



Audio Engineering Society Congress Paper

Presented at the 6th Congress
2001 May 27–29 São Paulo, Brazil

This convention paper has been reproduced from the author's advance manuscript, without editing, corrections, or consideration by the Review Board. The AES takes no responsibility for the contents. Additional papers may be obtained by sending request and remittance to Audio Engineering Society, 60 East 42nd Street, New York, New York 10165-2520, USA; also see www.aes.org. All rights reserved. Reproduction of this paper, or any portion thereof, is not permitted without direct permission from the Journal of the Audio Engineering Society.

Avaliação do Desempenho de Transdutores em Regime de Sinais de Grande Amplitude

Wolfgang Klippel
Klippel GmbH
Dresden, 01277, Aussiger Str. 3, Germany
wklippel@klippel.de

RESUMO

Alto-falantes, fones, vibradores e outros transdutores eletro mecânicos e eletroacústicos fabricados hoje em dia ainda são, sistemas analógicos produzindo distorções substanciais com sinais de grande amplitude. Cada vez, mais novas aplicações requerem transdutores pequenos, leves e de baixo custo mas reproduzindo sinais acústicos de boa qualidade. Medidas normais baseadas em teorias de sistemas lineares falham com sinais de grandes amplitudes. Novas técnicas de medida e simulação foram desenvolvidas para o domínio de sinais de grande amplitude considerando não-linearidades e outros mecanismos térmicos assim como variáveis em função do tempo. Os parâmetros identificados para o domínio de sinais de grande amplitude revelam limites e defeitos dos alto-falantes e permitem uma estimativa numérica do comportamento para qualquer estímulo, seja natural, seja artificial. Esta informação é fundamental para o diagnóstico e otimização de projetos considerando limitações objetivas e subjetivas.

1 Introdução

Aplicações profissionais, em multimídia, automotivas e domésticas requerem cada vez mais transdutores pequenos e leves, fabricados com baixo custos e capazes de gerar adequado nível sonoro com alta eficiência e baixa distorção. Desta forma os transdutores são utilizados como “alto” falantes e é muito importante o desempenho com sinais de grande amplitudes. Há três maneiras de avaliar o comportamento e a qualidade dos falantes, como ilustrado na fig. 1. A primeira utiliza o ouvido humano para avaliar a qualidade sonora subjetivamente. São necessárias audições sistemáticas para obter-se resultados confiáveis. Não obstante, o engenheiro também precisa dados objetivos baseados em medidas físicas. Com sinais de baixa amplitude, o falante pode ser descrito como um sistema linear caracterizado completamente pela resposta de frequência e fase. Com sinais de média amplitude, os falantes produzem novos componentes espectrais. Técnicas de medida tradicionais avaliam distorções harmônica e por intermodulação para estímulos por um tom singelo ou multitons. Estas medidas descrevem apenas alguns sintomas do comportamento em grandes sinais mas não as próprias causas físicas. Pesquisas com alto-falantes realizadas na última proporcionarão modelos mais precisos para sistemas de alto-falantes, considerando variáveis não lineares em função do tempo e de temperatura. Estes resultados são a base para métodos de medidas mais poderosos e válidos em regime de sinais de grande amplitude, permitindo a predição do comportamento não linear e a investigação do impacto subjetivo nos resultados de audições. Este trabalho apresenta um resumo destas novos métodos e um exemplo de diagnóstico prático de um alto-falante.

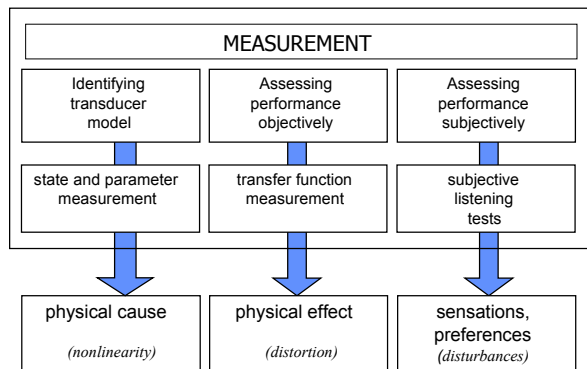


Fig. 1: Maneiras de avaliar alto-falantes

2 Modelo do Transdutor

A maioria dos mecanismos empregados em alto-falantes, fones e outras aplicações, usam uma bobina móvel em um campo magnético estático, para gerar uma força eletrodinâmica no sistema eletro mecânico. Foi desenvolvido um modelo para estes tipos de transdutores que preserva as características deste princípio mas abandona os aspectos de uma unidade particular que não são relevantes para desempenho geral tais como, forma, cor, materiais, etc.

A fig. 2 ilustra o processo de abstração. Em baixas frequências, onde o comprimento de onda é grande em comparação com as dimensões geométricas, o estado do transdutor pode ser descrito por apenas algumas variáveis.

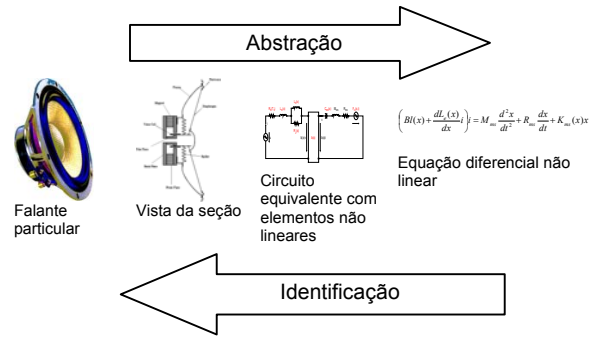


Fig. 2: Modelando alto-falantes no domínio de grandes sinais

- $x(t)$ Deslocamento da bobina móvel
- $v(t)$ Velocidade da bobina móvel
- $i(t)$ Corrente elétrica de entrada.
- $u(t)$ Tensão nos terminais do alto-falante
- $F_a(t)$ Força relativa à pressão sonora no diafragma

A relação entre as variáveis de estado pode ser descrita por um modelo de parâmetros discretos compreendendo alguns elementos caracterizados por valores desses parâmetros. O número e tipo dos elementos discretos e, a maneira em que são conectados pode ser referida como a topologia de nosso modelo. Pode ser representado, graficamente, por um circuito elétrico equivalente, como mostrado na figura 3

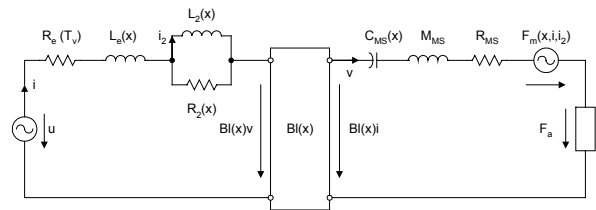


Fig. 3: Circuito equivalente eletro mecânico

Em contraste com o tradicional modelo linear (Thiele-Small), alguns parâmetros não são constantes mas são dependentes da variação do valor de certas variáveis como o deslocamento, corrente, temperatura da bobina móvel, etc.

