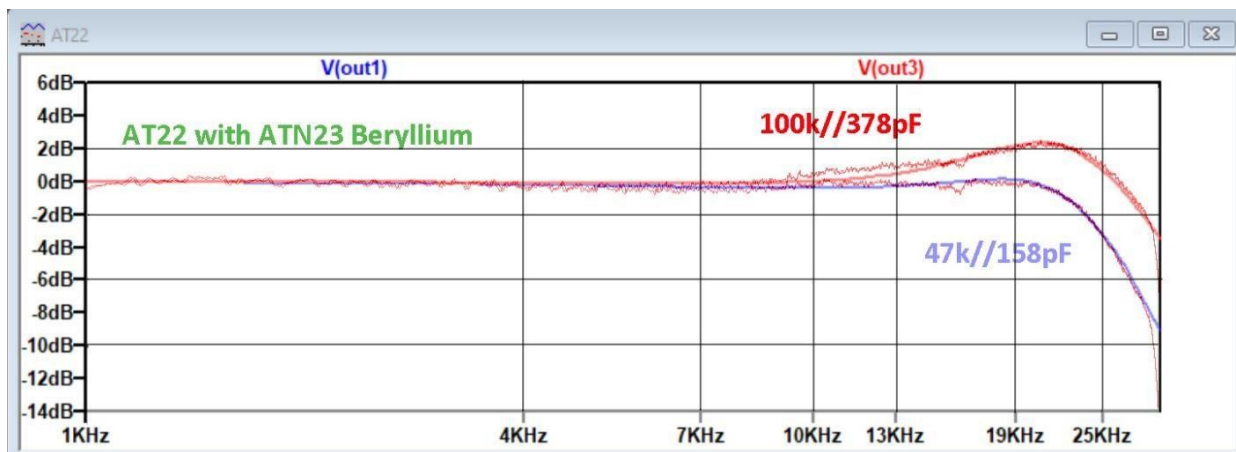


Рис. 11. Сравнение записи с моделированием для AT22 с консолью ATN23

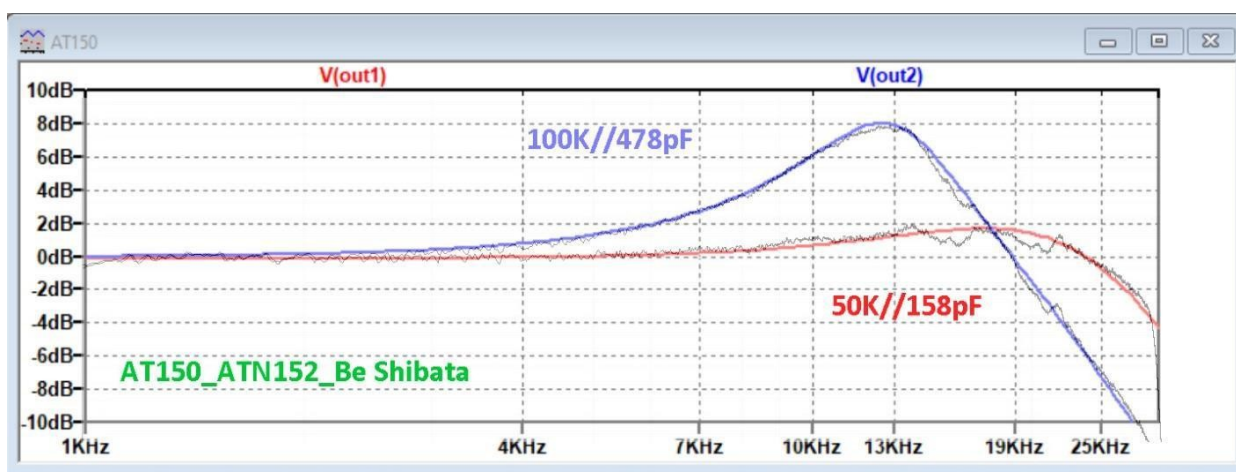


Рисунок 12, Сравнение записи с моделированием для AT150 с консолью ATN152

Несмотря на ограниченное число испытаний, совпадение результатов моделирования и измерений достаточно близко, что позволяет сделать вывод о том, что генераторы и кантилевер изолированы и не могут напрямую влиять друг на друга. Это также означает, что постоянный ток, проходящий через корзину, никак не повлияет на поведение кантилевера, как это иногда упоминается, и демпфирование кантилевера за счет нагрузки не может работать



