



IPI
INSTITUTO
NACIONAL
DA PROPRIEDADE
INDUSTRIAL
Assinado
Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº PI 0900638-9

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 0900638-9

(22) Data do Depósito: 18/02/2009

(43) Data da Publicação Nacional: 01/12/2009

(51) Classificação Internacional: G01V 1/38; G01V 1/20.

(30) Prioridade Unionista: US 12/072,455 de 26/02/2008.

(54) Título: VIBRADOR SÍSMICO MARÍTIMO

(73) Titular: PGS GEOPHYSICAL AS, Sociedade Norueguesa. Endereço: Strandveien 4, N-1366 Lysaker, NORUEGA(NO)

(72) Inventor: STIG RUNE LENNART TENGHAMN.

Prazo de Validade: 10 (dez) anos contados a partir de 29/10/2019, observadas as condições legais

Expedida em: 29/10/2019

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"VIBRADOR SÍSMICO MARÍTIMO"**.

Antecedentes da Invenção

Campo da Invenção

- 5 A presente invenção refere-se à exploração geofísica marítima e particularmente a uma fonte vibratória útil em exploração geofísica marítima.

Antecedentes da Técnica

- Fontes sísmicas, incluindo fontes vibratórias, são utilizadas em exploração geofísica em solo e em áreas cobertas por água da terra. Sinais gerados por estas fontes se deslocam para baixo para dentro da terra e são refletidos por interfaces de reflexão no subsolo e são detectados por detectores de sinal, tipicamente hidrofones ou geofones, na superfície da terra ou perto dela.
- 10

- A maioria das fontes acústicas empregadas atualmente em operações marítimas é do tipo impulsivo, no qual esforços são feitos para gerar tanta energia quanto possível durante um intervalo de tempo tão curto quanto possível. O conteúdo de frequência de tais fontes é controlável somente em um pequeno grau, e diferentes fontes são selecionadas para a geração de diferentes faixas de frequências para diferentes necessidades de levantamento. Fontes acústicas vibratórias, incluindo fontes energizadas hidráulicamente e fontes empregando material piezelétrico ou magnetostriativo, têm sido usadas em operações marítimas. Entretanto, tais fontes têm encontrado somente uso limitado. Embora tais fontes possam gerar sinais através de várias bandas de frequência, comumente referidas como "varreduras de frequência", a potência limitada que tais fontes conhecidas na técnica anterior têm sido capazes de gerar têm limitado o seu uso em operações marítimas.
- 15
- 20
- 25

- É bem conhecido que à medida que ondas sonoras se deslocam através da água e através de estruturas geológicas de subsolo, ondas sonoras de frequência mais alta são atenuadas mais rapidamente do que ondas sonoras de frequência mais baixa e, conseqüentemente, ondas sonoras de frequência mais baixa podem ser transmitidas sobre maiores distâncias atra-
- 30

vés da água e de estruturas geológicas do que ondas sonoras de frequência mais alta. Tem existido por um longo tempo uma necessidade no setor sísmico da indústria de óleo e gás para fontes sonoras marítimas de baixa frequência poderosas.

- 5 Desta maneira, existe uma necessidade contínua de fontes acústicas aperfeiçoadas para uso em operações marítimas.

Sumário da Invenção

- Um vibrador marítimo que em uma modalidade particular inclui um invólucro externo modelado substancialmente de forma elíptica, um acionador tendo uma primeira e segunda extremidade, pelo menos uma mola externa conectada entre a primeira extremidade e a segunda extremidade do acionador, e pelo menos uma mola interna conectada entre a primeira extremidade e a segunda extremidade do acionador. Uma ou mais massas são fixadas à mola interna. Pelo menos um elemento de transmissão conecta a
- 10 mola externa e o invólucro externo, o qual transmite energia acústica para dentro da água. As molas externa e interna e as massas fixadas à mola interna são selecionadas para gerar uma primeira frequência de ressonância e uma segunda frequência de ressonância dentro da faixa de frequências entre 1 Hz e 300 Hz.

20 Breve Descrição dos Desenhos

A figura 1 mostra uma implementação específica da invenção tal como seria implementada para operações marítimas.

A figura 2 mostra uma modalidade da invenção em seção transversal parcial.

- 25 A figura 3 mostra a mola externa de uma modalidade da invenção.

A figura 4 mostra a mola externa em combinação com o acionador.

- A figura 5 mostra a mola externa em combinação com o acionador, em combinação com uma mola interna com massa acrescentada.
- 30

A figura 6 mostra um espectro de amplitude simulado com duas ressonâncias.

Descrição de uma Modalidade Preferida

A impedância total que será experimentada por um vibrador marítimo pode ser expressada como se segue:

$$Z_r = R_r + jX_r \quad (\text{Equação 1})$$

5 onde

Z_r é impedância total,

R_r é impedância de radiação, e

X_r é impedância reativa.

