

# Метод измерения добавочной массы для оценки параметров преобразователя

ДЖЕФФ КЭНДИ, член AES

*Пьетра, Сан-Диего, Калифорния 92126*

КЛАУС ФУТТРУП, член AES

*SEAS Fabrikker AS, Норвегия*

Мы представляем методику измерения преобразователей с помощью метода *двойной добавочной массы*, чтобы извлечь из полного импеданса импеданс движения  $ZM(\omega)$  и коэффициент силы  $Bf$ . Эта методика подходит для определения подвижной массы и податливости для моделей импеданса движения, включающих вязкоупругость и частотно-зависимое демпфирование по кривой и применим к классическим преобразователям, для которых добавление массы к движущимся частям возможно без внесения значительных артефактов. Кроме того, мы обсуждаем методы оценки качества результатов. Наконец, качество предложенной методики измерения проверяется с помощью анализа измерительной системы ANOVA Gage R&R.

## 0 ВВЕДЕНИЕ

Традиционным и простым методом оценки параметров громкоговорителя является хорошо известный метод *добавленной массы*. То есть, добавив к диффузору известную массу и сравнив импеданс с невзвешенным импедансом, можно получить достаточную информацию для определения требуемых электромеханических параметров. В последние десятилетия применялись альтернативные подходы с использованием лазера: либо доплеровский лазер, определяющий скорость [1], либо триангуляционный лазер, определяющий положение диффузора громкоговорителя [2]. Подход с добавленной массой все еще используется, когда лазер недоступен, например, при изготовлении динамиков любителями. В данной работе мы предлагаем подход, который использует две известные добавочные массы и исключительно измерения электрического импеданса для определения импеданса движения. Этот новый подход способен определить силу двигателя,  $Bf$ , и движущуюся массу,  $M_{MS}$ , с большей точностью, чем классический метод добавочной массы. Более того, импеданс движения может быть аналитически

изолирован, что делает новый метод особенно хорошо подходящим для подгонки кривых к модели с единичными параметрами для идентификации вязкоупругих свойств. При соблюдении достаточной осторожности метод может предложить многие из преимуществ точности лазера без затрат или, по крайней мере, обеспечить альтернативный метод для расчета высокоточной подгонки электромеханических параметров.

Представленная нами новая техника была мотивирована тем, что

Появление современных моделей с единичными параметрами, которые про...

дать некоторое описание вязкоупругих свойств подвеса громкоговорителя. Оглядываясь назад на историю преобразователей с подвижной катушкой, мы видим, что Олсон уже описал традиционную модель механической стороны громкоговорителя в терминах массы, сопротивления и податливости в своем труде "*Элементы акустической инженерии*" 1940 года [3]. Гораздо позже, в 1978 году, Брайан Эллиотт представил доклад AES, в котором выразил понимание того, что подвес громкоговорителя сделан из эластомеров и имеет признаки вязкоупругого гистерезиса [4]. В этой работе он ввел выражение "*частотно-зависимое демпфирование*". Наблюдение частотно-зависимого демпфирования в звуковом диапазоне частот напрямую связано с наличием вязкоупругости. Еще через 15 лет, в 1993 году, Кнудсен и Йенсен представили свою разработку LOG-модели [5], которая количественно оценивала *эффект* вязкоупругой *ползучести*. Разновидность модели LOG была принята Вольфгангом Клиппелем (около 2001 года) и с тех пор является своего рода промышленным стандартом де-факто. В последние годы появился ряд более новых моделей. Хотя обсуждение и сравнение этих новых моделей выходит за рамки данной работы, мы отмечаем, что они послужили мотивацией для настоящего анализа. С этой целью новый метод двойной добавленной массы составляет основу для всеобъемлющего протокола подбора импеданса, достаточно сложного, чтобы быть применимым к этим новым моделям с единичными параметрами.

**1.1 Измерение** полного (электрического) импеданса электродинамического преобразователя состоит из блокированного электр... кал плюс механоакустический вклад

$$Z(\omega) = Z_E + Z_M = Z_E + \frac{1}{i\omega C_{MES} + g(\omega)}. \quad (1)$$

В этом выражении  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота колебание, а  $f$  - частота в Гц. В классическом

В подходе Тиле/Смолла,  $g(\omega)$  содержит жесткость  $L_{CES}^2$  и демпфирование  $R_{ES} = (Bf)/R_{MS}$ , но в ген. equal формулировка эта часть может также включать вязкоупругость. Таким образом,  $g(\omega)$  является независимым от модели представлением жесткости и демпфирования. Единственное условие, которое в этой формулировке должно быть соблюдено, чтобы движущаяся масса  $M_{MS}$ , здесь представлен электрическим эквивалентом  $C_{MES}^2$   $M_{MS}/(Bf)^2$ , полностью определяется  $C_{MES}$  и не зависит от  $g$ . Это означает, что импеданс излучения (воздушная нагрузка) предполагается постоянной в интересующем нас диапазоне частот (см. Приложение А.1).

При подходе с двумя добавочными массами проводится три измерения импеданса драйвера:

1.  $Z^{(0)}$  Конус невзвешенный
2.  $Z^{(1)}$  Конус с добавочной массой  $m_1$  прикреплен.
3.  $Z^{(2)}$  Конус с добавочной массой  $m_2$  прикреплен.

Затем три измерения разлагаются в соответствии с формулой

$$Z^{(0)} = Z_M^{(0)} + Z_E, \quad (2)$$

$$Z^{(1)} = Z_M^{(1)} + Z_E, \quad (3)$$

$$Z^{(2)} = Z_M^{(2)} + Z_E, \quad (4)$$

где  $Z_E$  является инвариантным, и

$$Z^{(k)} = \frac{1}{i\omega C_k + g(\omega)}. \quad (5)$$

Вместо трех независимых  $C_k$ -значений, мы теперь используем тот факт, что мы добавляем известные массы:

$$C_0 = C, \quad (6)$$

$$C_1 = C + \Delta C_1, \quad (7)$$

$$C_2 = C + \Delta C_2. \quad (8)$$

С точки зрения добавленной массы, это:

$$\begin{aligned} & \quad (0) \quad (2) \quad \frac{i\omega\Delta C_2}{(i\omega C + g)(i\omega C_2 + g)} \\ & = Z_M - Z_M = \end{aligned} \quad (11)$$

В принципе, каждый  $\Delta Z$  не содержит компонента электрического импеданса,  $Z_E$ , поскольку он неизменен между измерениями. Поэтому каждый  $\Delta Z$  содержит вклад только от подвижного импеданса. Эти формулы зависят только от данных измерений и не зависят от подгонки к определенной модели соответствия. В терминах невзвешенного мотационного импеданса  $Z^{(0)}$  (который для краткости мы записываем как  $Z_M$ ) мы имеем

$$\Delta Z_1 = \frac{i\omega\Delta C_1 Z_M^2}{1 + i\omega\Delta C_1 Z_M + i\omega\Delta C_2 Z^2}, \quad (12)$$

$$\Delta Z_2 = \frac{M}{1 + i\omega\Delta C_2 Z_M}. \quad (13)$$

Они могут быть решены для  $\Delta C_1$  и  $\Delta C_2$ , соответственно, чтобы получить:

$$i\omega\Delta C_1 = \frac{\Delta Z_1}{Z^2 - Z_M \Delta Z_1}, \quad (14)$$

$$i\omega\Delta C_2 = \frac{\Delta Z_2}{Z_M^2 - Z_M \Delta Z_2}. \quad (15)$$

Для того чтобы метод двойной добавочной массы был действительным,  $\Delta C_1$  и  $\Delta C_2$ , определенные в уравнении (9), должны быть независимы от частоты. Если это условие выполняется, мы можем вывести выражение для свободного от модели двигательного импеданса:

$$\frac{\Delta C_2}{\Delta C_1} = \frac{\Delta Z_2 Z_M - \Delta Z_1}{\Delta Z_1 Z_M - \Delta Z_2} = \mu, \quad (16)$$

где  $\mu = m_2/m_1$ . Таким образом, мы приходим к ключевому результату, а именно к безмодельному движущемуся импедансу:

$$Z_{M*} = \frac{(1 - \mu)\Delta Z_1 \Delta Z_2}{\Delta Z_2 - \mu \Delta Z_1}. \quad (17)$$