- $R_e(T_v)$ Resistência DC da bobina móvel
- $L_e(x)$ Parte da indutância da bobina móvel que é independente da frequência.
- $L_2(x)$ Para-indutância da bobina móvel, que desaparece em altas frequências
- $R_2(x)$ Resistência elétrica causada por perdas por correntes “Eddy”
- $Bl(x)$ Fator instantâneo do fator de acoplamento eletrodinâmico (fator de força do motor), definido como a integral do fluxo magnético permanente, B vezes o comprimento da bobina móvel, l .
- $F_m(x, i, i_2)$ Força contra-eletromotriz
- M_{MS} Massa mecânica do conjunto do diafragma, inclusive a bobina móvel e carga acústica.
- R_{MS} Perdas por resistência mecânica da suspensão
- $C_{MS}(x, t)$ Compliância mecânica da suspensão (O inverso da rigidez, $K_{ms}(x, t)$)

3 Identificação do modelo do alto-falante

O modelo para sinais de grande amplitude para os alto-falantes incluem informação estrutural, parâmetros livres e variáveis de estado. As ferramentas tornam-se mais poderosas se aplicamos a teoria em um falante real. Este processo chama-se processo de identificação, que é justamente o oposto do processo de abstração ilustrado na Fig. 2.

Inicialmente, é necessário provar que a topologia é adequada para o tipo de transdutor e o princípio de conversão utilizado. Depois, é necessário especificar os parâmetros livres do modelo para uma unidade particular. Finalmente, todas as variáveis de estado e o sinal de saída podem ser preditos para qualquer sinal de entrada utilizando-se uma topologia adequada e parâmetros otimizados.

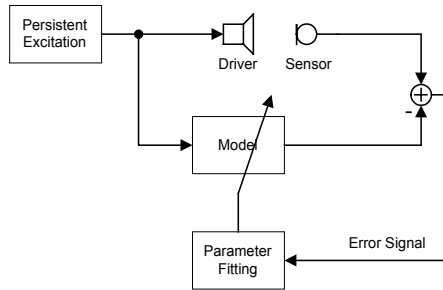


Fig. 4: Identificação do modelo do alto-falante

A identificação do modelo pode ser efetuada por técnicas estáticas, quasi-estáticas e dinâmicas. Mas apenas uma técnica completamente dinâmica, como ilustrado na Fig. 4, permite medir um transdutor em condições normais de trabalho. O falante é excitado constantemente com um sinal de banda larga, tal como ruído ou um sinal musical comum. No mínimo um sinal elétrico, mecânico ou acústico deve ser medido simultaneamente. A monitoração da corrente de entrada nos terminais do falante e a força contra eletro-motriz nos dá um sinal proporcional à velocidade da bobina móvel e evita sensores dispendiosos.

Conectando-se o modelo em paralelo com o sistema falante/sensor, é possível avaliar a concordância de seu desempenho com o falante, pela avaliação de um sinal de erro que é a diferença entre a predição e o sinal real de saída. Os parâmetros podem ser ajustados adaptivamente para um valor ótimo pela redução da amplitude do sinal de erro com um algoritmo LMS. É possível medir os parâmetros e variáveis de estado simultaneamente, implementado-se este sistema em um circuito digital (DSP) [13-14]. Um sinal de erro de baixa amplitude comprova que a topologia do modelo é adequada e pode-se estimar otimadamente os parâmetros. Pode-se monitorar as variações reversíveis dos parâmetros, processos térmicos ou eventuais falhas ou mesmo a destruição do falante, em função do tempo.

3.1 Parâmetros de sinais de grande amplitudes.

Como exemplo, A Identificação de Grandes Sinais (LSI), foi aplicada a um falante destinado a aplicações de alta qualidade.

O exemplo consiste em um woofer de 8 polegadas com um fator de força relativamente alto como mostrado na Tabela 1. Isto corresponde a uma bobina móvel com curta projeção, o que causa um queda rápida do produto Bl , com pequenos deslocamentos, como mostrado na Fig. 5.

| Parâmetros | Falante A | Unidade |
|---------------|-----------|---------|
| f_s | 30.5 | Hz |
| $Bl(x=0)$ | 7.43 | N/A |
| $C_{MS}(x=0)$ | 1.28 | mm/N |
| $Le(x=0)$ | 0.47 | mH |
| L_2 | 0.32 | mH |
| M_{MS} | 21.1 | g |
| Q_{MS} | 2.87 | |
| R_2 | 2.18 | Ohm |
| R_E | 3.54 | Ohm |

Tabela 1. Parâmetros para a posição de repouso

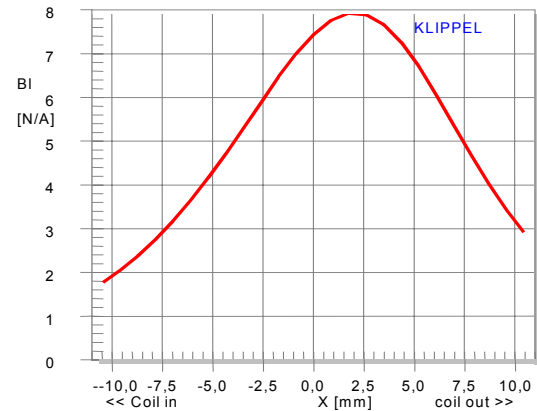


Fig. 5: Fator de força $Bl(x)$ versus deslocamento x do alto-falante A

O deslocamento pico-a-pico de 14mm corresponde aproximadamente à largura da bobina móvel, onde a força instantânea decai para 50% de seu valor máximo. A posição de repouso da bobina móvel não corresponde ao máximo de Bl , causando uma significativa assimetria na curva.