Em uma análise da transferência de energia de um vibrador marítimo, o sistema pode ser aproximado a um êmbolo com defletor. Na expressão da impedância total que será experimentada, a impedância de radiação R_r de um êmbolo com defletor é:

$$R_r = \pi a^2 \rho_0 c R_1(x) \quad (\text{Equação 2})$$

e a impedância reativa é:

$$15 \quad X_r = \pi a^2 \rho_0 c X_1(x) \quad (\text{Equação 3})$$

onde

$$x = 2ka = \frac{4\pi a}{\lambda} = \frac{2\omega a}{c} \quad (\text{Equação 4})$$

e onde

$$R_1(x) = 1 - \frac{2}{x} J_1(x) \quad (\text{Equação 5})$$

20 e

$$X_1(x) = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(x \cos \alpha) \sin^2 \alpha d\alpha \quad (\text{Equação 6})$$

onde

ρ_0 = densidade da água, ω = frequência radial, k = número de onda, a = raio de pistão, c = velocidade do som, λ = comprimento de onda e

25 J_1 = função de Bessel da primeira ordem.

Usando a expansão de série de Taylor nas equações anteriores obtém-se:

$$R_1(x) = \frac{x^2}{2^2 1! 2!} - \frac{x^4}{2^4 2! 3!} + \dots \quad (\text{Equação 7})$$

$$X_1(x) = \frac{4}{\pi} \left[\frac{x}{3} - \frac{x^3}{3^2 \cdot 5} + \frac{x^5}{3^2 \cdot 5^2 \cdot 7} - \dots \right] \quad (\text{Equação 8}).$$

Para frequências baixas, quando $x=2ka$ é muito menor que 1, a parte real e a imaginária da expressão de impedância total podem ser aproximadas com o primeiro termo da expansão de Taylor. As expressões para frequências baixas, quando o comprimento de onda é muito maior do que o raio do pistão, se tornam:

$$R_1(x) \rightarrow \frac{1}{2} (ka)^2 \quad (\text{Equação 9})$$

$$X_1(x) \rightarrow \frac{8ka}{3\pi} \quad (\text{Equação 10}).$$

Segue-se que para frequências baixas, R será um pequeno número quando comparado a X, o que sugere uma geração de sinal de eficiência muito baixa. Entretanto, pela introdução de uma ressonância na extremidade inferior do espectro de frequência, energia acústica de baixa frequência pode ser gerada de forma mais eficiente. Na ressonância a parte imaginária (reativa) da impedância é cancelada, e a fonte acústica é capaz de transmitir de forma eficiente energia acústica para dentro da água.

A presente invenção, em uma modalidade preferida, compreende um vibrador marítimo que exhibe pelo menos duas frequências ressonantes dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse, tipicamente uma faixa entre 1 Hz e 300 Hz.

A figura 1 mostra uma implementação de um vibrador marítimo 19, de acordo com uma modalidade preferida da invenção, tal como seria implementada em operações marítimas. O vibrador marítimo 19 compreende a fonte vibradora 20 montada na estrutura 16. O suporte 14 é conectado ao topo da estrutura 16 e inclui os orifícios 24 que podem ser utilizados para instalar o vibrador em um ambiente marítimo. A figura 1 será discutida adicionalmente neste documento, mas para um melhor entendimento da invenção, é feita referência às figuras 2 a 5.

A figura 2 mostra uma modalidade da invenção em seção transversal parcial, a qual inclui o acionador 8, o qual pode ser um acionador

magnetostritivo, e o qual preferivelmente pode ser formado de Terfenol-D. Embora a modalidade particular da invenção descrita neste documento mostre somente um único acionador, uma modalidade na qual uma pluralidade de acionadores são utilizados em paralelo está dentro do escopo da invenção. A modalidade inclui adicionalmente a mola acionadora externa 3, conectada a cada extremidade 13 do acionador 8. Em uma implementação particular da invenção, a mola acionadora 3 pode ter uma forma elíptica. Na modalidade preferida na qual o acionador 8 compreende um acionador de Terfenol-D, o acionador 8 compreende adicionalmente conjunto de circuitos magnéticos (não mostrado especificamente) que gerará um campo magnético quando corrente elétrica é aplicada ao conjunto de circuitos magnéticos. O campo magnético fará com que as hastes de Terfenol-D se alonguem. Pela variação da magnitude da corrente elétrica, e consequentemente da magnitude do campo magnético, o comprimento do acionador 8 é variado. Tipicamente, ímãs permanentes são utilizados para aplicar um campo magnético de polarização às hastes de Terfenol-D e uma variação no campo magnético é gerada pela aplicação de uma corrente elétrica variando às bobinas elétricas que são formadas em volta das hastes de Terfenol-D. Variações no comprimento dos acionadores causam uma mudança correspondente nas dimensões da mola acionadora externa 3.