Для ясности мы называем эту оценку подвижного импеданса  $Z_{M*}$ . Хотя  $Z_{M*}$  формально является хорошим приближением к истинному  $Z_M$  до тех пор, пока  $\Delta C_1$  не зависит от  $\omega$ , на практике точность  $Z_{M*}$  ограничена областью

где  $\Delta Z_1$  и  $\Delta Z_2$  не слишком малы. Пример расчета приведен на рис. 4 и показывает, что в действительности  $Z_{M*}$  является точным и должен использоваться только в окрестности  $\omega = \omega_s$ , где  $\omega_s$  - резонансная частота драйвера. Несмотря на это предостережение,

Есть два очевидных преимущества подхода с двойной добавленной массой. Во-первых, он полностью опирается на данные измерений без каких-либо модельных предположений о жесткости или демпфировании. Во-вторых, механический импеданс полностью изолирован, а  $Z_E$  удален из проблемы. В

дополнение к  $Z_E$ , выходной импеданс усилителя

$$\Delta C_1 = \frac{m_1}{(Bf)^2} \quad \text{и} \quad \Delta C_2 = \frac{m_2}{(Bf)^2} \quad (9)$$

Исходя из этого, можно извлечь чистый импеданс движения. Сначала из данных удаляется электрическое сопротивление,  $Z_E$ , которое остается неизменным во время операций с добавленной массой, путем вычисления следующих разностей

$$\begin{aligned} \Delta Z_1^* &= Z^{(0)} - Z^{(1)} \\ &= Z^{(0)} - Z^{(1)} = \frac{i\omega \Delta C_1}{(i\omega C + g)(i\omega C_1 + g)}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\Delta Z_2^* = Z^{(0)} - Z^{(2)}$$

(т.е. генератор

импеданс  $R_g$ ), импеданс кабеля и последовательный резистор (датчик кур-рента) измерительного оборудования являются повторными.

перенесено из задачи. Заметим, что с помощью этого результата мы можем оценить резонансную частоту механической системы как

$$\omega_s = \operatorname{argmax}(|Z_{M*}|) = 2\pi f_s. \quad (18)$$

В данной работе было проведено точное определение резонансного фр...

частота, основанная исключительно на данных, не является необходимой постольку, поскольку она

будет выведена из подвижных параметров, которые будут определены в последующих разделах. Мы также отмечаем, что

резонансная частота, определенная в уравнении (18), не полностью совпадает с точкой  $\text{Im } Z_{M*} = 0$  из-за зависимости эффективного демпфирования от частоты (т.е.

действительная часть  $g$ ). Таким образом, существует потенциальная неоднозначность в определении  $\omega_s$  в вязкоупругих системах.

Для обеспечения заметного сдвига резонансной частоты и, таким образом, определения вязкоупругих свойств с достаточной точностью, мы обычно рекомендуем, чтобы  $m_2$  был близок к нулю. к движущейся массе преобразователя, и что  $m_1$  приблизительно равно примерно половину движущейся массы. Эти варианты дадут сдвиг резонансной частоты  $\omega_s$  примерно на 40% и 20% соответственно.

## 1.2 Оценка $Bf$

Исходя из уравнений (9) и (14),  $Bf$  рассчитывается как

$$(Bf)_{\text{Re}}^2 = \frac{m_1}{\Delta Z_1} = m_1 \frac{i\omega Z_{M*} (Z_{M*} - \Delta Z_1)}{\Delta Z_1 \omega}, \quad (19)$$

где угловые скобки обозначают среднее значение. Для каждой точки измерения частоты может быть получено значение  $Bf$ , и, следовательно, можно построить кривую  $Bf(\omega)$ . Пример такой кривой показан на рис. 5. Конечно,  $Bf$  в модели не изменяется с частотой, поэтому остается выбрать подходящий диапазон частот для среднего значения в уравнении (19). Мы

рекомендуем  $\omega_1 = 0.8\omega_s$  и  $\omega_2 = 1.2\omega_s$ , где  $\omega_s$  является де- определяется уравнением 18. Чтобы среднее значение было значимым, необходимо найти плоский участок измерения хороши, это происходит волизи кривой  $Bf(\omega)$ . Как правило, при условии

резонансная частота динамика в свободном воздухе. В этом случае  $Bf$  может быть определена без каких-либо модельных предположений относительно  $g(\omega)$ .

Точное определение  $Bf$  имеет решающее значение для успеха метода добавленной массы и гарантирует, что мы сможем надежно преобразовать параметры из механической области в электрическую.

## 1.3 Оценка $M_{MS}$

В этом разделе мы опишем метод, позволяющий движущейся массы  $M_{MS}$ , вместе с другими параметрами подгонки движения, из данных о движении  $(Z_{M*})_j$ . Для этого нам необходимо выбрать конкретную модель с единичными параметрами. В дальнейшем все подходящие результаты тестирования будут основаны на модели соответствия LOG

[5] для импеданса движения

$$Z_{M*} = \frac{1}{R_0 + i\omega L_0'} \quad (20)$$

где  $\sigma$  - комплексный коэффициент, описывающий

где для краткости мы определили  $a = \frac{1}{C_{MES}}$ ,  $b = 1/R_0$  и  $c = 1/L_0$ . Эта простая форма подразумевает, что мы можем найти коэффициентное решение линейным методом наименьших квадратов. Для этого для этого мы определяем функционал ошибки (квадратичную норму остатка)

$$\epsilon_B(a, b, c) = \sum_j \left( b - \frac{\sigma_I(\omega_j)}{\omega_j} c - \text{Re} Y_j \right)^2 \quad (23)$$

$$+ \left( \frac{\sigma_R(\omega_j)}{\omega_j} c - \text{Im} Y_j \right)^2, \quad (24)$$

где

$$Y_j = \frac{1}{(Z_{M*})_j} \quad (25)$$

является мотационным сопротивлением. Здесь  $\sigma_R = \text{Re}$   $\sigma_I =$

$\text{Im } \sigma$ . Переменная суммирования  $j$  обозначает подходящую подобласть частотного диапазона. Для ~~Внадании~~ работе мы выбираем значения  $j$ , для которых  $0.8\omega_s < \omega_j < 1.2\omega_s$ . Если взять частные производные от  $\epsilon$  по  $a$ ,  $b$  и  $c$ , то получатся следующие линейные уравнения для минимальной нормы остатка:

$$\begin{aligned} \sum_j \omega_j^2 &= 0 \\ \sum_j \sigma_R(\omega_j) &= a_0 \\ \sum_j \frac{1}{\omega_j} &= 0 \\ \sum_j \frac{\sigma_I(\omega_j)}{\omega_j} &= -\sum_j \frac{\sigma_I(\omega_j)}{\omega_j} b \\ \sum_j \frac{\sigma_R(\omega_j)}{\omega_j} &= \sum_j \frac{\sigma_I(\omega_j)}{\omega_j} \frac{2}{\omega_j^2} c \\ \sum_j \frac{\sigma_R(\omega_j)}{\omega_j} &= \sum_j \frac{\sigma_I(\omega_j)}{\omega_j} \frac{2}{\omega_j^2} c \\ \sum_j \omega_j &= \sum_j \text{Im} Y_j \\ \sum_j \text{Im} Y_j &= \sum_j \text{Re} Y_j \\ \sum_j \text{Re} Y_j &= \sum_j \frac{\text{Im} Y_j - \sigma_I \text{Re} Y_j}{\omega_j} \end{aligned} \quad (26)$$

Более точно,  $\epsilon_B[a_0(\beta), b_0(\beta), c_0(\beta)]$  представляет собой минимальный остаток при фиксированном  $\beta$ . Для нахождения истинного значения требуется дальнейшая одномерная минимизация  $\epsilon_B$  по  $\beta$ . минимум. Обозначим результат этой конечной минимизации как  $\beta_0$ , который может быть получен с помощью любого стандартного 1D схема минимизации. Затем, движущаяся масса задается вязкоупругую ползучесть и частотно-зависимое демпфирование

$$\sigma = \frac{1}{1 - \beta \ln(i\omega)} . \quad (21)$$

Заметим, что традиционная форма Тиле-Смолла получается при установке  $\beta = 0$  так, что  $\sigma = 1$ . Если на мгновение считать, что значение  $\beta$  известно, то можно написать линейное уравнение для параметров движения,

$$\frac{1}{ZM} = i\omega a + b + \frac{i\sigma(\omega)}{\omega} c , \quad (22)$$

\*

$M_{MS} = (Bf)^2 a_0 (\beta_0)$ . Этот процесс подгонки также определяет эффективное сопротивление  $R_0$  и податливость  $L_0$ , а также параметр ползучести  $\beta$ .