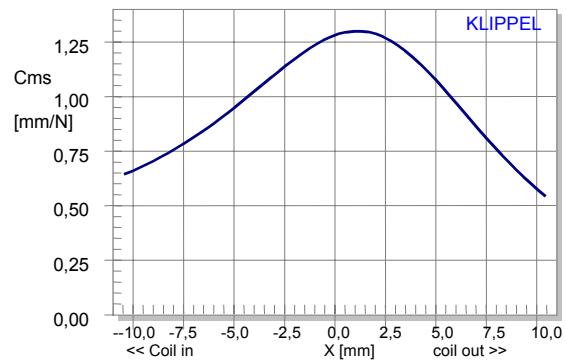


Fig. 6: Compliância $C_{ms}(x)$ versus deslocamento x do Falante A

Enquanto a capacidade do motor está quase extinta em $x = -9$ mm, a compliância da suspensão decresceu apenas para 44% com mostrado na Fig. 6. A maioria das suspensões funcionam com uma redução de $C_{ms}(x)$ até 20 % sem causar nenhum dano. O máximo da compliância também não coincide com a posição de repouso e decresce mais rapidamente com um deslocamento positivo do que negativo, mas o valor da compliância é

aproximadamente igual para $x = \pm 7$ mm. A simetria da suspensão é portanto bastante aceitável.

A indutância da bobina móvel $L_e(x)$ mostra uma pronunciada assimetria como ilustrado na Fig. 7, aumentando quando a bobina móvel move-se na direção da parte traseira do alto-falante. Este comportamento é típico para falantes que não usa anel de curto ou outros meios para reduzir a indutância. As curvas não lineares podem ser obtidas por uma expansão de uma série exponencial. Portanto, o falante pode ser completamente descrito por alguns números com significado físico.

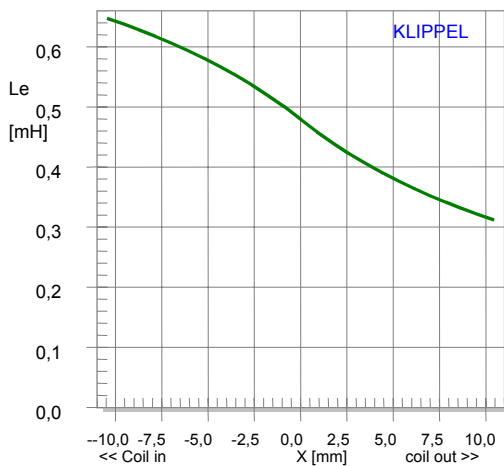


Fig. 7: Indutância versus deslocamento x do Falante A

4 Identificação das Variáveis de Estado e Sinal de Saída

Injetando-se um sinal (tensão) nos terminais do falante, as variáveis de estado (deslocamento) e o sinal de saída (pressão sonora), descrevem o comportamento do falante. Neste capítulo vamos discutir técnicas de medida tradicionais de medição direta e novas técnicas que avaliam esses sinais sem nenhum sensor.

4.1 Medidas diretas

A medida das variáveis de estado e do sinal de saída, como ilustrado na Fig. 8, é a maneira mais simples de avaliar a função de transferência.

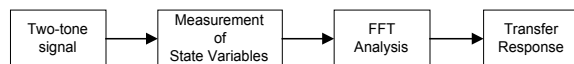


Fig. 8: Medição da função de transferência

Medidas da corrente elétrica e do nível de pressão sonora podem ser efetuadas com equipamento convencional. A medida do deslocamento requer sensores especiais mas um laser de triangulação, barato, consiste cada vez mais uma ferramenta essencial para o desenvolvimento de falantes. Para a medida da velocidade do ar no pórtico, seria necessário um anemômetro de fio aquecido, não comumente disponível.

4.2 Predição

Com um modelo de topologia adequada e parâmetros válidos, para um falante e caixa acústica particular, podemos prever as variáveis de estado para qualquer sinal de entrada $u(t)$, por métodos numéricos como apresentado na Fig. 9.

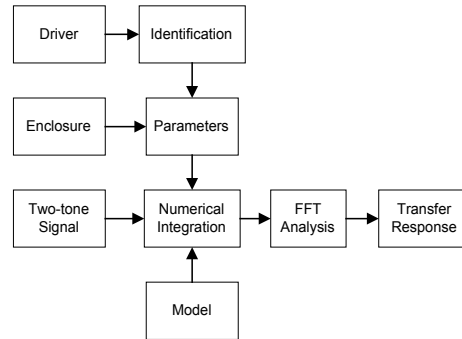


Fig. 9: Predição da função de transferência

Comparando-se a resposta predita com a resposta baseada em fáceis medidas de corrente ou pressão sonora, pode-se provar de maneira simples que o modelo é válido e, os parâmetros confiáveis. As medidas das outras variáveis que requerem sensores especiais podem ser substituídas por predições numéricas.

4.3 Simulação

Enquanto a predição utiliza parâmetros de um alto-falante real, também podemos simular o comportamento de um alto-falante virtual mesmo antes que um protótipo seja fabricado. Os parâmetros podem ser calculados por métodos de elementos finitos (FEM) ou por modificação simples dos parâmetros de um alto-falante real, para avaliar opções de projeto, como mostrado na Fig. 10.

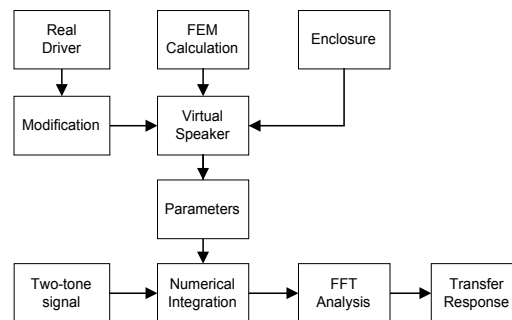


Fig. 10: Simulação da função de transferência.

Para investigar o efeito de cada não linearidade separadamente e, para identificar a causa dominante de distorções, a seguintes não-linearidades podem ser inseridas ou retiradas, durante uma simulação:

- Não linearidade do motor devida a $Bl(x)$
- Não linearidade mecânica, devida a $C_{ms}(x)$
- Não linearidade da indutância, devida a $L_e(x)$
- Não linearidade da para-indutância, devida a $L_2(x)$
- Perdas por correntes “eddy”, devidas a $R_2(x)$
- Relutância (força eletromagnética)
- Compressão adiabática no gabinete $C_{AB}(P_{box})$

- Compressão adiabática da parte posterior do gabinete $C_R(P_{rear})$
- Distorção por irradiação (efeito Doppler)

Obviamente, modificando-se os parâmetros de sinais de grande amplitudes cria-se um novo falante virtual com um comportamento distinto no domínio de grandes sinais.