Também está mostrada na figura 2 a mola interna 4, com as massas 7 fixadas a ela. Tal como discutido adicionalmente a seguir, a mola acionadora interna 4, com as massas 7 fixadas a ela, é incluída para alcançar uma segunda frequência de ressonância de sistema dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse. Embora um sistema vibrador que inclua somente a mola externa 3 tipicamente apresentaria uma segunda frequência de ressonância, para sistemas tendo um tamanho adequado para uso em exploração geofísica marítima, a segunda frequência de ressonância seria muito mais alta do que as frequências dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse.

Os suportes de montagem 28, mostrados na figura 2, são conectados fixamente nas extremidades superior e inferior dos mesmos às

placas de extremidade superior e inferior 18 (mostradas na figura 1). O acionador 8 é conectado fixamente em uma localização central longitudinalmente do mesmo aos suportes de montagem 28, para manter um ponto de referência estável para o acionador 8. O movimento das extremidades 13 da haste acionadora 8 é irrestrito com referência aos suportes de montagem 28.

A modalidade da invenção da figura 2 inclui adicionalmente um invólucro externo 2, ao qual a mola externa 3 é conectada por meio dos elementos de transmissão 5. A forma do invólucro 2 é de uma maneira geral referida como um invólucro flextensional. Em uma implementação particular da invenção, o invólucro externo 2 compreende duas partes laterais que podem ser imagens espelhadas uma da outra e as duas vigas de extremidade 1, com as partes laterais sendo conectadas de modo articulado às vigas de extremidade 1 pelas articulações 6. A figura 2 mostra uma das partes laterais do invólucro externo 2, indicada na figura 2 como a parte lateral de invólucro 2a. Quando inteiramente montada, a segunda parte lateral de invólucro (não mostrada na figura 2), compreendendo substancialmente uma imagem espelhada da parte lateral de invólucro 2a, será conectada de modo articulado pelas articulações 6 às vigas de extremidade 1, para completar um invólucro flextensional circundando o acionador 8, a mola externa 3 e a mola interna 4 montados.

Com referência à figura 1, o vibrador marítimo 19 compreende adicionalmente as placas de extremidade superior e inferior 18. O invólucro externo 2 montado, compreendendo as duas partes laterais de invólucro e as duas vigas de extremidade 1 são fixados de modo selado às placas de extremidade superior e inferior 18. Embora o invólucro externo 2 seja encaixado de modo selado com as placas de extremidade superior e inferior 18, quando o vibrador marítimo 19 está em operação, o invólucro externo 2 apresentará movimento com relação às placas de extremidade 18, assim a conexão entre as placas de extremidade 18 e o invólucro externo 2 será uma conexão flexível, a qual pode ser fornecida, por exemplo, por meio de uma membrana flexível 22 (não mostrada detalhadamente).

Detalhes adicionais de uma implementação particular da inven-

ção estão mostrados nas figuras 3, 4 e 5. A figura 3 mostra a mola acionadora externa 3. Esta mola tem duas funções. Uma é transformar mudanças no comprimento do acionador magnetostritivo 8 em movimento do invólucro externo 2. A segunda função é formar um sistema ressonante para gerar energia acústica de forma mais eficiente em um ambiente marítimo. À medida que o comprimento do acionador 8 é encurtado, a parte central da mola acionadora 3 se deslocará para fora do acionador 8, e à medida que o acionador 8 é prolongado, a parte central da mola acionadora 3 se deslocará para dentro na direção do acionador 8. Este movimento da parte central da mola externa 3 é transferido para o invólucro externo 2, por meio dos elementos de transmissão 5. O movimento do invólucro externo será assim aprimorado com relação ao movimento do acionador, com a quantidade do aprimoramento, normalmente referida como o "fator de transformação", determinada pelo raio 10 da mola acionadora elíptica 3. O valor do fator de transformação tipicamente varia de 2 a 5, dependendo do raio da mola elíptica. Se maiores amplitudes com menores forças forem desejadas, um maior fator de transformação é selecionado. As duas seções da mola acionadora 3 são interligadas pelas placas acionadoras 9, as quais formam as extremidades superior e inferior 13 do acionador 8, quando o vibrador 20 está montado.

A figura 4 mostra a mola acionadora externa 3 com o acionador 8. A figura 4 mostra a mola acionadora 3 conectada ao acionador 8 por meio de uma placa acionadora 9, a qual é fixada a cada extremidade do acionador 8. As características da mola acionadora externa 3, acionador 8 e do invólucro externo 2 substancialmente determinam a primeira frequência de ressonância. Pela seleção da constante de mola da mola acionadora 3 uma frequência de ressonância pode ser alcançada na frequência desejada dentro de uma faixa de frequências sísmicas de interesse.