Для ясности повторим, что для данного  $\beta$ , входами в уравнение (26) являются  $Y_j$  и частоты  $\omega_j$ , а выходами -  $C_{MES}$ ,  $R_0$  и  $L_0$ . Мы используем  $\beta$  для вязкоупругости, выраженное с помощью натурального логарифма, но его можно легко преобразовать в классические значения  $\lambda$ , используя представление LOG в виде базы-10, как подробно описано в Приложении А.4.

#### 1.4 Эквивалент $R_{ES}$ и $L_{CES}$

Представляет определенный интерес определение эквивалентных значений для  $R_{ES}$  и  $L_{CES}$  в модели LOG, которые можно сравнить с

традиционные параметры Тиле-Смолла. Хотя корреляция не является однозначной, простой подход к методу заключается в том, чтобы задать

$$g(\omega) = \frac{1}{R_{ES}} + \frac{1}{i\omega s L C E S} \quad (27)$$

Затем, некоторые алгебры показывают, что

$$\frac{1}{L C E S} = \frac{1}{L_0} \frac{1 - \beta \ln(\omega_s)}{(1 - \beta \ln \omega_s)^2 + (\pi \beta / 2)^2} \quad (28)$$

$$\frac{1}{R_{ES}} = \frac{1}{R_0} + \omega_s \frac{1}{L_0} \frac{1 - \beta \ln \omega_s}{(1 - \beta \ln \omega_s)^2 + (\pi \beta / 2)^2} \quad (29)$$

### 1.5 Проверка однородности массы

Мы предлагаем тип проверки согласованности, который может обеспечить критическую оценку качества данных. Во-первых, используя безмодельное сопротивление  $Z_{M*}$ , мы можем проверить соответствие массы... постоянство с использованием

$$m_{1*} = \operatorname{Re} \frac{(Bf)^2}{i\omega} \frac{\Delta Z_1}{Z_{M*} (Z_M^* - \Delta Z_1)} \quad (30)$$

Правая часть не зависит от  $\omega$ , если справедливо уравнение (1). Кроме того, поскольку мы подогнали  $Z_M$  к определенной модели для определения  $M_{MS}$ , можно использовать эту подгонку для расчета согласованности масс для добавленных масс  $m_1$  и  $m_2$ :

$$m_{fit} = \operatorname{Re} \frac{(Bf)^2}{i\omega} \frac{Z_{fit}(\Delta Z_1 - \Delta Z_1)}{Z_M^* - \Delta Z_1} \quad (31)$$

$$m_{fit} = \operatorname{Re} \frac{(Bf)^2}{i\omega} \frac{Z_{fit}(\Delta Z_2)}{Z_M^* - \Delta Z_2} \quad (32)$$

$$m_{fit} = \operatorname{Re} \frac{(Bf)^2}{i\omega} \frac{Z_{fit}(\Delta Z_2)}{Z_M^* - \Delta Z_2}$$

ММ

2017 года.

Правые части не зависят от  $\omega$ , если  $g(\omega)$  является хорошей моделью жесткости и демпфирования. Результаты могут

можно сравнить (например, построить график) относительно номинальных масс; то есть, можно построить графики  $m_{fit}^1 / m_1$  и  $m_{fit}^2 / m_2$  и сравнить с ними.

$m_{1/m1}^*$  для оценки диапазона частот около  $\omega_s$ , где данные являются хорошими. Примером такой массовой про показано на рис. 8.

## 2 ПРИМЕР АНАЛИЗА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для иллюстрации полной процедуры определения силы двигателя  $Bf$  и подвижной массы  $M_{MS}$ , мы проводим анализ для среднечастотного динамика SEAS L16RNX (H1488-08). Этот динамик,



Рис. 1. Мидвуфер SEAS L16RNX (H1488-08), установленный в стойку.

Для сбора данных импеданса используется оборудование Smith & Larson Woofer Tester Pro (WTPro), в котором используется опорный резистор 0,5 Ом в сочетании с внешним усилителем для измерения импеданса при желаемых уровнях напряжения/мощности. Здесь используется усилитель Benchmark AHB2, который имеет превосходное соотношение сигнал/шум и полосу пропускания. ширина, низкий выходной импеданс, и подходит для лабораторных исследований.

использования (с усовершенствованной защитой от перегрузки). WTPro калибруется, и калибровка сохраняется на ПК. Эта калибровка

тестирование проводилось один раз в начале тестового периода

который проходил с 30 ноября 2016 года по 11 февраля



зор и  
жным  
массы.  
гвуют  
ний в  
нным

в подставку, которую можно приобрести вместе с оборудованием Klippel Distortion Analyzer, чтобы надежно закрепить его на месте. Согласно предварительным измерениям линейных параметров уверенности (LPM) на системе Klippel DA1, L16RNX имеет  $M_{MS} \approx 15,3$  г и  $Bf \approx 7,14$  Гм.

Рис. 2. Мидвуфер SEAS L16RNX (H1488-08), установленный в стойку с дополнительной массой  $m_1$ .



## 2.1 Расчет $Z_{M*}$

Добавленные массы были согласованы с оценкой Клиппеля для  $M_{MS}$  путем выбора  $m_2$  16,048 г и  $m_1$  8,017 г. Они были тщательно измерены *апостериори* на прецизионных весах с разрешением 1 мг. Эти значения соответствуют нашим рекомендациям  $m_2$   $M_{MS}$  и  $m_1$   $M_{MS}/2$ . Массы смонтированы из 4 частей (представляющих  $m_2$ , как показано на рис. 3) так, что по диагонали можно удалить пару, а затем повторно измерить с помощью 2 частей (представляющих  $m_1$ , как показано на рис. 2). Эта процедура позволяет поддерживать баланс общей движущейся массы для предотвращения режимов качания. Массы

<sup>1</sup>Мы проверили, что тестер способен поддерживать хороший уровень S/N ниже 100 мВ.



Рис. 3. Мидвуфер SEAS L16RNX (H1488-08), установленный в стойку с дополнительной массой  $m_2$ .

Настройка, используемая в WTPro, представляет собой постоянный синусоидальный сигнал, который ступенчато ~~изменяется~~ 384 раза в диапазоне частот 10 Гц - 20 кГц, что дает достаточно высокую результативность (около 35 баллов на октаву) даже для слабо демпфированных динамиков. Выходное значение было выбрано приблизительно равным 242 мВ (WTPro отслеживает и показывает вольт-амперный диапазон от 237 мВ до 247 мВ в пределах измеренного диапазона частот). Мы понимаем, что это небольшое изменение напряжения корректируется и, таким образом, не влияет на работу устройства.

точность  $Z(\omega)$ . Обратите внимание, что при нагрузке 6 Ом такое значение напряжения эквивалентно примерно 10 мВ. Choos-

Выбор подходящего уровня питания для измерений обычно является компромиссом между хорошим соотношением сигнал/шум (что благоприятствует высокому напряжению) и низкой нелинейностью (что благоприятствует низкому напряжению). Выбрав напряжение 242 мВ, мы достигли хорошего компромисса между этими двумя параметрами, и полученные данные оказались одновременно малозумными<sup>1</sup> и свободными от значительных нелинейных эффектов. Хотя метод двойной добавленной массы может быть использован для сканирования при более высоких уровнях мощности, такой анализ выходит за рамки данной статьи.

далее поддерживаются в пределах около 1% друг от друга, а расположение каждой массы на диффузоре регистрируется индивидуально. Массы прикреплены к диффузору рядом с пылезащитным колпачком, чтобы обеспечить близкое расположение к звуковой катушке и минимизировать динамическую нагрузку на диффузор (т.е. минимизировать изгиб). Тщательность, с которой необходимо проводить измерения добавочной массы, хорошо известна в отрасли и, безусловно, применима к данному методу с двумя добавочными массами. В частности, важно избегать чрезмерного перемещения конуса, чтобы вязкоупругая суспензия не растягивалась между тремя измерениями импеданса. Это отрицательно скажется на податливости, особенно на низких частотах, из-за эффекта памяти. Это наиболее важно для динамиков с высоко вязкоупругим подвесом (например, Vifa P17WJ00-08) и менее важно для динамиков с менее вязкоупругим подвесом (например, L16RNX).