4.4 Auralização

Auralização é uma nova técnica utilizada para investigar o efeito, separadamente, dos componentes de distorções no sinal de saída. A Auralização é baseada no modelo não linear do alto-falante como na Fig. 11. Utiliza-se o modelo implementado no processador digital de sinais (DSP) para calcular, em tempo real, todas as variáveis de estado. Um sinal de áudio (música) ou qualquer outro sinal de teste artificial pode ser utilizado, via conversor A/D. Ao oposto da simulação, o sinal de saída é decomposto em um sinal linear p_{lin} e distorções não lineares, p_B , p_C e p_L causadas pelas não-linearidades do fator de força $BI(x)$, compliância $C_{ms}(x)$ e indutância $L_e(x)$, respectivamente. Um mixer soma os sinais ponderados e gera na saída o sinal $p_{out}(t)$ para reprodução por fones ou por alto-falantes.

O usuário pode atenuar os componente do sinal para ouvir cada distorção separadamente com qualquer relação entre o sinal linear e as distorções. Testes por comparação cega A-B sistemáticos podem ser efetuados para prever o limiar da audibilidade às distorções, dependendo das propriedades do sinal e do alto-falante. Simultaneamente são monitoradas, em tempo real, todas as variáveis de estado (deslocamento, tensão, corrente, potência, temperatura e pressão sonora), bem como o valor de pico das distorções. Esta técnica combina avaliações subjetivas e objetivas.

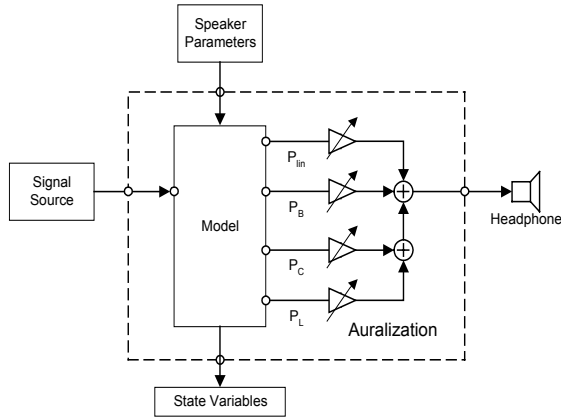


Fig. 11: Simulação digital de um alto-falante em tempo real (Auralização)

5 Comportamento em regime de Grandes Sinais

Obviamente, o comportamento do falante depende das propriedades espectrais e temporais do sinal de entrada. Neste capítulo vamos investigar o comportamento do alto-falante para diferentes estímulos e sua relação com os parâmetros de grandes sinais

5.1 Excitação por sinal de duplo tom

A técnica de medição tradicional, como recomendada pela norma IEC 60268 utiliza um tom singelo ou uma excitação por dois tons, definidos por:

$$u(t) = U_1 \sin(2\pi f_1 \cdot t) + U_2 \sin(2\pi f_2 \cdot t) \quad (1)$$

Este estímulo artificial tem suas vantagens. Fazendo-se uma análise por FFT das variáveis de estado ou do sinal de saída, achase, além das freqüências fundamentais f_1 e f_2 , componentes que podem ser facilmente interpretados como fundamental, componente DC, harmônicos, sub-harmônicos e sinais de intermodulação por soma e diferença, como mostrado na Fig. 12.

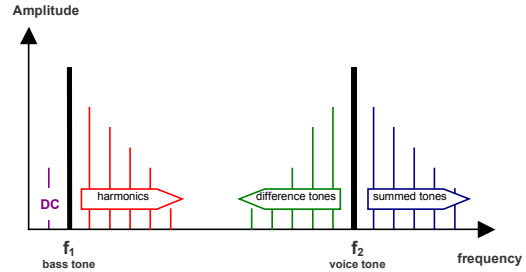


Fig. 12: Espectro do sinal de pressão sonora de uma excitação por sinal de duplo ton (linhas em negrito) e componentes de distorções (linhas finas)

As freqüências f_1 and f_2 e as amplitudes U_1 e U_2 podem ser variadas para produzir varreduras em freqüência e amplitude. Outros métodos são recomendados na norma IEC 60268 mas as medidas de distorção harmônica e por intermodução proporcionam os dados mais informativos à respeito do alto-falante.

O primeiro tom f_1 é ajustado abaixo ou perto da freqüência de ressonância f_s representando um componente grave que produz deslocamento significativo da bobina móvel. O segundo tom f_2 representa um componente de áudio (voz) na banda passante do transdutor. As variáveis do falante, em regime estável, são transformadas por FFT e analisadas. A amplitude das componentes espectrais podem ser indicadas em relação à freqüência e tensão. Em grandes amplitudes, as não-linearidades inerentes ao alto-falante produzem uma relação não-trivial entre amplitudes de entrada e saída.

5.1.1 Componente fundamental

A Fig. 13 mostra o nível de pressão sonora (SPL) da componente fundamental, reproduzida pelo alto-falante exemplificado, versus a freqüência f_1 e a amplitude U_1 de uma estímulo por tom singelo. Este gráfico 3D revela uma distinta compressão em grandes amplitudes

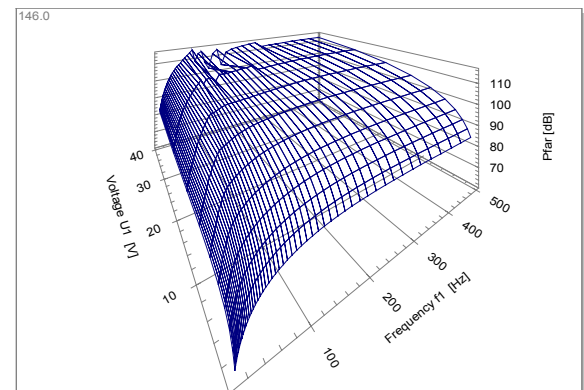


Fig. 13: Pressão sonora, simulada, da componente fundamental versus a freqüência f_1 e a amplitude nos terminais U_1

A figura 14 mostra a resposta do deslocamento da fundamental com excitação por tom singelo, versus freqüência e amplitude.