A figura 5 mostra o dispositivo de vibrador marítimo com a mola acionadora interna 4 com as massas 7 fixadas a ela. Esta mola acionadora interna 4 com as massas 7 fixadas a ela interagirá com o acionador 8 para determinar uma segunda frequência de ressonância. Pela seleção da cons-

tante de mola da mola acionadora interna 4 e da massa das massas 7 uma segunda frequência de ressonância pode ser alcançada em uma frequência desejada dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse. Esta segunda ressonância elevará a saída acústica do vibrador marítimo e gerará um espectro de amplitude quase plano entre a primeira e a segunda ressonância. Cada uma da mola externa 3 e a mola interna 4 pode ser formada de aço, fibra de vidro, fibra de carbono ou outro material flexível adequado.

A figura 6 mostra os resultados de uma simulação de elemento finito de um vibrador marítimo de acordo com uma modalidade preferida da invenção. A primeira frequência de ressonância 11 resulta substancialmente da interação da mola acionadora externa 3 e do acionador 8 com o invólucro externo 2. A segunda frequência de ressonância 12 resulta substancialmente da interação da mola acionadora interna 4 com as suas massas acrescentadas 7 e o acionador 8.

Na construção de qualquer implementação específica da invenção, análise de elemento finito pode ser utilizada tal como conhecido para os versados na técnica. Em qualquer tal análise, os princípios seguintes de operação são relevantes. Se o invólucro externo 2 for aproximado a um pistão, então, para frequências baixas, a carga de massa, ou a massa de fluido equivalente agindo no invólucro será:

$$M = \rho_0 \frac{8a^3}{3} \quad (\text{Equação 11})$$

onde, M é carga de massa,

ρ_0 é densidade da água, e

a é o raio equivalente para um pistão que corresponda ao tamanho do invólucro externo 2.

O invólucro externo 2 tem um fator de transformação $T_{\text{invólucro}}$ entre o eixo geométrico longo e o curto da sua elipse, de maneira que a deflexão das duas partes laterais de invólucro (a parte lateral 2a na figura 2 e a sua imagem espelhada no outro lado do invólucro externo 2) terá uma amplitude mais alta do que a deflexão das vigas de extremidade 1 (as quais interligam as duas partes laterais de invólucro 2) causada pelo movimento dos

elementos de transmissão 5. Adicionalmente, a mola externa 3 cria uma maior carga de massa no acionador 8 uma vez que a mola externa 3 também tem um fator de transformação entre o eixo geométrico longo e o eixo geométrico curto da sua elipse, com o eixo geométrico longo sendo substancialmente o comprimento do acionamento 8 e o eixo geométrico curto sendo a largura da mola modelada elipticamente. Referindo-se a este fator de transformação como T_{mola} , a carga de massa no acionamento 8 será:

$$M_{acionador} = (T_{invólucro})^2 \cdot (T_{mola})^2 \cdot \rho_0 \frac{8a^3}{3} \quad (\text{Equação 12}).$$

A primeira ressonância, $f_{ressonância}$, para o emissor acústico será substancialmente determinada pela seguinte relação massa-mola:

$$f_{ressonância} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_{acionador}}} \quad (\text{Equação 13})$$

onde:

K = constante de mola, e

$M_{externa}$ = carga de massa no acionamento 8.

K representa a constante de mola para a mola externa 3 combinada com o acionamento 8, onde a mola externa 3 é conectada ao invólucro externo 2, por meio dos elementos de transmissão 5, viga de extremidade 1 e das articulações 6.

Para alcançar transmissão de energia eficiente com a faixa de frequências sísmicas de interesse, é importante alcançar uma segunda frequência de ressonância dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse. Na ausência da mola interna, a segunda frequência de ressonância ocorreria quando a mola acionadora externa 3, agindo juntamente com o acionador 8, tivesse o seu segundo modo Eigen. Esta frequência de ressonância, entretanto, é normalmente muito mais alta do que a primeira frequência de ressonância e, desta maneira, estaria fora da faixa de frequências sísmicas de interesse. Tal como é evidente pela equação antecedente, a frequência ressonante será reduzida se a carga de massa na mola externa 3 for aumentada. Esta carga de massa pode ser aumentada pela adição de massa ao acionador 8, entretanto, a fim de acrescentar massa suficiente para alcançar

uma segunda frequência de ressonância dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse, a quantidade de massa que necessitaria ser acrescentada ao acionador tornaria um sistema como este impraticável para uso em operações sísmicas marítimas.