## 5) Оконечная нагрузка на Cart значительно меньше 47K (Damped Loading)

На рис. 1, правый верхний угол, смоделирован FR с альтернативной нагрузкой, в данном случае вызывающей 75 мксек полюса с  $L_{cart}$  плюс  $R_{cart}$ . Можно использовать любую нагрузку  $R_{кар}$ , но использование нагрузки, создающей этот 75 мксек полюс, имеет то преимущество, что ТЗ из сети R1aа может быть отключен, сохраняя предусилитель R1aа доступным для полного использования R1aа при повторном включении. Режим демпфированной нагрузки или обычный режим R1aа - одним щелчком переключателя. В приведенных ниже симуляторах, применяющих этот 75 мксек-полюс, ТЗ в усилителе R1aа отключен.

При использовании простой модели Cart, состоящей только из  $L_{cart}$  и  $R_{cart}$ , создается впечатление, что FR в значительной степени расширен, главным образом потому, что емкостная нагрузка, включенная параллельно  $R_{load}$ , вносит значительно меньший вклад.

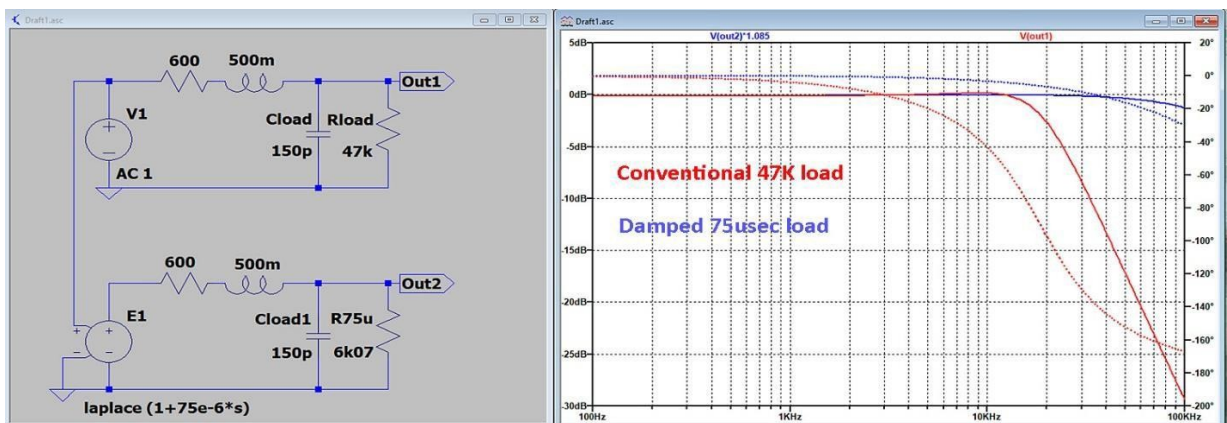


Рисунок 13, Влияние затухающей нагрузки 75usec на простую модель тележки

При более подробной схеме, приведенной на рис. 1, это расширение FR все еще очень заметно, хотя в этом случае для выравнивания FR необходимо добавить еще один полюс.

Но теперь, когда у нас есть полная принципиальная схема консольного плюсового генератора, можно посмотреть на общую FR

Первая корзина для использования - AT24 с сапфировым кантилевером по схеме замены рис. 8. Поскольку очень низкая  $L_{карт}$  83,5мH и  $R_{карт}$  232R, то для полюса 75мкс нам потребуется  $R_{нагрузки}=880R$ .