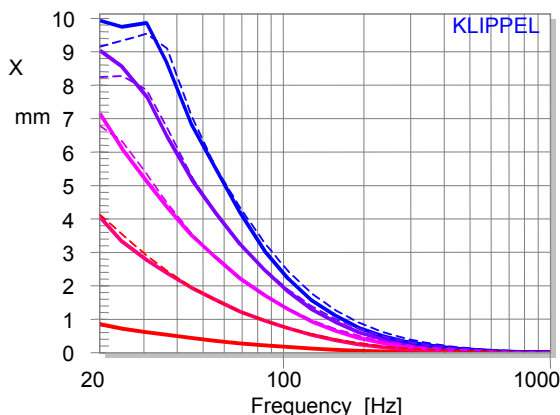


Fig. 14. Deslocamento da fundamental x do alto-falante A. Valor estimado, (linhas em negrito) e medidos (linhas pontilhadas) com voltagens de pico $U = 1, 4.5, 8, 11.5, 15V$

Varre-se cinco vezes, em diferentes amplitudes, o sinal de entrada $u(t)$, aumentando-se a voltagem desde 1 to 15 V em degraus lineares de 3.5 V. As curvas preditas (linhas em negrito) concordam bastante bem com as medições do deslocamento utilizando-se um laser (linhas pontilhadas). Ambas as curvas predita e medidas revelam compressão em amplitude. Enquanto o primeiro degrau de amplitude aumenta o deslocamento em 3 mm, há apenas um incremento de cerca de 1 mm no último degrau. O modelo linear prediria uma amplitude máxima de 13 mm com $U = 15 V$.

5.1.2 Componente DC

Um alto-falante com parâmetros assimétricos retifica os sinais AC, produzindo, dinamicamente, uma componente DCA no deslocamento. A Fig. 15 mostra o deslocamento DC predito e medido em comparação com uma componente fundamental de 70 Hz versus a voltagem de entrada. A componente DC do deslocamento é da mesma ordem de magnitude dos componentes AC. Isto é devido à assimetria em $Bl(x)$ que causa uma instabilidade do falante. Em frequências acima da ressonância $f > f_s$, a bobina móvel acompanha o declive da curva $Bl(x)$ e é literalmente empurrada, dinamicamente fora do gap.

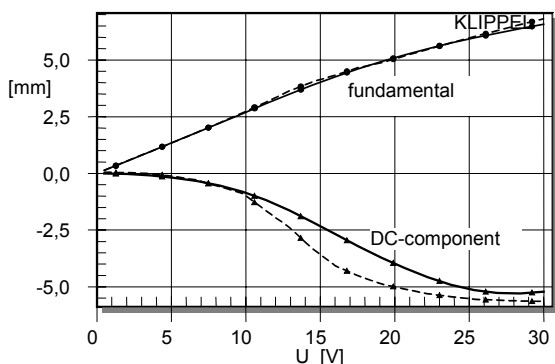


Fig. 15: Deslocamento fundamental da bobina móvel (pontos) e componente DC (triângulos) versus a voltagem do tom de entrada de $f=70$ Hz, medido (linhas finas) e estimado (linhas em negrito).

Apenas a firmeza da suspensão produz uma força oposta, mantendo a bobina móvel dentro do gap. Obviamente, suspensões com maior rigidez e, características não lineares, reduzem o deslocamento DC mas, também qualquer componente AC. Modificações na suspensão atenuam este efeito mas não removem a causa da instabilidade. Este problema pode ser facilmente corrigido alterando-se a posição de repouso da bobina móvel.

5.1.3 Distorção harmônica

A distorção harmônica total, do nível de pressão sonora irradiada, predita e medida, para um sinal senoidal $U_{peak} = 1 V, 8 V$ e $15 V$ é ilustrada na Fig. 16.

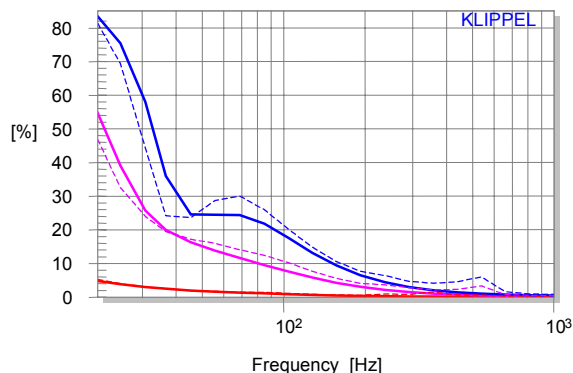


Fig. 16: Distorção harmônica total do alto-falante A, medida (linhas pontilhadas) e preditas pelos parâmetros de grandes sinais (linhas em negrito), com sinais de entrada de $U = 1V, 8V, 15 V$

Abaixo da frequência de ressonância, a energia dos harmônicos predomina na pressão sonora de saída. Expressando-se a distorção em percentagens, de acordo com a norma IEC 60268-5, obtém-se mais de 80% para o falante exemplificado!

Este é um fenômeno genérico, causado por algumas razões:

- A amplitude do deslocamento é alta para $f < f_s$ produzindo variações substanciais nos parâmetros devido a não linearidade em $L_e(x), C_{ms}(x)$ e $Bl(x)$
- Alto valor da corrente de entrada e em fase com o deslocamento causando distorção alta no motor.
- Embora o componente da fundamental componente esteja abaixo da frequência de corte, os harmônicos ainda são irradiados na banda passante.

Em frequências mais altas, a distorção total decresce gradualmente para valores menores que 1%. Uma análise detalhada das componentes espectrais de segunda e terceira ordem mostra a relação com os parâmetros não lineares.

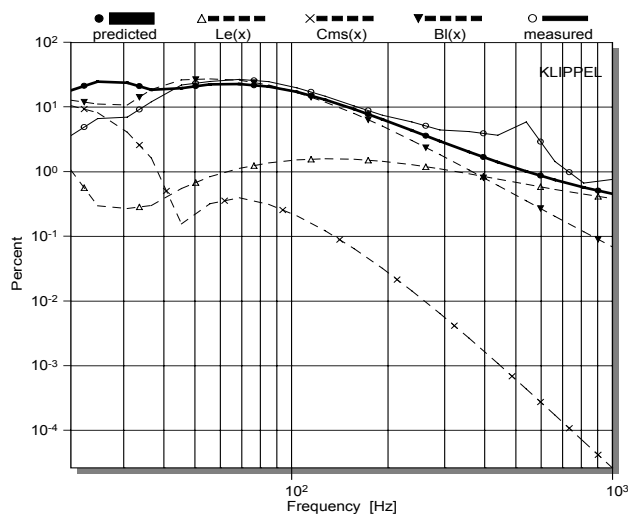


Fig. 17 Distorção harmônica de segunda ordem do alto-falante A Linha fina – Valor medido; Linha em negrito – Valor estimado considerando-se todas as não-linearidades; Linha pontilhada - as não-linearidades em separado