5 De acordo com a presente invenção, uma segunda mola, a mola acionadora interna 4, é incluída dentro da mola acionadora externa 3 com as massas acrescentadas 7 no lado da mola interna 3. O efeito de tal massa acrescentada é equivalente a acrescentar massa na extremidade do acionador 8.

$$10 \quad M_{\text{interna}} = (T_{\text{interna}})^2 \cdot M_{\text{acrescentada}} \quad (\text{Equação 14})$$

A mola extra, a mola acionadora interna 4, terá um fator de transformação T_{interna} igualmente e aumentará a carga de massa no acionador de Terfenol 8. O uso da mola interna 4, com a massa acrescentada 7 permite que a segunda ressonância do sistema seja sintonizada de maneira
15 que a segunda ressonância fique dentro da faixa de frequências sísmicas de interesse, aperfeiçoando assim a eficiência do emissor acústico na faixa sísmica.

$$f_{\text{ressonancia2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{\text{interna}} + K_{\text{acionador}}}{(T_{\text{interna}})^2 \cdot M_{\text{acrescentada}}}} \quad (\text{Equação 15})$$

onde:

20 K_{interna} = constante de mola da mola interna;

$K_{\text{acionador}}$ = constante de mola da montagem acionadora externa.

A invenção não somente criará duas ressonâncias nas frequências de interesse, mas ela também tornará possível criar grandes amplitudes para este tipo de transmissores acústicos.

25 Embora a invenção tenha sido descrita com relação a um número limitado de modalidades, os versados na técnica, tendo o benefício desta descrição, perceberão que outras modalidades podem ser imaginadas sem fugir do escopo da invenção tal como revelado neste documento. Desta maneira, o escopo da invenção deve ser limitado somente pelas reivindicações
30 anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Vibrador sísmico marítimo (19) compreendendo:
um invólucro externo (2) modelado substancialmente de forma elíptica;
- 5 um acionador (8) tendo uma primeira e segunda extremidade (13);
 pelo menos uma mola externa (3) conectada entre a primeira
extremidade e a segunda extremidade (13) do acionador (8);
caracterizado pelo fato de que compreende ainda:
 pelo menos uma mola interna (4) conectada entre a primeira ex-
- 10 tremidade e a segunda extremidade do acionador (8), a mola interna (4) ten-
do uma ou mais massas (7) fixadas a ela;
 pelo menos um elemento de transmissão (5) conectando a mola
externa (3) com o dito invólucro externo (2); e
 em que as molas e as massas (7) são selecionadas para gerar
- 15 uma primeira frequência de ressonância (11) e uma segunda frequência de
ressonância (12) dentro de uma faixa de frequências entre 1 Hz e 300 Hz.
2. Vibrador sísmico marítimo, de acordo com a reivindicação 1,
caracterizado pelo fato de que o dito acionador (8) compreende um acio-
nador magnetostritivo.
- 20 3. Vibrador sísmico marítimo, de acordo com a reivindicação 2,
caracterizado pelo fato de que o acionador magnetostritivo compreende
Terfenol-D.
4. Vibrador sísmico marítimo, de acordo com a reivindicação 1,
caracterizado pelo fato de que a mola acionadora externa (3) juntamente
- 25 com o acionador (8) e o invólucro externo (2) determinam uma primeira fre-
quência de ressonância (11) do vibrador marítimo (19).
5. Vibrador sísmico marítimo, de acordo com a reivindicação 4,
caracterizado pelo fato de que a mola acionadora interna (4) e as massas
(7) fixadas à ela e o acionador (8) determinam uma segunda frequência de
- 30 ressonância (12) do vibrador marítimo (19).
6. Vibrador sísmico marítimo, de acordo com a reivindicação 1,
caracterizado pelo fato de que o invólucro externo (2) é um invólucro flex-
tensional.