Измерения с 385 точками данных были повторно дискретизированы с помощью сплайн-интерполяции, так что в общей сложности 1200 точек данных были доступны для обработки и для обеспечения всех построенных кривых. являются гладкими. Метод повторной выборки кратко описан в Приложении А.2. Таким образом, мы измеряем  $Z^{(2)}$  (с  $m_2$ ), затем  $Z^{(1)}$  (с  $m_1$ ), и, наконец, невзвешенный драйвер для получения  $Z^{(0)}$ . С помощью этих измерений мы вычисляем  $\Delta Z_1$  и  $\Delta Z_2$ .

Затем, используя уравнение (17), мы вычисляем свободную от модели оценку  $Z_{M*}$  для импеданса движения. Три измерения вместе с рассчитанным  $Z_{M*}$  показаны на рис. 4. Из уравнения (18) мы находим  $f_s = 45,5$  Гц.

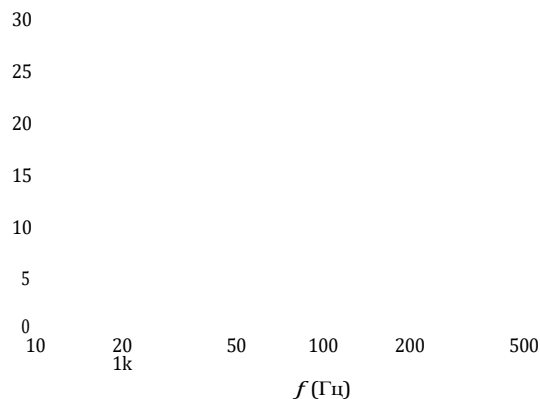
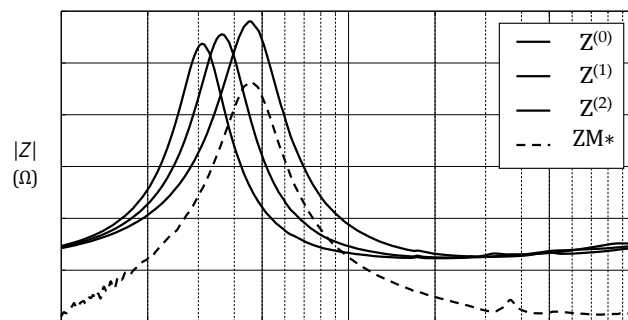


Рис. 4. Измерения импеданса  $Z^{(0)}$ ,  $Z^{(1)}$  и  $Z^{(2)}$ , и де-ривированный импеданс движения  $ZM$ . На рисунке показаны только величины. Обратите внимание, что  $ZM$  сформулирован таким образом, что он соответствует измерению в свободном воздухе,  $Z^{(0)}$ .

## 2.2 Расчет $Bf$

Далее, имея вычисленные данные для  $Z_{M*}$ , мы используем уравнение (19) для оценки  $Bf$ . Для усреднения мы установили  $\omega_1 = 0,8\omega_s$  и  $\omega_2 = 1,2\omega_s$ , где  $\omega_s = 2\pi f_s$ . Вычисленные среднее значение,  $Bf$  7.007, показано горизонтальной черной полосой.

линия на рис. 5, наложенная на частотно-зависимую функцию  $Bf(\omega)$ . Заштрихованная область обозначает область усреднения. Более детальный вид тех же данных приведен на рис. 6.



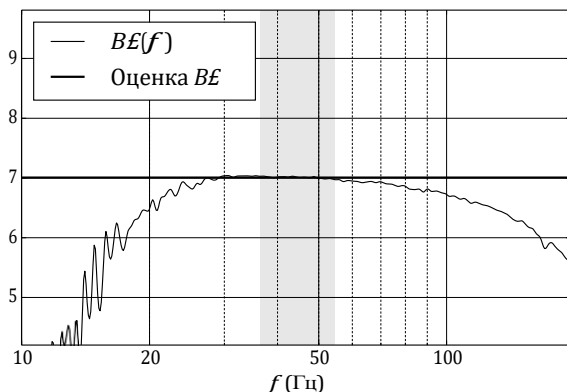


Рис. 5. Оценка  $Bf$  через среднее значение по диапазону подгонки (заштриховано)  
 $0,8 f_s \leq 1,2 f_s$ , где  $f_s = 45,5$  Гц. Горизонтальная черная линия обозначает среднее значение  $Bf = 7,007$ .

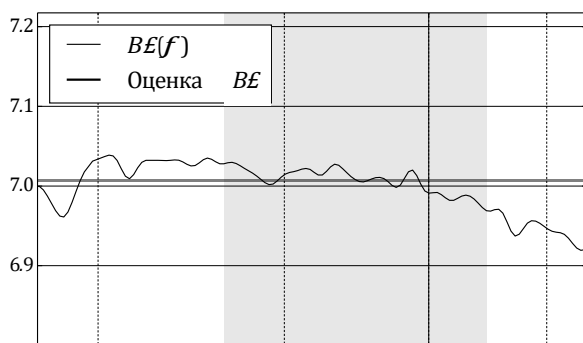
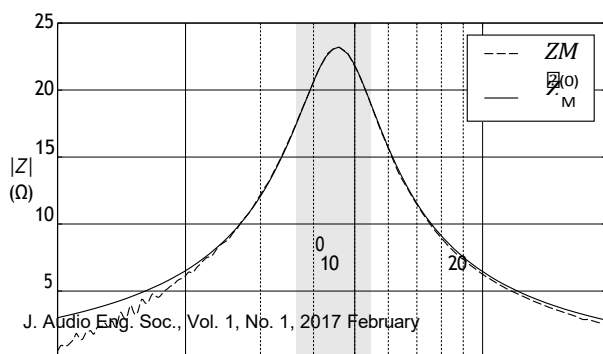


Рис. 6. Увеличенный вид предыдущего рисунка. Как и раньше, заштрихованная область указывает на окно усреднения, используемое для вычисления  $Bf$ .

### 2.3 Расчет $M_{MS}$



60,24 мН. Согласно формуле пересчета, они (приблизительно) соответствуют традиционным значениям Тиле-Смолла  $R_{ES} \diamond 23,2 \Omega$  и  $L_{CES} \diamond 40,8$  мН. Сравнение между подгонкой  $Z_M$  и оригинальной функцией без модели  $Z_{M*}$  показано на рис. 7. В заштрихованной области подгонки наблюдается исключительная точность. За пределами области подгонки может показаться, что подгонка плохая, но более разумная интерпретация заключается в том, что качество  $Z_{M*}$  - как мы уже неоднократно подчеркивали - быстро исчезает из окрестности резонанса.

### 2.4 Консистенция массы

Мы можем изучить качество нынешних результатов мы...

с помощью теста на согласованность масс, описанного в разделе 1.5. На рис. 8 показан расчет свободного от модели отношения масс  $m_1^{*1/m1}$ , а также зависящих от модели отношений масс. Последние являются

вычисленные с использованием  $Z^{\text{fit}}$  в соответствии с моделью LOG. Во всех случаях мы получаем широкий диапазон согласованности в окрестности  $f_s$ . Как мы

как уже отмечалось ранее, действительность  $Z_{M*}$  ограничена.

узкий диапазон частот около  $f_s$ , и это подтвердило на рисунке 8. Этот график также является сильным доказательством того, что модель LOG, соответствующая  $Z_M$ , является более точной, чем  $Z_{M*}$ , далекая от резонанса. Более конкретно, согласованность модели очень хорошая в широкой области (по крайней мере, до 100 Гц). С другой стороны, ниже  $f_s$ , согласованность масс не так хороша. Мы предполагаем, что это вызвано тем, что член  $i\omega C_k$  в уравнении (5) становится все меньше в низкочастотном диапазоне и, таким образом, более чувствителен к ошибкам в соответствии.