A Fig. 17 mostra a distorção de segunda ordem medida (linha fina) e estimada (linha em negrito), respectivamente. Há uma boa concordância entre as medidas e as estimativas, comprovando que o modelo é confiável e que pode ser utilizado como ferramenta numérica para simulações de modificações nos falantes. Considerando-se apenas uma não-linearidade pela substituição de todos os outros parâmetros por um valor constante correspondente, obtém-se o efeito de cada não-linearidade separadamente. A assimetria da não linearidade de $Bl(x)$ é a causa dominante de distorção harmônica de segunda ordem, representada pela linha pontilhada com triângulos invertidos, porque é a curva mais próxima da resposta predita e medida, considerando-se todas as não-linearidades. A assimetria da suspensão causa 10 % de distorção, abaixo da frequência de ressonância, mas decresce com uma relação 24 dB/oitava em frequências mais altas. A distorção harmônica de segunda ordem causada pela indutância $L_e(x)$ e pelo efeito Doppler, são negligíveis. Se medirmos apenas distorção harmônica obteremos, usualmente, valores muito baixos na banda passante do alto-falante. Entretanto, baixos valores de distorção harmônica não garantem que o alto-falante comportasse-a bem para sinais de entrada mais complexos.

5.1.4 Distorção por intermodulação

Medidas de distorção utilizando apenas um tom singular não mostram a intermodulação entre as componentes em um sinal de áudio complexo. Entretanto, um simples sinal de teste com dois tons, compreendendo um tom de frequência variável f_1 e um segundo tom com frequência constante $f_2 = 70$ Hz mostra componentes de intermodulação de ordem n em frequências de diferença $f_1 - nf_2$ e soma $f_1 + nf_2$ para $n=1,2,\dots$ A Fig. 18 mostra a intermodulação de segunda ordem ($n=1$) no nível de pressão sonora irradiado, segundo a norma IEC 60268-5 para o alto-falante exemplificado.

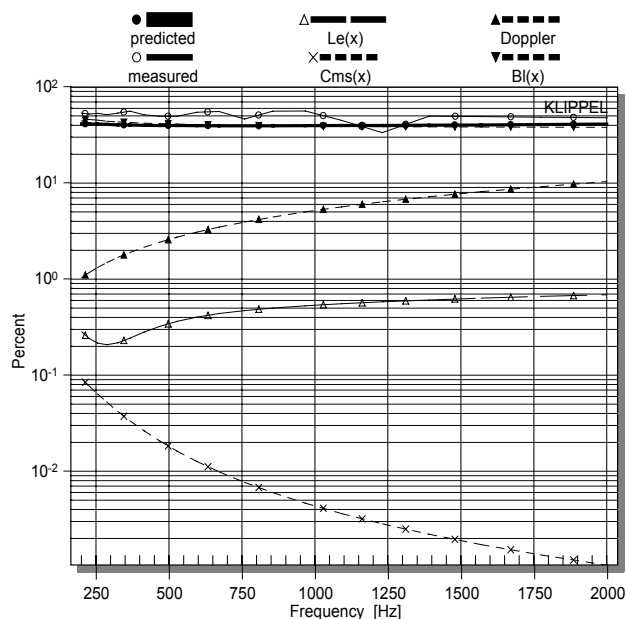


Fig. 18: Intermodulação de segunda ordem do alto-falante A , medida (linha fina) e estimada , considerando-se todas as não-linearidades (linha em negrito), bem como as não linearidades em separado (linhas pontilhadas)

Ambas as medidas e estimativas concordam com uma distorção substancial, que é constante em cerca de 40%. Este é um comportamento típico para um distorção do motor (transdutor) causada por assimetria da curva $Bl(x)$. Distorções por intermodulação desta magnitude são obviamente audíveis como uma aspereza da componente de alta frequência. As intermodulações devidas à não-linearidade de $L_e(x)$ são constantes a um nível de 1 % para frequências altas. A distorção por efeito Doppler aumenta com uma relação de 6dB/oitava em altas frequências e chega a 10 % para $f_1 = 2$ kHz. As distorções por intermodulação devidas a $C_{ms}(x)$ são menores que 0.1% em frequências muito baixas e podem ser desconsiderada para altas frequências.

5.2 Sinais de excitação por Multitom

O aumento da complexidade espectral do sinal de excitação produzirá múltiplos componentes de harmônicos e de intermodulação, devido às múltiplas combinações dos tons fundamentais. A Fig. 19 mostra o espectro de um sinal de pressão sonora gerado por um sinal de multitom com frequências espaçadas linearmente e de mesma amplitude. É importante que a excitação não cubra totalmente o espectro e que existam frequências não excitadas, pois é nestas frequências que é possível detectar as distorções causadas pelas não-linearidades. Há muitas interferências e não se pode diferenciar os harmônicos dos produtos de intermodulação por soma e diferença. Uma medida adicional sem excitação permite medir o piso de ruído devido a ruídos do ambiente.

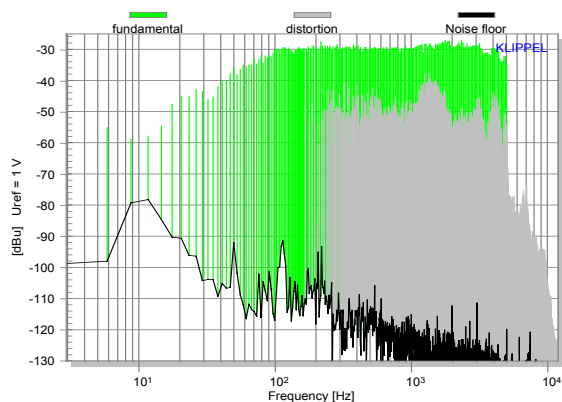


Fig. 19: Espectro de pressão sonora de um sinal de multitom

Há uma diferença quase constante de aproximadamente 15 dB entre as fundamentais e os componentes de distorção para o alto-falante exemplificado na Fig. 19. Vemos novamente que a assimetria do fator de força $Bl(x)$ gera um alto nível de distorção ($> 20\%$), quando um tom grave causa um grande deslocamento modulando um tom (voz) de alta frequência. É típico que as distorções por intermodulação, neste tipo de alto-falante, se concentrem cerca e acima da frequência de voz. Acima de 5 kHz, onde os sinais de multitom não produzem deslocamento, não se produz muita distorção ($< 1\%$) porque são apenas gerados harmônicos e intermodulação por soma entre as fundamentais de alta frequência. Vemos, novamente, que os harmônicos não são os componentes mais críticos da distorção em alto-falantes. Outras linearidades tais como as devidas a $C_{ms}(x)$, $L_c(x)$ e efeito Doppler, produzem uma forma característica de distorção que pode ser comparada a uma impressão digital do alto-falante.