1/4

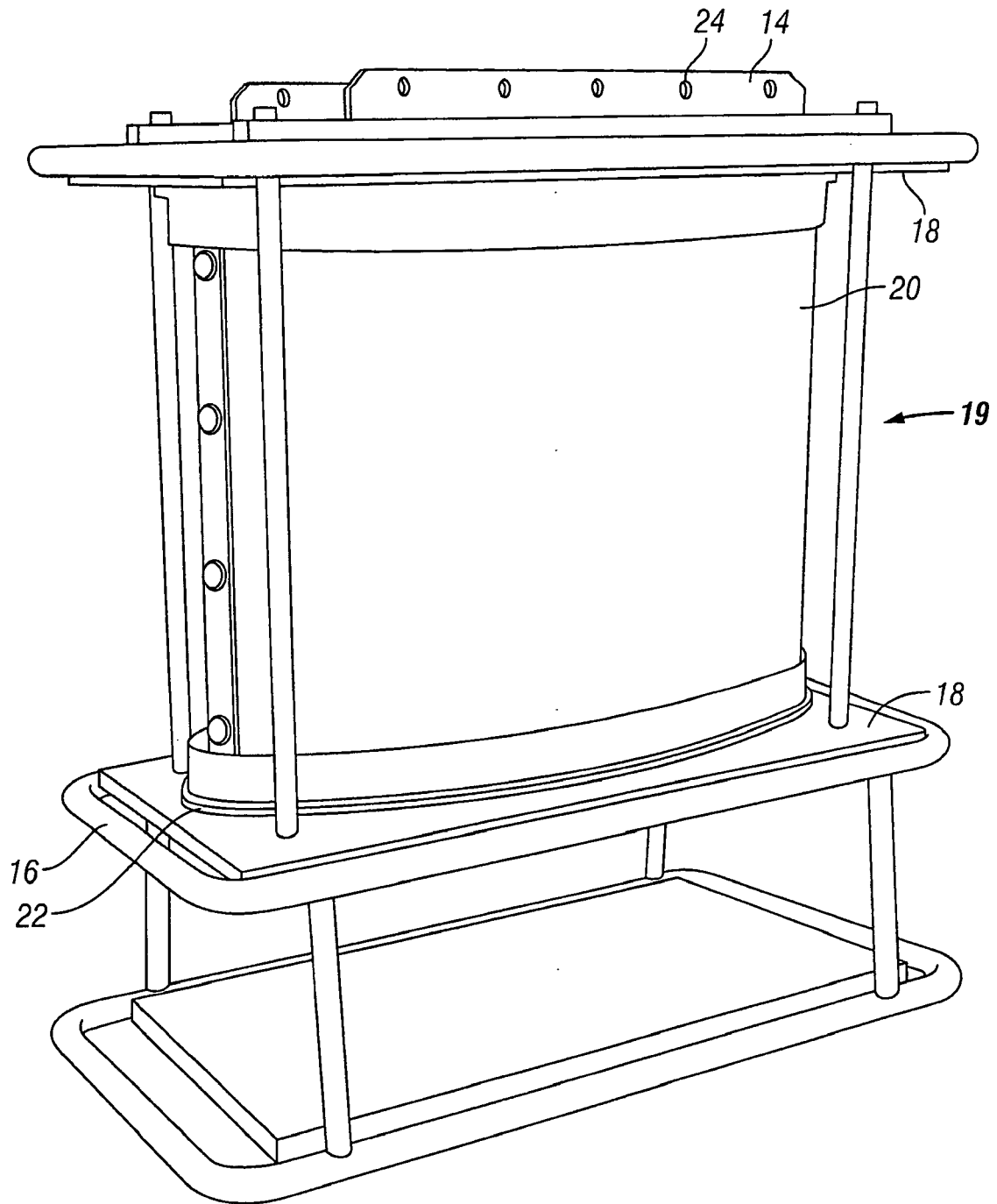


FIG. 1

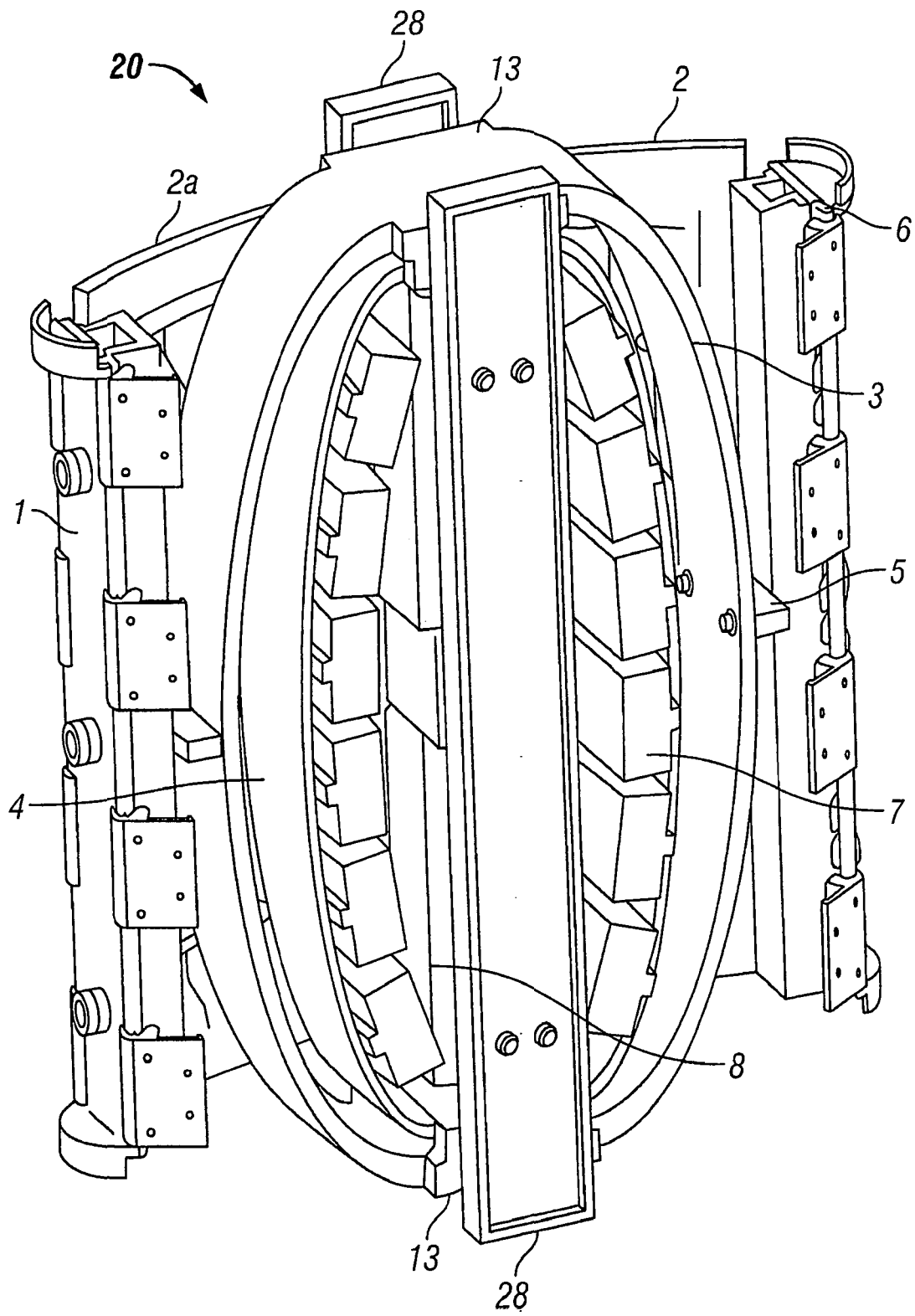


FIG. 2