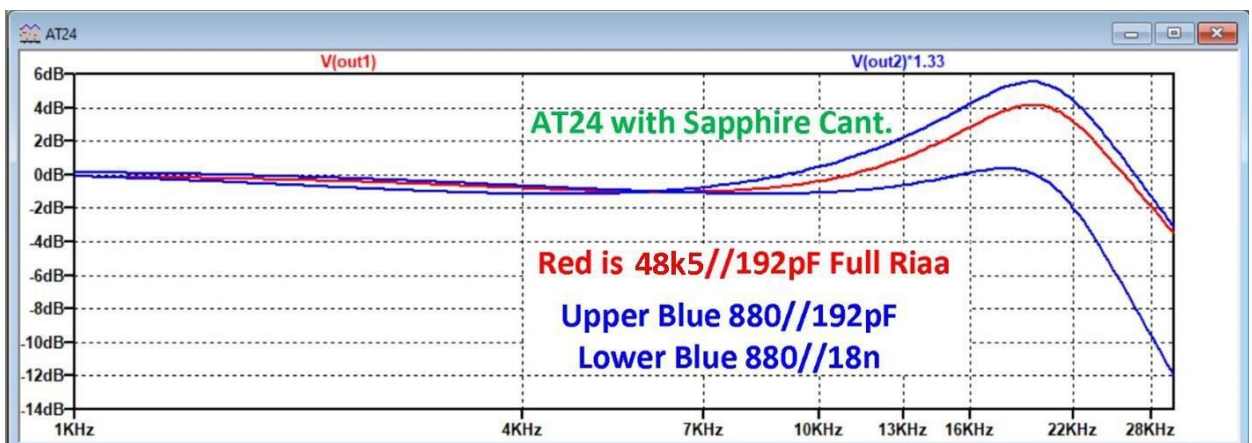


Рисунок 14, Загрузка корзины полюсом 75 мксек против полного R<sub>iaa</sub>  
48K5//192pF

Если просто применить этот полюс 75 мксек, то резонансный пик на частоте 20 КГц даже увеличился на 1,5 дБ без какого-либо дальнейшего улучшения, в то время как выходной сигнал уменьшился на 2,5 дБ, просто из-за добавленной нагрузки 880R.

Для уменьшения резонанса параллельно Rload был добавлен 18нФ, создающий полюс 14 мкс. В результате этого отклик был несколько сглажен, хотя ФР не был расширен совсем, как это было в случае простой модели или только генератора. Этот генератор не очень хорошо подходит для демпфированной нагрузки.

Итак, попробуем использовать AT150 с ATN152 с рисунка 12.

Вот схема замены с  $f_c$  на 68 КГц для диска 45 об/мин диаметром 16,5 см.

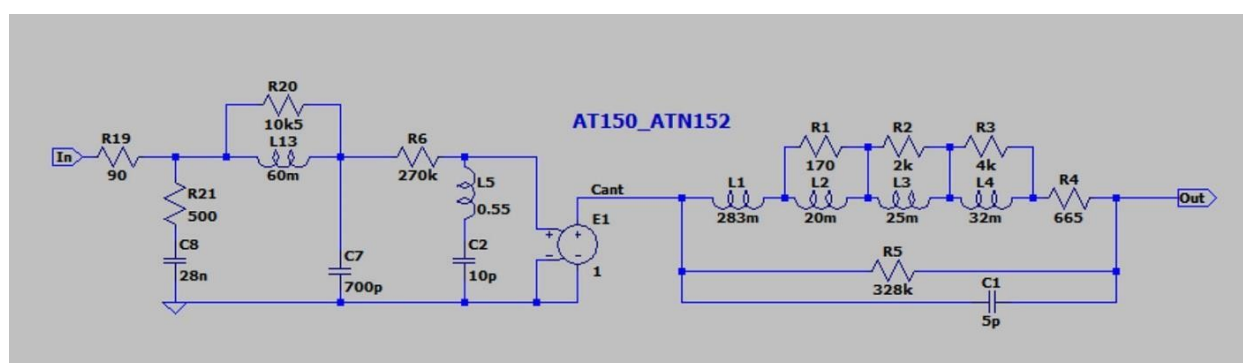


Рисунок 15, Схема замены AT150 с 5 мкм бериллиевым наконечником ATN152 Shibata.