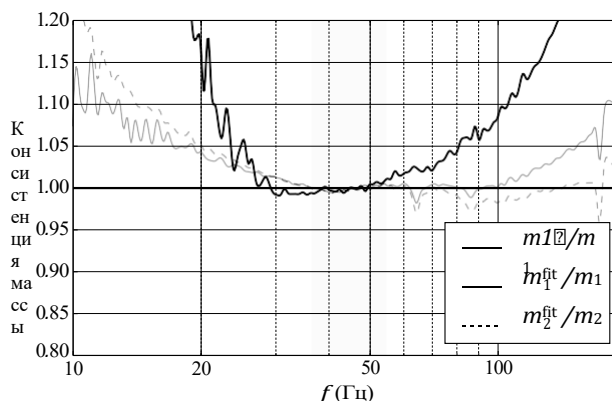


Рис. 8. Консистенция массы.

, предложенный в данной работе, заключается в проведении анализа измерительной системы (MSA). Обычно это делается в форме статистического анализа Gage R&R (например, ANOVA) для оценки

100

3 А  
Н  
А  
Л  
И  
З  
И  
З  
М  
Е  
Р  
И  
Т  
Е  
Л  
Ь  
Н  
Ы  
Х  
С  
И  
С  
Т  
Е  
М

К

Л  
а  
с  
с  
и  
ч  
е  
с  
к  
и  
й

м  
е  
т  
о  
д

о  
ц  
е  
н  
к  
и

к  
а  
ч  
е  
с  
т  
в  
а

п  
р

о  
ц  
е  
д  
у  
р  
ы

и  
з  
м  
е  
р  
е  
н  
и  
я  
,  
т  
а  
к  
о  
й

к  
а  
к

м  
е  
т  
о  
д

д  
в  
о  
й  
н  
о  
й

д  
о  
б  
а  
в  
л  
е  
н  
н  
о  
й

м  
а  
с  
с  
ы

Рис. 7. Сравнение  $3M_*$  с подгоночной функцией  $Z^{(0)}$ .  
Параметры подгонки были рассчитаны с помощью минимизации по методу наименьших квадратов уравнения (26) над заштрихованной областью.

Решая линейную систему в уравнении (26) на основе модели Knudsen LOG, определенной в уравнениях (20) и (21), находим

$M_{MS} \approx 15,05$  г. Решение системы линейных уравнений также дает  $\beta \approx 0,059$  при  $R_0 \approx 32,20 \Omega$  и  $L_0 \approx$ .

прецизионность (не точность) процедуры измерения. Во-первых, необходимо определить источники вариации (например, SWIPE):

- Стандарт
- Заготовка (вариант детали)
- Инструмент (манометр)
- Лицо/процедура (оценщик)
- Окружающая среда

*Стандартом* может быть калибровка оборудования, совместимость между тестируемым устройством (DUT) и прибором и так далее. Мы не отслеживаем и не оцениваем это. *Заготовка* требует, чтобы мы измерили более одного драйвера. Мы не отслеживаем это. *Инструмент* и *оценщик* - это то, что мы можем отслеживать, поскольку у нас 4 оценщика и в общей сложности 20 измерений. *Окружающая среда*, которая может включать атмосферные изменения, или вибрацию, или качество измерительного стенда, не отслеживается. Подробности см. на стр. 17 в статье [6]. [6].

В настоящем MSA мы решили не следовать строго стандартным процедурам и вместо этого измерить только один драйвер (т.е. одну деталь). Это решение отражает наш интерес к качеству предлагаемого метода в отношении повторяемости и воспроизводимости, а не в отношении вариации компонентов (как в производственных установках). Выбранный драйвер H1488-08 (L16RNX) является одновременно надежным и удобным. Под надежностью мы подразумеваем, что можно многократно применять  $m_1$  и  $m_2$  без значительного повреждения драйвера. На самом деле, во время тестирования алюминиевый диффузор был слегка помят, что не повлияло на результаты измерений. В отличие от этого, Blu-Task, нанесенный на бумажный диффузор, может легче повредить диффузор, разорвав волокна. Кроме того, подвес таков, что  $C_{MS}$  незначительно изменялся во время измерений. Под удобством мы подразумеваем, что динамик достаточно мал и легок, чтобы его можно было легко установить и снять с измерительной стойки. По этой причине L16 может представлять собой *лучший* сценарий, когда речь идет о стабилизации в MSA. Мы считаем, что это подходящий первый шаг. Выполнение MSA по наихудшему сценарию, хотя и может проиллюстрировать надежность процедуры измерения, является более сложной задачей, поскольку в анализе начинают преобладать причуды и сложные особенности водителя. Мы также отмечаем, что свойства подвески водителя могут меняться со временем, поскольку повторное наложение масс растягивает подвеску и тем самым изменяет  $C_{MS}$ . Однако это не влияет на наши оценки  $Bf$  и  $M_{MS}$ .

Четырем людям было предложено выполнить пять измерений каждый, таким образом, водитель был измерен 21 раз в течение дня. В основном, каждый день проводилось одно или иногда два измерения, и между каждым измерением оборудование выключалось и отсоединялось. После каждого измерения добавляемые массы измерялись повторно. Иногда, но не всегда, их заново обрабатывали новым Blu-Task. Поскольку массы измеряются каждый раз, статистический анализ отражает истинную статистическую вариацию. Одно полное измерение (включающее три импедансных развертки с регистрацией массы) занимает около 40-60 минут.

Тем, кто желает использовать предварительно разработанный метод двойного добавления массы, рекомендуется провести анализ Gage R&R на собственном оборудовании для проверки настройки измерений. В данном разделе представлены результаты анализа

ID	Дата Y-M-D	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$Bf$ (Tm)	$MMS$ (g)
A	16-11-30	8.017	16.048	7.007	15.05
A	17-01-20	8.910	17.865	7.065	15.18
B	17-01-26	8.909	17.868	7.047	15.18
B	17-01-30	8.904	17.865	6.999	15.00
B	17-02-01	8.960	17.862	6.999	14.97
C	17-02-01	8.419	17.862	6.679	13.06
A	17-02-01	9.028	18.028	7.025	15.11
A	17-02-02	9.032	18.032	6.998	14.97
B	17-02-02	9.029	18.028	7.075	15.22
B	17-02-03	9.032	18.033	6.878	14.46
D	17-02-03	9.030	18.029	7.035	14.94
C	17-02-03	8.999	18.032	7.037	15.11
C	17-02-04	9.011	17.999	7.071	15.23
D	17-02-06	8.986	17.982	6.928	14.53
C	17-02-06	8.998	17.998	7.031	15.13
D	17-02-07	9.011	18.018	7.069	15.29
C	17-02-07	8.992	17.991	7.032	15.17
D	17-02-08	9.006	18.018	7.020	15.20
C	17-02-08	8.993	17.997	7.047	15.26
A	17-02-10	8.990	17.999	7.025	15.21
A	17-02-11	8.992	18.000	7.026	15.19

Таблица 1. Обзор измерений для MSA, отсортированных по дате и времени. Здесь A-D обозначают четырех разных людей, проводивших независимые испытания водителей, а  $m_1$  и  $m_2$  - значения добавочной массы, примененные результаты, полученные на предприятии SEAS Fabrikker AS в Норвегии с использованием имеющегося собственного оборудования.

### 3.1 Результаты MSA

Список всех 21 измерений приведен в таблице 1, включая дату измерения, значения добавочной массы и сопоставленные значения  $Bf$  и  $M_{MS}$ .

испытателем. Выше,  $Bf$  - независимое от массы значение коэффициента силы, полученное из данных, а  $MMS$  - движущаяся масса, рассчитанная путем подгонки  $ZM$  к модели соответствия LOG. Измерения, отмеченные серым цветом, были ошибочными и исключены из дальнейшего анализа.

На основе ряда диагностических исследований три измерения были определены как ошибочные и впоследствии отклонены. Причины каждого отклонения более подробно описаны в Приложении А.3. Что касается дат проведения испытаний каждого оператора, отметим, что измерения проводятся не упорядоченно, а в несколько случайном порядке, что является рекомендованной процедурой для R&R Gage. На рис. 9 показана корреляция между  $Bf$  и  $M_{MS}$  для оставшихся 18 измерений в MSA. На рис. 9 видно, что измерения ограничены  $6,99 \text{ Tm} < Bf < 7,08 \text{ Tm}$  и  $14,9 \text{ г} < M_{MS} < 15,3 \text{ г}$ . Это приводит нас к выводу, что...