3/4

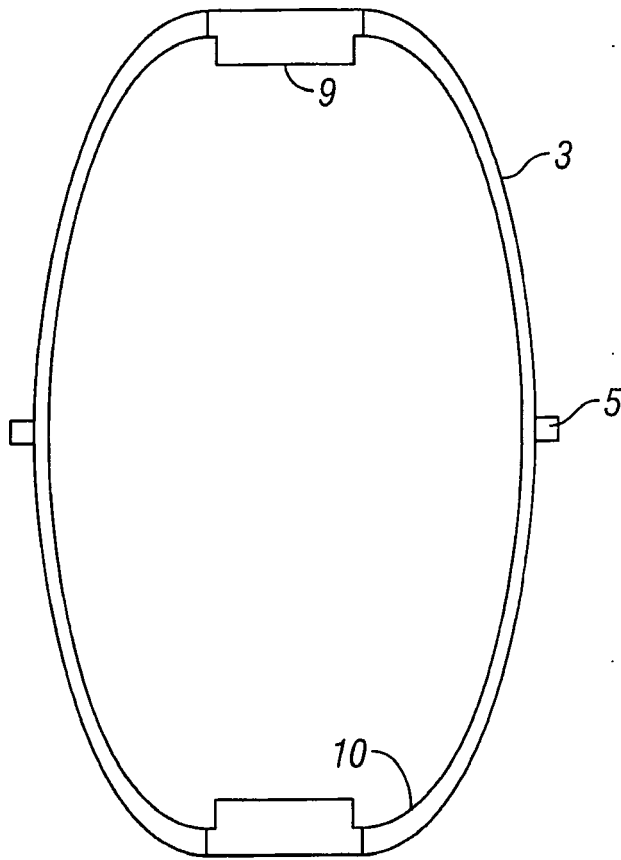


FIG. 3

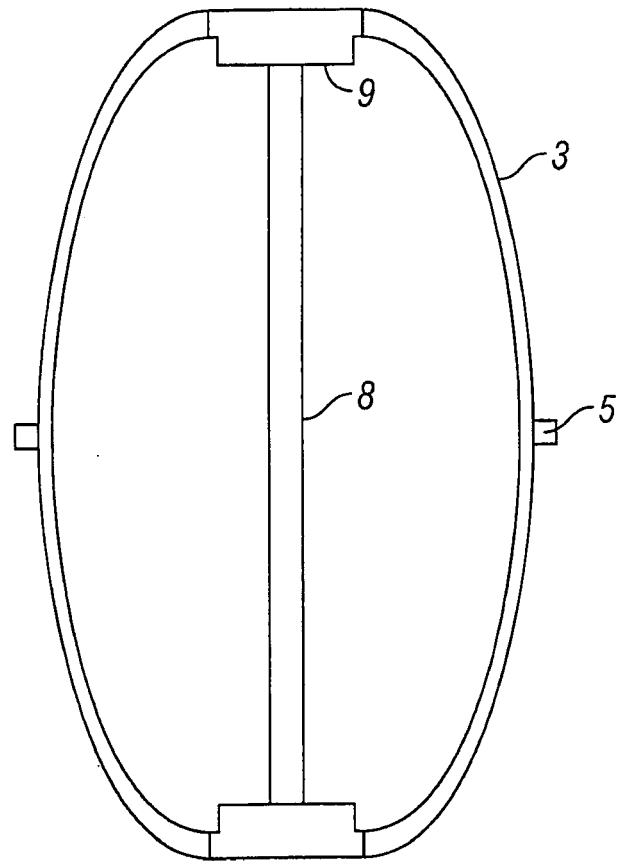


FIG. 4