Эта схема требует очень низкой емкостной нагрузки. В данном случае было использовано 100пФ, что уже является очень низким значением для межблочника, ТТ и предусилителя вместе, меньше - нереально.

При  $L_{cart} = 315\text{mH}$  и  $R_{cart} = 665\text{R}$  для нагрузки 75 мкс ожидалось бы сопротивление 3к5. Однако, увидев непосредственный результат в симуляторе, оказалось, что 3к7 - несколько лучший выбор.

Но, как и в случае с AT24, для выравнивания характеристики потребовался дополнительный полюс на 8 мксек, в данном случае 2н2.

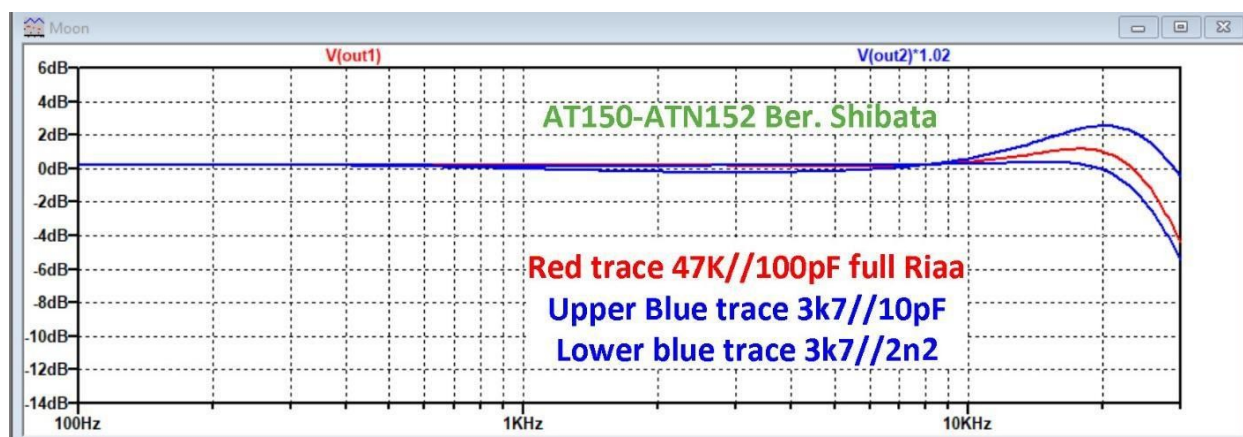


Рис. 16. Нагрузка Cart полюсом 75 мксек против полного R1aa

47k//100pF

Заметно еще одно обстоятельство: Провал на частоте 5 КГц может быть поднят при демпфировании резонанса на частоте 20 КГц. Это происходит не только при добавлении конденсатора 2н2, но и в полной версии R1aа при использовании 100пФ, хотя на рис. 14 эта часть Indent, состоящая из R19, R21 и C8, справляется со своей задачей.

Но в итоге влияние полюса 75 мксек снова не расширяет FR, как ожидалось из простой модели на рис. 13.

Последнее, что можно было сравнить между обеими версиями окончания, - это импульсная характеристика. В упрощенном варианте Lcart и Rcart импульсная характеристика значительно лучше, хотя это не означает автоматического улучшения звучания.

Однако, если применить квадратичную волну к полной схеме замещения, то ситуация снова отличается от ожидаемой.