огласиться, что предложенная методика измерения способна точно определить  $Bf$  с погрешностью около 0,5%, а  $M_{MS}$  - с погрешностью около 1%. Поскольку  $M_{MS}$  является

вычисляется по формуле  $M_{MS} = (Bf)^2 C_{MES}$ , что приводит к корреляции между ошибками; то есть, ошибки  $\delta Bf$

и  $\delta C_{MES}$  распространятся на  $\delta M_{MS}$  в соответствии с

$$\frac{\delta M_{MS}}{MMS} \sim 2 \frac{\delta Bf}{Bf} + \frac{\delta C_{MES}}{C_{MES}} \quad (33)$$

И действительно, линия тренда на рис. 9 дает наклон 1,45, что близко к теоретическому значению 2 в уравнении 33. На самом деле, построение линии тренда для  $C_{MES}$  против  $Bf$  на рис. 10 показывает гораздо более слабую, отрицательную корреляцию. Подстановка  $\delta C_{MES} / C_{MES} = 0,55 \delta Bf / Bf$  в уравнение (33) согласуется тем, что с корреляцией (наклон 1,45), наблюдаемой на рис. 9. Для этого

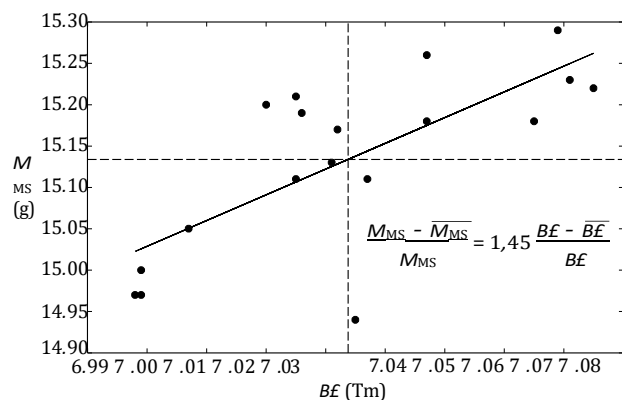


Рис. 9. Сырые данные ( $Bf$ ,  $MMS$ ), построенные по линейному тренду, показывают значительную корреляцию. Когда  $CMES$  строится как зависимость от  $Bf$ , корреляция не очевидна. Средние значения здесь:  $Bf = 7,034$  Тм и  $MMS = 15,13$  г.

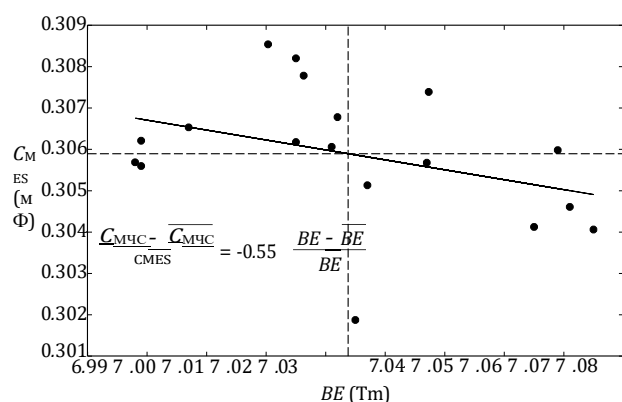


Рис. 10. Сырые данные ( $Bf$ ,  $CMES$ ), построенные против линейного тренда, показывающего слабую корреляцию. Здесь средние значения  $Bf = 7,034$  Тм и  $CMES = 0,306$  мкФ.

Поэтому мы пришли к выводу, что любая ошибка в  $Bf$  усиливается при расчете  $MMS$ .

В данном MSA мы решили изучить статистическое распределение  $Bf$ , поскольку это ключевой параметр для процедуры измерения. Для этого показательно повторно рассмотреть ряд данных с индексом измерения, отсортированных по данным (см. рис. 11) и по оценщикам (см. рис. 12). Для изучения точности метода и того, насколько он соответствует нормативному распределению, проводится исследование смещения. График гистограммы набора данных  $Bf$  показан на рис. 13. Предварительный вывод заключается в том, что распределение является ненормальным, но, тем не менее, мы продолжим статистический анализ.

### 3.2 ANOVA Gage R&R

Изложив метод сбора данных и обосновав отклонение выбросов, мы теперь можем продолжить формальную обработку результатов ANOVA Gage R&R. Здесь ANOVA означает дисперсионный анализ и является более сложным методом, чем так называемый метод средних и диапазонов. ANOVA -

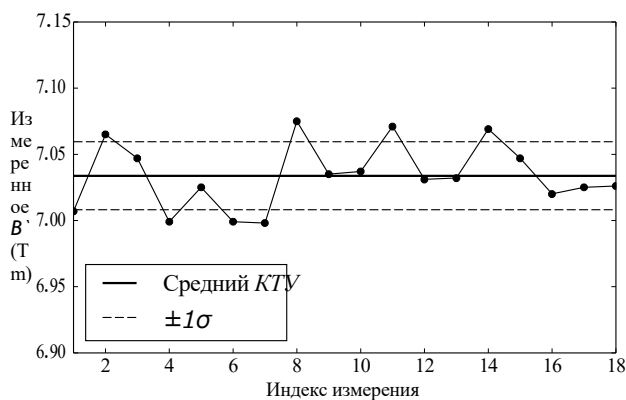
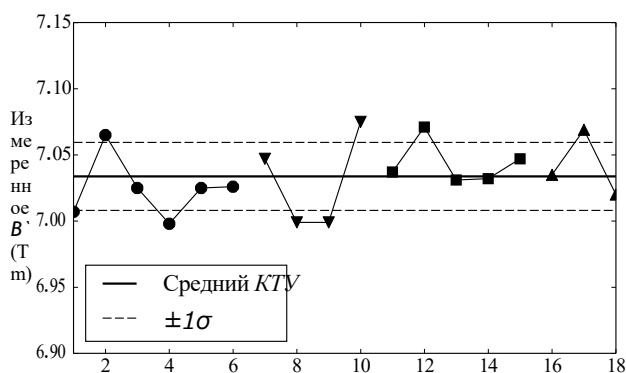


Рис. 11.  $Bf$  как функция индекса измерений, отсортированных по дате. Среднее значение  $Bf$  и границы  $1\sigma$ , определенные по несмещенному (суммарному) стандартному отклонению выборки.



или, точнее, односторонний ANOVA - требует больше вычислений, но оценивает вариации и их взаимодействие статистически



Рис. 12.  $Bf$  как функция индекса измерения, отсортированная по ап-прайзерам. Среднее значение и границы такие же, как на предыдущем рисунке.

5  
4  
3  
2  
1

обоснованным образом. Сначала мы определим сумму квадратов разницы...

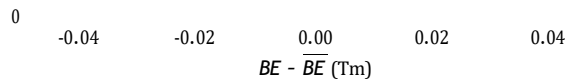
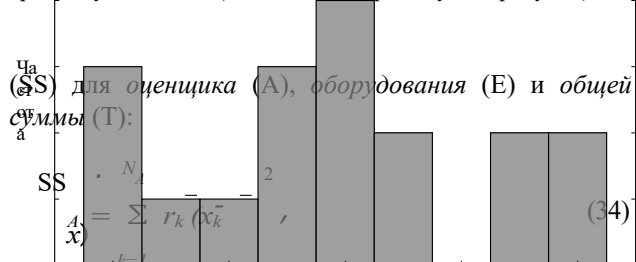


Рис. 13. Гистограмма погрешности полного набора данных по 18 точкам для  $Bf$ . Этот результат показывает значительное отклонение от нормального распределения. Результаты показывают отклонение от точки, ближайшей к среднему значению (индекс 16 на предыдущем рисунке).



$$SS_E = \sum_{k=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{r_k} (x_{jk} - \bar{x}_k)^2, \quad (35)$$

$$SS_T = \sum_{k=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{r_k} (x_{jk} - \bar{x})^2 = SS_A + SS_E. \quad (36)$$

Выше,  $N_A$  - количество оценщиков (4 человека),  $r_k$  - количество повторений для  $k^{\text{th}}$  оценщика,  $x_{jk}$  -  $j^{\text{th}}$  измерение для  $k$  оценщика,  $\bar{x}_k$  - среднее значение для  $k$  оценщика, и  $\bar{x}$  - большое среднее. Обращаясь к таблице 1, мы видим, что

$$\{r_1, r_2, r_3, r_4\} = \{6, 4, 5, 3\}, \quad (37)$$

$$N = \sum_{k=1}^{N_A} r_k = 18. \quad (38)$$

Мы также можем определить средние квадратичные (MS) значения  $MS_x = SS_x / DF_x$ , где  $DF$  обозначает степени свободы. Таким образом,

$$DF_A = N_A - 1 = 3, \quad (39)$$

$$DF_E = N - N_A = 14, \quad (40)$$

$$DF_T = N - 1 = 17. \quad (41)$$

Числовые значения этих величин приведены в таблице 2, ниже.