5.3 Testando com música

A técnica de Auralização permite investigar as variáveis de estado calculadas e os componentes da distorção separadamente, em tempo real para qualquer sinal de entrada (música, voz, ou sinais de teste). O comportamento do falante exemplificado foi investigado com três peças musicais (do CD “Fast Car – Tracy Chapman”)

| Peça | Tempo | Título | Trilha | Propriedades |
|------|-------------|---------------------|--------|---------------------|
| 1 | 0 ... 300 s | Baby can I hold you | 5 | Grande deslocamento |
| 2 | 300... 600s | Behind the wall | 4 | Vocal, na maioria |
| 3 | 600... 900s | Mountains o'things | 6 | Bastante graves |

As três trilhas diferem nas propriedades espectrais do sinal. A Fig. 20 mostra a potência de entrada P e a temperatura da bobina móvel T_V versus o tempo de medida, t . Devido à alta eficiência do motor utilizado no exemplo, o aquecimento da bobina móvel e a compressão térmica da potência de saída, são negligíveis.

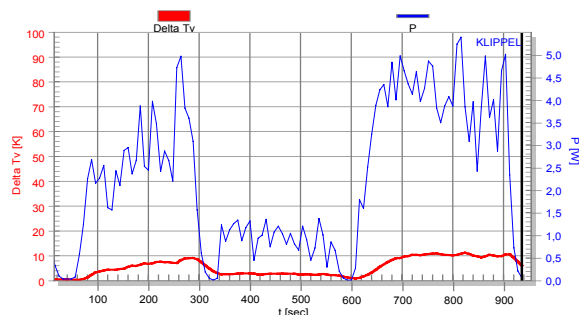


Fig. 20: Potência de entrada real P (linha fina) e temperatura da bobina móvel T_V (linha em negrito) durante a Auralização

Obviamente, a segunda peça com solo vocal proporciona a menor potência de entrada P e gera apenas pequenos deslocamentos da bobina móvel, como ilustrado na Fig. 21. A primeira peça produz o máximo deslocamento da bobina móvel, cerca de 10 mm. Encontramos aqui um componente DC gerado dinamicamente que empurra a bobina móvel, na direção negativa, em mais de 1 mm.

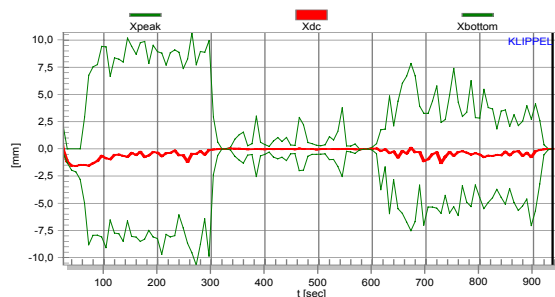


Fig. 21: Máximo deslocamento positivo e negativo X_{peak} e X_{bottom} e componente DC X_{DC} (linha em negrito) durante a Auralização

A Fig. 22 mostra a contribuição de cada não-linearidade como uma relação entre o valor de pico da distorção referido ao valor total do nível de pressão sonora (SPL). Obviamente o fator de força é a causa dominante da distorção para todos os três exemplos musicais. A distorção excede 60% na primeira peça onde o deslocamento de pico alcança cerca de 10 mm. A distorção produzida pela indutância da bobina móvel é de cerca de 20% na primeira e terceira peça, mas menos do que 10% para a segunda peça. A suspensão não linear produz mais do que 15% de distorção durante a primeira peça; menos do que 0.1% durante a segunda peça e, cerca de 2% distorção durante a última peça musical.

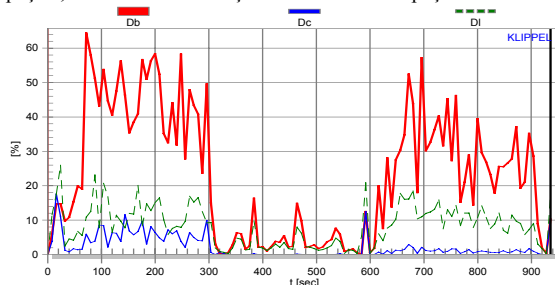


Fig. 22: Valor de pico das distorções instantânea d_b , d_c and d_l geradas pelo fator de força (linha em negrito), suspensão (linha fina) e pela indutância (linha pontilhada)

As distorções e as variáveis de estado são os resultados objetivos da Auralização. Ao mesmo tempo, testes por audições sistemáticas

podem ser efetuados para avaliara o seu impacto na qualidade sonora. A alta distorção por intermodulação pode ser detectada facilmente na aspreza da reprodução da voz quando um tom grave gera, simultaneamente, um alto deslocamento. A maioria dos ouvintes não ficaria satisfeita com o desempenho do alto-falante exemplificado em grandes amplitudes.

6 Soluções para o alto-falante

Baseando-se no diagnóstico detalhado do falante exemplificado, podemos tirar conclusões para correções práticas. Um ajuste de 2 mm da posição da bobina móvel na direção positiva (para fora), é necessário para trazer a bobina móvel para o máximo de Bl e obter uma característica simétrica. Esta é a correção mais efetiva que pode ser efetuada com facilidade sem afetar custos, peso e tamanho do falante, mas produz mais sensibilidade, um comportamento mais estável e menos distorção.

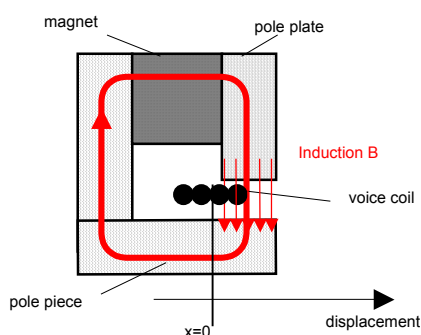


Fig. 23: Compensação da posição de repouso da bobina móvel

A simulação numérica mostra a melhoria no desempenho com a correção virtual do falante. Usando-se uma curva de $Bl(x)$ deslocada e todos os outros parâmetros do falante A, podemos calcular as distorções de segunda e terceira ordens, como na Fig. 24.