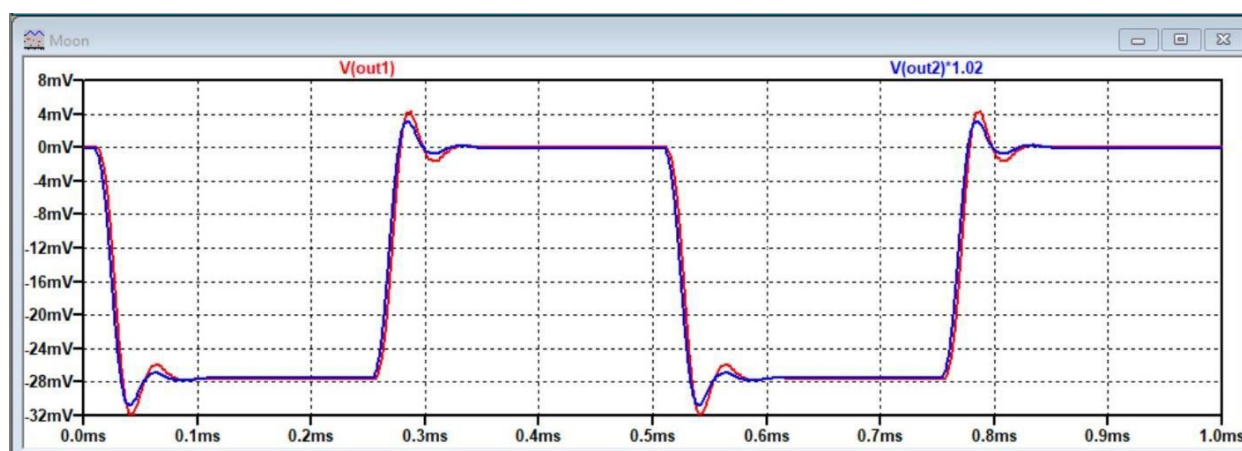


Рисунок 17, Квадратная волна на AT150\_ATN152 с полным R1aа 47k//100p и минусом ТЗ 3K7//2n2

Едва ли можно найти какие-либо преимущества для нагрузки на полюс 75 мксек, показанной синим цветом, по сравнению с вариантом с полным R1aа 47K//100pF, показанным красным цветом.

Для ряда различных тележек эти испытания были повторены, но результаты оказались совсем не обнадеживающими в отношении использования этого типа загрузки.

По крайней мере, во всех случаях приходилось добавлять дополнительный полюс в виде конденсатора параллельно Rload.

При меньшем Rload произойдут две дополнительные вещи: I) уменьшится коэффициент усиления и II) как прямое следствие - уменьшится отношение сигнал/шум.

Однако в настоящее время существует достаточное количество малошумящих оп-ампов, которые позволяют поддерживать

S/N на приемлемом уровне, при этом шум остается достаточно низким, ниже поверхностного шума ЛП. Поэтому использование электрического "охлаждения" для улучшения S/N только усложняет ситуацию. В среднем можно ожидать потерь в 3 дБ на S/N при использовании нагрузочного столба 75 мкс.

Отсюда следует вывод, что демпфированная нагрузка, как, например, в топологиях Aurak и Vinyltrak [6], выгодна только в очень частных случаях и должна использоваться с большой осторожностью. Простые модели, обещающие расширенный FR, в реальности не работают. И, как мы убедились, электрический спад почти всегда хорошо контролируется с помощью

47K, где очень важная мощность нагрузки должна быть выбрана для получения максимально плоского FR.

#### 6) Сравнение модели, представленной в данной работе, с другой моделью.

Теперь вернемся к часто цитируемой модели, используемой, в частности, ван Мааненом [2] и ван Раалте [3], в которой предполагается, что консольная система, в данном случае Stanton 681EE, резонирует с высокой добротностью, что приводит к пику почти 13 дБ, и что этот пик должен быть устранен с помощью генератора с гораздо более узким FR. Результат работы обеих систем показан на рис. 18 ниже.