Источник	DF <sub>x</sub>	SS <sub>x</sub> (%)	MS <sub>x</sub> (%)
Оценщик	3	0.1246	0.04153
Оборудование	14	0.9247	0.06605
Всего	17	1.0493	-

Таблица 2. Таблица ANOVA, суммирующая значения степеней свободы (DF), суммы квадратов разницы (SS) и среднего квадрата (MS).

Метод ANOVA предполагает, что существуют два отдельных нормальных распределения: один оценщик делает выборку из нормального распределения со средним  $\bar{x}_k$  с отклонением  $\sigma_E$ , вызванным оборудованием, в то время как средства оценщиков сами по себе распределены нормально со средним  $\bar{x}$  и отклонением  $\sigma_A$ , вызванным различиями в оценках. Основываясь на вышеприведенных результатах, мы можем рассчитать *вариацию оборудования* (EV) - меру повторяемости - используя интервал достоверности  $3\sigma$  (или 99,7%) (иногда применяются другие коэффициенты)

$$EV = 3\sigma_E \sim 3\sqrt{MS_E} = 0,07710. \quad (42)$$

Обычно *вариация оценщика*  $AV = 3\sigma_A$  - показатель воспроизводимости - оценивается как пропорциональная  $MS_A$   $MS_E$ . Поскольку  $MS_A < MS_E$ , мы делаем вывод, что  $AV$  незначительна, или, по крайней мере, не может быть оценена по методу

Метод ANOVA. Результирующая R&R

## 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы описали двойную добавочную массу

метод оценки силового фактора  $Bf$ , механического параметров  $M_{MS}$ ,  $C_{MS}$ ,  $R_{MS}$ , а также параметр ползучести  $\beta$ . Метод является более надежным и точным, чем обычный подход с одной добавленной массой, поскольку заблокированный электрический импеданс может быть полностью отфильтрован от общего импеданса, а последующий анализ проводится только по движущемуся импедансу. Для количественной оценки точности нового метода мы провели анализ методом ANOVA MSA с использованием четырех оценщиков, в результате чего  $Bf$  может быть es... с точностью  $\pm 1\%$  при доверительном интервале 99%. измерительной системы составляет

$$GRR \sim EV = 0,07710, \quad (43)$$

и мы делаем вывод, что вариации в предлагаемой методике обусловлены не людьми и процедурой (оценщиком), а погрешностью оборудования. Поскольку EV и GRR привязаны к стандартным отклонениям и имеют те же единицы измерения, что и измеренные данные ( $Bf$  в Тм), значения напрямую сравнимы. Мы имеем номинальное значение  $Bf = 7,03$  Тм и доверительный интервал  $3\sigma$  равен 0,07, т.е. 1,0%. Следовательно, показанный здесь метод действителен для измерения  $Bf$  с высокой точностью и статистической достоверностью.

с использованием измерительной системы WTPro вместе с достаточно точным определением добавленных масс (добавленные массы были известны с точностью 0,1%). Результаты показывают  $Bf$ , который отклоняется от Klippel LPM на 1,6% и от официальной спецификации на 2,4%.

±

Похоже, что данные, полученные в результате измерения Klippel LPM, оптимистичны в отношении  $Bf$ , поскольку даже самое высокое значение  $Bf$  в нашем измерении ниже, чем в измерении Klippel LPM, но обратите внимание, что разница между нашим средним значением и Klippel LPM составляет менее 2%, поэтому это не является большим расхождением. Мы подчеркиваем, что в настоящем MSA не уточняется абсолютная точность измерений, а только точность между измерениями. Для определения точности измерения оборудование должно быть откалибровано с прослеживаемостью в аккредитованной лаборатории.

## 5 БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим инженеров компании SEAS Fabrikker AS за участие в анализе Gage R&R: Диего Иварса, Хайварда Соллиена и Питера Брукса. Спасибо также Киту Ларсону за полезные обсуждения, связанные с точностью и испытаниями постоянным напряжением с помощью прибора Smith & Larson WTPro.

## 6 ССЫЛКИ

[1] J. Н. Морено и Х. Бёг, "Измерение параметров громкоговорителя с помощью лазерного датчика скорости - усовершенствованный метод", в кн: *Audio. Eng. Soc. Convention 91*, October, 1991.

[2] У. Зайдель и В. Клиппель, "Быстрое и точное измерение параметров линейного преобразователя", в: *Audio. Eng. Soc. Convention 110*, May, 2001.

[3] Н. Ф. Олсон, "Elements of Acoustical Engineering", Van Nostrand, New York, 1940.

[4] В. Дж. Эллиотт, "Точные методы определения низкочастотных параметров электромеханико-акустических преобразователей с BLI возбуждением", в: *Audio. Eng. Soc. Convention 61*, November, 1978.

[5] М. Н. Knudsen и J. G. Jensen, "Low-Frequency Loudspeaker Models That Include Suspension Creep," *J. Audio. Eng. Soc.*, vol. 41, p. 3, 1993.

[6] M. Down, F. Czubak, G. Gruska, S. Stahley, D. Ben-ham, "Measurement System Analysis, Reference Manual, Fourth Edition," AIAG, 2010.

[7] Л. Л. Беранек и Т. Дж. Меллоу, "Акустика: Звуковые поля и преобразователи", Elsevier - Academic Press, Oxford, 2012.

[8] Е. С. Ольсен и К. Торборг, "Площадь диафрагмы и массовые нелинейности конусных громкоговорителей", в: *Audio. Eng. Soc. Convention 99*, October, 1995.

[9] K. Thorborg, C. Tinggaard, F. Agerkvist, C. Futtrup, "Frequency Dependence of Damping and Compliance in Loudspeaker Suspensions," *J. Audio. Eng. Soc.*, vol. 58, p. 472, 2010.

## A.1 Изменение эффективной массы с частотой

### Сопротивление излучения

В дополнение к вкладу компонентов подвеса в импеданс движения, связь диафрагмы с окружающим воздухом приводит к неотрицательному импедансу излучения. Точная форма этого импеданса является очень сложной функцией геометрии диффрактора и диффузора, поэтому простой формулы не существует. Однако, при низкой частоте и в предположении, что движение является поршневым, то импеданс излучения является преимущественно реактивным и в хорошем приближении ведет себя как эффективная масса

$$Z_{\text{rad}} \sim i\omega M_{\text{rad}}, \quad (1)$$

Для типичной измерительной установки драйвера эффективная масса минимизируется, если драйвер не имеет перегородки и излучает в виде дипольной моды. В этом случае  $M_{\text{rad}} = 8a^3 \rho/3$  [7], где  $a$  - эффективный радиус излучателя, а  $\rho$  - плотность воздуха. Напротив, эффективная масса максимальна, если

динамик полностью перегороден (установлен на перегородку бесконечной площади), для которой  $M_{\text{rad}} = 16a^3 \rho/3$  [7]. Рассмотрим пример динамика радиусом 5,75 см, например, H1488-08 (L16RNX). Это соответствует незатухающей массе 0,61 г при температуре 20° С. Обратите внимание, что частотно-зависимая поправка к низкочастотному значению

частотный предел эффективной массы действительно мал; для динамика 5,75 см поправочный коэффициент для эффективной массы (т.е. для реактивного члена импеданса, который является

$$Z_{\text{rad}} \sim i\omega M_{\text{rad}} \left( 1 - \frac{4}{15}(ka)^2 \right). \quad (2)$$

Здесь мы можем написать  $\omega = c_s k$ , где  $c_s$  - скорость звука, а  $k$  - волновое число. На частоте 185 Гц, что намного выше диапазона, где движущаяся масса доминирует в импедансе.

поправочный член (в квадратных скобках) составляет лишь 1% уменьшения воздушной нагрузки.

В документе входное напряжение поддерживается на низком уровне, чтобы минимизировать нелинейные эффекты от экскурсий.