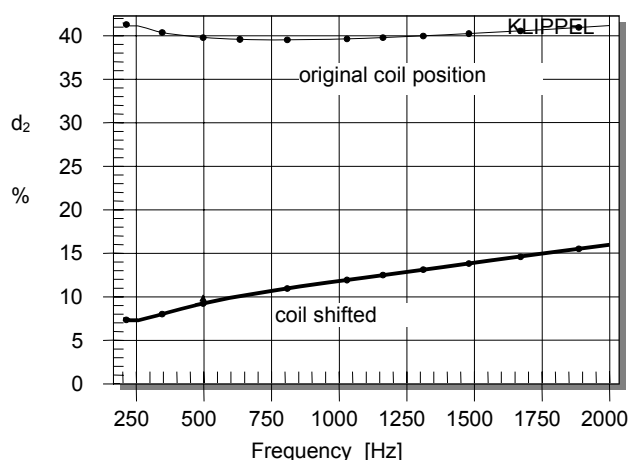


Fig. 24: Distorção por Intermodulação, antes (linha pontilhada) e depois (linha em negrito) da correção da posição de repouso da bobina móvel

A distorção de segunda e terceira ordem podem ser reduzidas em 12 dB e são limitadas apenas pela distorção de efeito Doppler, que

pode ser identificada facilmente por uma rampa crescente de 6 dB/oitava.

A suspensão do driver exemplificado não necessita muita atenção porque a curva de rigidez é suficientemente simétrica e a excursão de trabalho definida pela suspensão excede a capacidade do motor, definida pela largura da bobina móvel. Um anel de curto não é necessário porque a distorção Doppler é quase 20 dB maior que a causada pela não-linearidade da indutância. $L_e(x)$.

7 Conclusão

Extensa modelagem dos alto-falantes abre novos caminhos para descrever e compreender o comportamento dos alto-falantes em regime de grandes sinais. Novas técnicas de medida foram desenvolvidas para avaliar, não apenas os efeitos e sintomas mas também identificar as causas das distorções do sinal, expressas como um conjunto de parâmetros de grandes sinais. Cada parâmetro, lineares, não lineares e térmicos podem ser facilmente interpretados e são a base para o diagnóstico de alto-falantes. Esta informação é não apenas crucial para a otimização dos falantes mas, também para o projeto de sistemas de alto-falantes, que se baseiam em especificações confiáveis dos falantes. Um nova técnica de Auralização torna possível combinar as avaliações objetivas e subjetivas, usadas por engenheiros e profissionais de marketing. Isto é importante para definir o objetivos de um determinado alto-falante com clareza e para desenvolver produtos com desempenho ótimo em custo, peso, tamanho, em um tempo mais curto. As novas ferramentas permitem também o controle de qualidade da produção, para identificar defeitos, reduzir o número de unidades rejeitadas e fabricar produtos mais consistentes.

8 Referências

- [1] R. H. Small, „Direct-Radiator Loudspeaker System Analysis,“ *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, pp. 383 – 395 (1972 June).
- [2] R.H. Small, „Closed-Box Loudspeaker Systems, Part I: Analysis,“ *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 20, pp. 798 – 808 (1972 Dec.).
- [3] A. N. Thiele, „Loudspeakers in Vented Boxes: Part I and II,“ in *Loudspeakers*, vol. 1 (Audio Eng. Society, New York, 1978).
- [4] D. Button, “A Loudspeaker Motor Structure for Very High Power Handling and High Linear Excursion,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 36, pp. 788 – 796, (October 1988).
- [5] C. A. Henricksen, “Heat-Transfer Mechanisms in Loudspeakers: Analysis, Measurement, and Design,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 35, pp. 778 – 791, (October 1987).
- [6] E. R. Olsen and K.B. Christensen, “Nonlinear Modeling of Low Frequency Loudspeakers - a more complete model,” presented at the 100th convention Audio Eng. Soc., Copenhagen, May 11-14, 1996, preprint 4205.
- [7] M.H. Knudsen and J.G. Jensen, “Low-Frequency Loudspeaker Models that Include Suspension Creep,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 41, pp. 3 - 18, (Jan./Feb. 1993).
- [8] A. Dobrucki, “Nontypical Effects in an Electrodynamic Loudspeaker with a Nonhomogeneous Magnetic Field in the Air Gap and Nonlinear Suspension,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 42, pp. 565 - 576, (July/Aug. 1994).
- [9] A. J. M. Kaizer, “Modeling of the Nonlinear Response of an Electrodynamic Loudspeaker by a Volterra Series Expansion,” *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 35, pp. 421-433 (1987 June).

- [10] W. Klippel, "Nonlinear Large-Signal Behavior of Electrodynamic Loudspeakers at Low Frequencies," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 40, pp. 483-496 (1992).
- [11] J.W. Norris, "Nonlinear Dynamical Behavior of a Moving Voice Coil," presented at the 105th Convention of the Audio Engineering Society, San Francisco, September 26-29, 1998, preprint 4785.
- [12] D. Clark, "Precision Measurement of Loudspeaker Parameters," *J. Audio Eng. Soc.* vol. 45, pp. 129 - 140 (1997 March).
- [13] W. Klippel, "Measurement of Large-Signal Parameters of Electrodynamic Transducer," presented at the 107th Convention of the Audio Engineering Society, New York, September 24-27, 1999, preprint 5008.
- [14] W. Klippel, "Distortion Analyzer – a New Tool for Assessing and Improving Electrodynamic Transducer," presented at the 108th Convention of the Audio Engineering Society, Paris, February 19-22, 2000, preprint 5109.
- [15] W. Klippel, "Diagnosis and Remedy of Nonlinearities in Electro-dynamical Woofers," presented at the 109th Convention of the Audio Engineering Society, Los Angeles, September 22-25, 2000, preprint 5261.
- [16] W. Klippel, "Assessment of Voice Coil Peak Displacement X_{max} ," presented at the 112th Convention of the Audio Engineering Society, 2002 May 10–13, Munich, Germany.
- [17] W. Klippel, "Speaker Auralization – Subjective Evaluation of Nonlinear Distortion," presented at the 110th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, May 12-15, 2001, preprint 5310.
- [18] W. Klippel, U. Seidel, "Fast and Accurate Measurement of Linear Transducer Parameters," presented at the 110th Convention of the Audio Engineering Society, Amsterdam, May 12-15, 2001, preprint 5308.
- [19] W. Klippel, "Prediction of Speaker Performance at High Amplitudes," presented at the 111th Convention of the Audio Engineering Society, 2001 September 21–24, New York, NY, USA, preprint 5418.