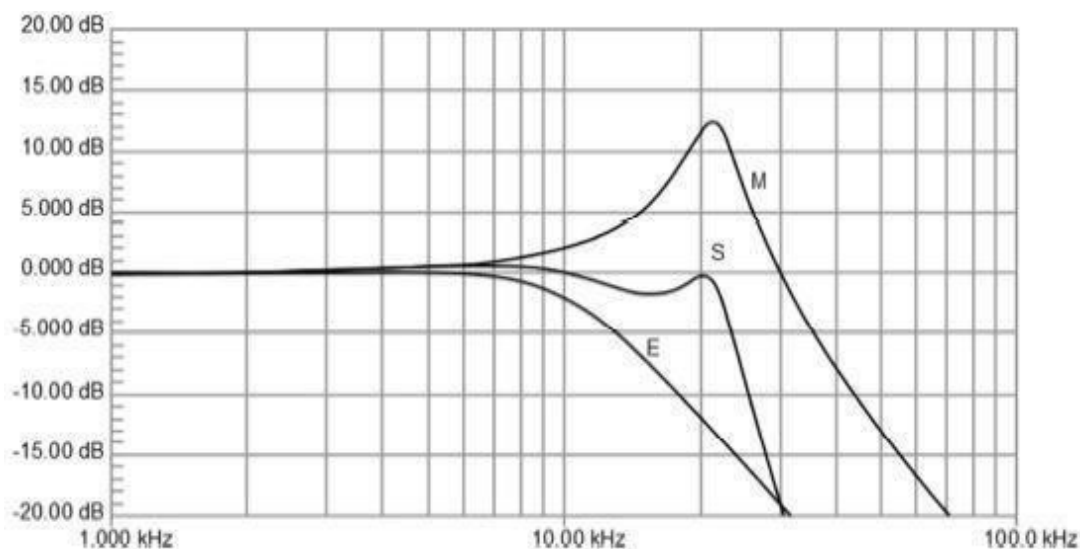


Рис. 18. Одна из моделей, циркулирующих в звуковой среде.

Если посмотреть на рис. 3 и рис. 4, то все наоборот, резонансный пик узла наконечник/кантилевер находится на гораздо более низком уровне, в случае этих четырех Карт между +2 дБ и -2 дБ, а генератор имеет ФР, превышающий ФР кантилевера, вместо того, чтобы быть более узким.

Но, как видно из рисунка 7, даже для Denon DL-107 с высоким уровнем демпфирования все сборки будут иметь резонанс, вызванный L1 и C2, затухающий с помощью R3. Для самого высокого и самого низкого уровня  $F_{res}$  тестируемых тележек эти резонансные частоты находятся на соответствующих значениях:

AT24-Sapphire 19,35 кГц

DL-107 8,43 кГц.

Собственно говоря, это не относится к данной статье, но индентирование, LP-резонанс и отсечка могут наблюдаться и у MC-картриджей.

## 7) Дальнейшие направления исследований

Мы считаем, что в данной работе создана новая, более точная модель для анализа поведения картриджа, однако было бы неплохо рассмотреть некоторые аспекты более детально, если удастся разработать необходимую методику тестирования.

Во-первых, мы использовали модель резонанса щупа и винила. В ФР кантилевера учитывается вклад стержня кантилевера. Поскольку у нас есть несколько сравниваемых картриджей с различными материалами стержней - от алюминия до бериллия.

Было бы неплохо, если бы мы могли подтвердить, что различные материалы стержней оказывают влияние на общий FR.

Во-вторых, нам пока не удалось подтвердить используемую модель для  $F_c$ . Это можно проверить, если иметь несколько одинаковых кантилеверов с наконечниками разного размера и примеры таких же щупов на разных материалах кантилевера.

## 8) Использованная литература:

<sup>1</sup> [Эквивалентная схема фонокартриджа \(pspatialaudio.com\)](http://pspatialaudio.com)

<sup>2</sup> H.R.E. van Maanen, "Compensatie van Mechanische Resonantie bij Pick-up Elementen", Radio Elektronica 79, 15/16, pp. 25-29 и 17, pp. 35-41 (1979), на голландском языке. (скачать: <http://www.temporalcoherence.nl/docs/MERK1979.pdf>)

<sup>3</sup> Коррекция отклика преобразователя с помощью фильтра с обратным резонансом Биквадратный фильтр на основе топологии фильтра Саллена-Кея Стивена ван Раалте, опубликованный в журнале Linear Audio.

<sup>4</sup> Факторы, влияющие на соотношение стилуса и канавки в системах воспроизведения фонограмм К. Р. Бастианс. Доклад AES.

<sup>5</sup> Эквивалентная масса, факт или вымысел. Аудио, март 78. Роджер Андерсон, Shure Brothers Inc.

<sup>6</sup> VinylTrak - полнофункциональный ММ/МС фонокорректор, Боб Корделл, линейное аудио том 4