## A.2 Повторная выборка данных

Данные измерений могут встречаться с линейным или логарифмическим (log-spaced) интервалом, а количество точек данных может отличаться от того, что требуется для процедуры подгонки. В этом приложении мы представляем метод повторной выборки, который преобразует произвольные данные измерений в заданное число точек данных с логарифмическим интервалом. Эта процедура удобна для модификации данных измерений во многих различных ситуациях (не только в данной). В данной работе алгоритм передискретизации применяется к необработанным данным измерения импеданса и обеспечивает достаточное разрешение в районе резонансной частоты транс-дьюсера.

Входные данные представлены в формате частота, величина, фаза (FMP), и мы хотим переснять выборку с  $n$  точек на  $N$  точек.

$$\left\{ \omega_i, A_i, \phi_i \right\}_{i=1}^n \xrightarrow{N} \left\{ \hat{\omega}_j, \hat{A}_j, \hat{\phi}_j \right\}_{j=1}^N \quad (3)$$

Предположим, что желаемые точки для повторной выборки логарифмически разнесены на интервале  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ , так что

$$\hat{\omega}_j = \omega_{\min} \left( \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \right)^{\frac{j-1}{N-1}}. \quad (4)$$

Отмечая, что комплексный импеданс связан с амплитудой и фазу через  $Z = A \exp(i\phi)$ , мы вводим новые функции  $C_i = \cos(\phi_i)$  и  $S_i = \sin(\phi_i)$ .

$$\hat{A}_j = \text{сплайн}[\{A_i\}, \hat{\omega}_j]. \quad (5)$$

$$\hat{C}_j = \text{сплайн}[\{C_i\}, \hat{\omega}_j]. \quad (6)$$

$$\hat{S}_j = \text{сплайн}[\{S_i\}, \hat{\omega}_j]. \quad (7)$$

Поскольку на низких частотах воздушная нагрузка составляет всего 4% от общей массы движущегося тела, частотная зависимость  $Z_{\text{rad}}$  изменяет массу движущегося тела всего на 0,04%. Таким образом, в дальнейшем мы будем считать эффект импеданса излучения постоянным и объединенным с физической подвижной массой,  $M_{\text{MS}}$ , мембраны.

## Эффективная площадь мембраны

Большой уровень экскурсий может повлиять на то, какая часть подвеса включена в движущуюся массу и,

$$\hat{\varphi}_j = \text{atan2} [S_i, C_i].$$

Здесь spline означает любую подходящую процедуру сплайн-интерполяции, а atan2 - двухаргументную функцию арктангенса, которая присутствует в большинстве современных языков программирования. В отличие от  $\varphi$ , функции  $C$  и  $S$  непрерывны. Таким образом, разделение фазы на две составляющие гарантирует отсутствие проблем, когда фаза пересекает ноль или когда она заворачивается на  $\pm 180$  градусов.

### A.3 Отклоненные измерения

Три измерения были отклонены на основании появления  $\omega$ -зависимости кривых  $Bf$  и массового согласования. Эти три случая качественно отличались от других измерений и, в частности, плохо вели себя на низкой частоте. В частности, кривые  $Bf$  были аномальными, как показано на рис. 14, и, что более важно, не было идентифицируемой области согласованности масс, как показано на рис. 15.

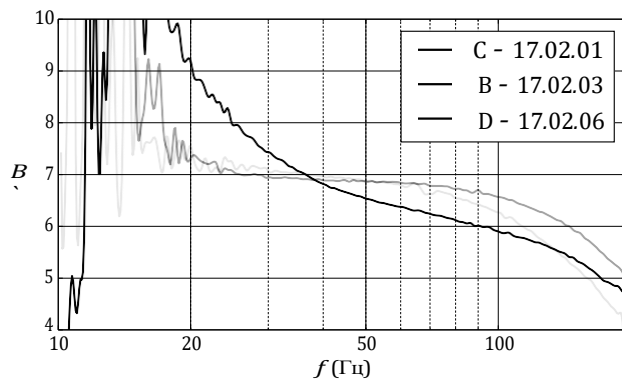


Рис. 14. Отброшенные данные, основанные на аномально плохом низкочастотном поведении. Сравните с рис. 5

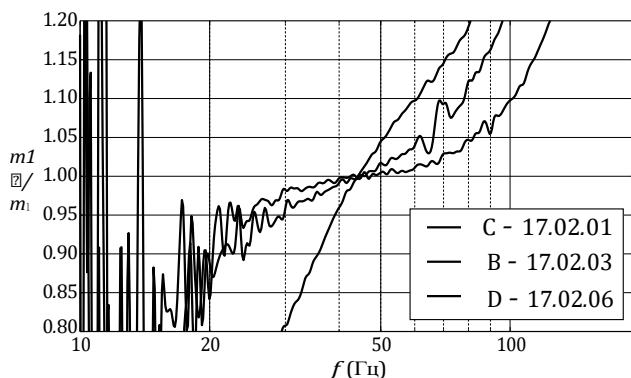


Рис. 15. Отброшенные данные, основанные на аномально плохом низкочастотном поведении и плохой согласованности масс. Сравните с рис. 8

Первое измерение С, датированное 2017-02-01, наиболее явно указывало на недостатки. Дальнейшие испытания показали, что массы были прикреплены рядом с подвесом, что означает, что они не закреплены на звуковой катушке. Это приводит к динамическому вкладу, так что плоский  $Bf$  около  $f_s$  не может быть идентифицирован.

#### A.4 Эквивалентные формы модели LOG

Выражение для LOG-комплаенса можно переформулировать в терминах логарифмических функций с произвольным основанием и частотной нормализацией. Рассмотрим представление LOG с частотной нормализацией  $\omega_0$ , основание  $b$ . Если установить, что оно равно представлению LOG, используемому в данной работе, то получится

$$C_0 \left( 1 - \lambda \log_b \frac{i\omega}{\omega_0} \right) = C [1 - \beta \ln(i\omega)] . \quad (9)$$

Равенство является точным, и некоторая алгебра

показывает, что

$$C_0 = C (1 - \beta \ln \omega_0) , \quad (10)$$

$$\lambda = \frac{\beta \ln b}{1 - \beta \ln \omega_0} . \quad (11)$$

В оригинальной работе Кнудсена и Йенсена [5],  $\omega_0 = 1$  и  $b = 10$ , так что для преобразования требуется

$$C_0 = C \text{ и } \lambda = \beta \ln 10 . \quad (13)$$

$$1 - \beta \ln \omega_0$$

Например, если мы выберем  $b = 10$  и  $\omega_0 = \omega_s$ , как в уравнении (5) из работы [9]. [9], то

$$C_0 = C (1 - \beta \ln \omega_s) \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{\beta \ln 10}{1 - \beta \ln \omega_s} \quad (12)$$

---

**АВТОРЫ**

Джефф КэндиКlaus Фаттруп

Джефф Кэнди родился в Эдмонтоне, Канада, в 1966 году. В 1994 году он получил степень доктора философии по физике в Университете штата Калифорния, Сан-Диего, и в настоящее время является руководителем группы турбулентности и транспорта в General Atomics в Сан-Диего, Калифорния. Его исследования охватывают различные темы теоретической и вычислительной физики плазмы, с особым упором на кинетическую теорию плазмы и турбулентность. В области аудио он интересуется применением методов теоретической акустики к практическим ситуациям. Доктор Кэнди является членом Общества аудиоинженеров и членом Американского физического общества (APS). В 2003 году он получил премию Розенблюта за теорию синтеза и был профессором-юбиларом 2008 года в университете Чалмерса.

—

Кlaus Фаттруп родился в Хернинге, Дания, в 1971 году. В 1997 году он получил степень магистра в области машиностроения в Ольборгском университете. Его специализацией было материаловедение: сталь и другие металлы, керамика, резина, пластмассы и композиты в отношении конструктивных параметров, технологического проектирования, химических и экологических вопросов. С 1997 по 2006 год он работал в компании Dynaudio A/S в Скандерборге, Дания, в качестве инженера-исследователя, разрабатывая корпуса громкоговорителей, и, наконец, в качестве инженера по автомобильным системам. С 2006 года он работал инженером-конструктором преобразователей в компании Tympany Denmark, а в 2008 году стал менеджером по исследованиям и разработкам в компании Scan-Speak. В сентябре 2013 года он стал техническим менеджером по продажам в SEAS, Норвегия, а в марте 2015 года был назначен техническим директором.