4/4

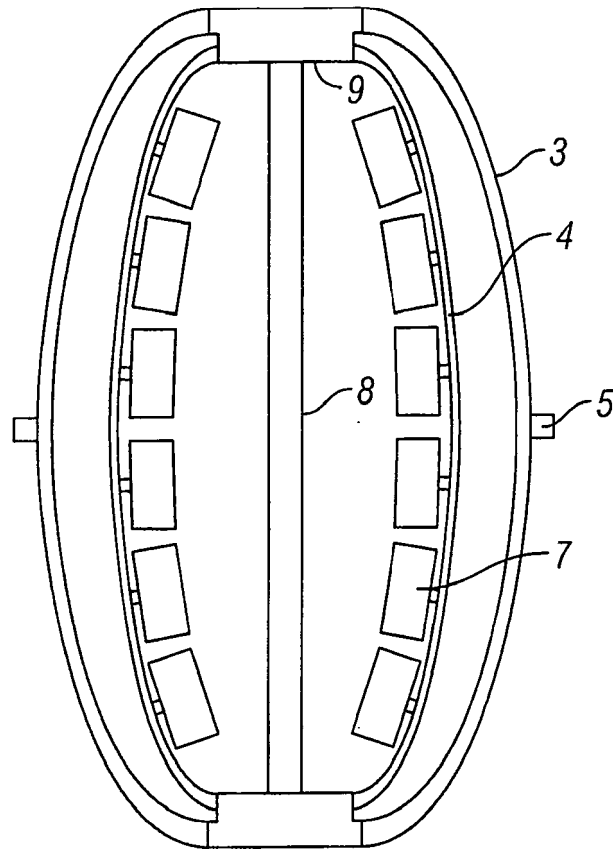


FIG. 5

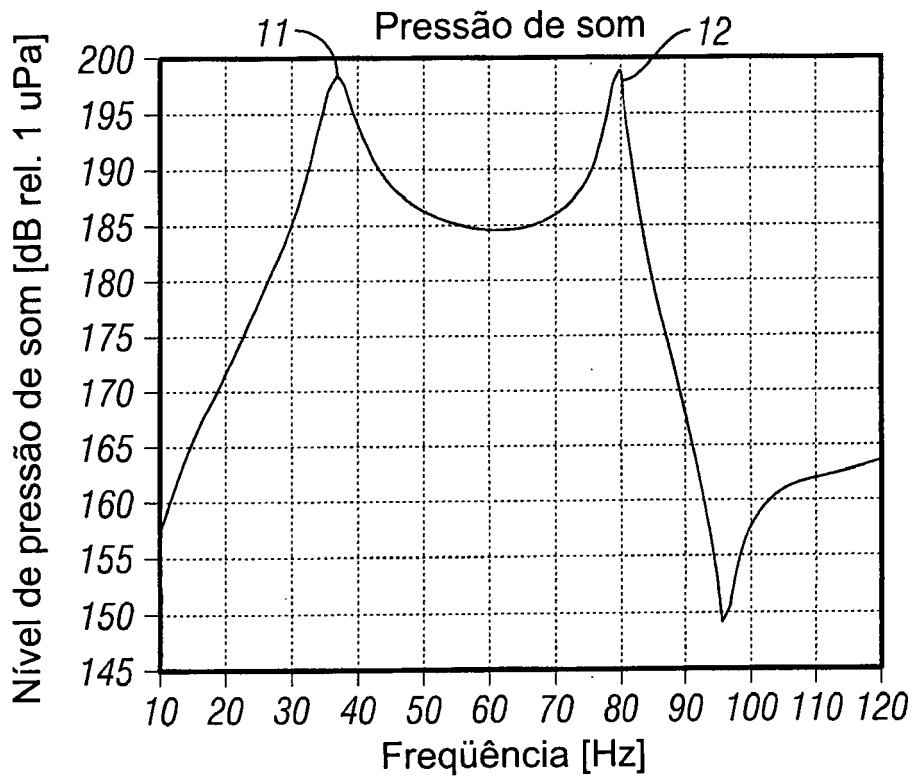


FIG. 6