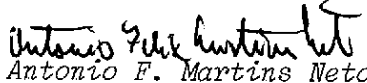
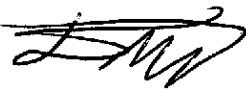
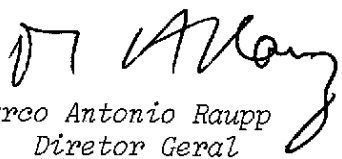


1. Publicação nº INPE-3931-PRE/963	2. Versão	3. Data Junho, 1986	5. Distribuição ☐ Interna ☒ Externa ☐ Restrita
4. Origem DMC/DGC	Programa A81		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) ELETROVALVULA VÁLVULA DE CONTROLE VÁLVULA SOLENOIDE			
7. C.D.U.: 629.7.05:629.783			
8. Título MODELAGEM DO FUNCIONAMENTO TRANSITÓRIO DE UMA SOLENÓIDE DE CONTROLE		INPE-3931-PRE/963	
		10. Páginas: 06	
		11. Última página: 05	
		12. Revisada por	
9. Autoria Ismael Emílio de Oliveira Júnior Eduardo Augusto Gomes Pereira		 Antonio F. Martins Neto	
		13. Autorizada por	
Assinatura responsável 		 Marco Antonio Raupp Diretor Geral	
14. Resumo/Notas Neste trabalho, faz-se a modelagem matemática de uma eletroválvula de controle que se encontra em fase de desenvolvimento no INPE. A eletroválvula compõe-se, basicamente, de um corpo rígido que serve de base para o solenoide. Um cursor movimenta-se dentro desta base e sua posição determina a área de passagem do propelente. Uma mola atua continuamente no sentido de manter fechada esta passagem. O objetivo final desse modelo é obter a posição do cursor em função do tempo, pois a partir deste resultado é possível obter o empuxo dos atuadores, até mesmo durante os transitórios de ligamento e desligamento. Para o estudo do circuito magnético, utilizou-se a analogia entre circuitos elétricos e magnéticos. A bobina da válvula foi modelada como a associação de um resistor e um indutor, sendo-lhe aplicada uma tensão na forma de uma função degrau. Levou-se em conta a variação da permeabilidade magnética dos materiais, de forma que nem as relutâncias, nem a indutância puderam ser consideradas constantes. Os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios: as curvas da posição do cursor em função do tempo estão de acordo com previsões feitas com base em experiências realizadas, as curvas da corrente em função do tempo também estão de acordo com o encontrado na literatura disponível e os gráficos da indutância demonstram que realmente não seria possível considerá-la constante.			
15. Observações Trabalho submetido ao 2º Congresso Latinoamericano de Control Automático (13-17 de outubro de 1986 - Argentina).			

MODELAGEM DO FUNCIONAMENTO TRANSITÓRIO DE UMA VÁLVULA SOLENÓIDE DE CONTROLE

Ismael Emílio de Oliveira Júnior
Eduardo Augusto Gomes Pereira

Departamento de Mecânica Espacial e Controle

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT
12200 - São José dos Campos - SP - Brasil
Telex: (011) 33530

RESUMO

A exatidão do posicionamento de um satélite é garantida por um Sistema de Controle de Atitude, no qual a válvula de controle é um dos principais fatores determinantes dos tempos de resposta dos atuadores. Neste trabalho, faz-se a modelagem matemática de uma eletroválvula de controle que se encontra em fase de desenvolvimento no INPE e deverá ser empregada nos futuros satélites brasileiros. A válvula compõe-se, basicamente, de um corpo rígido que serve de base para o solenóide. Um cursor movimenta-se dentro desta base e sua posição determina a área de passagem do propelente. Uma mola atua continuamente no sentido de manter fechada esta passagem. O objetivo final deste modelo é obter a posição do cursor em função do tempo, pois a partir deste resultado é possível empregar as teorias de escoamento para obter o empuxo dos atuadores, até mesmo durante os transitórios de ligamento e desligamento. Para o estudo do circuito magnético, utilizou-se a analogia entre circuitos elétricos e magnéticos. A bobina da válvula foi modelada como a associação de um resistor e um indutor, sendo-lhe aplicada uma tensão na forma de uma função degrau. Levou-se em conta a variação da permeabilidade magnética dos materiais, de forma que nem as relutâncias, nem a indutância puderam ser consideradas constantes. Este fato provocou um acoplamento das equações diferenciais que descrevem o modelo, tornando necessário o uso de métodos numéricos para sua resolução. Os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios: as curvas da posição do cursor em função do tempo estão de acordo com previsões feitas com base em experiências realizadas, as curvas da corrente em função do tempo também estão de acordo com o encontrado na literatura disponível e os gráficos da indutância demonstram que realmente não seria possível considerá-la constante.

MODELLING OF THE TRANSIENT FUNCTIONING OF A SOLENOID CONTROL VALVE

ABSTRACT

The exactitude of the positioning of a satellite is guaranteed through an Attitude Control System, in which the control valve is one of the main factor for determining the response times of the actuators. In this work one makes the mathematical modelling of a control electrovalve which is in development stage at INPE and that shall be employed in the future Brazilian satellites. The valve is basically composed of a rigid body which serves as a base for the solenoid, a cursor moves inside this base and its position determines the passage area of the propellant. A spring acts continually in order to keep this passage closed. The final goal of this model is to obtain the cursor position as a function of time, for with this result it is possible to apply the flow theories in order to set the actuators thrust, including at the on and off transients. For the study of the magnetic circuit it was used the analogy between magnetic and electric circuits. The coil was modelled as the association of a resistor and an inductor, to which a step function tension is applied. One has taken into account the variation of the magnetic permeability of the materials, so that neither the reluctances nor the inductance could be considered constants. This fact caused a coupling among the differential equations that describe the model, making necessary the use of numerical methods to solve them. The obtained results were considered satisfactory: the curves of the time function cursor position are in accordance with previsions based on experiences; the curves of the time function current are also in accordance with accessible literature and the curves of the inductance have shown that it would not really be possible to consider it constant.

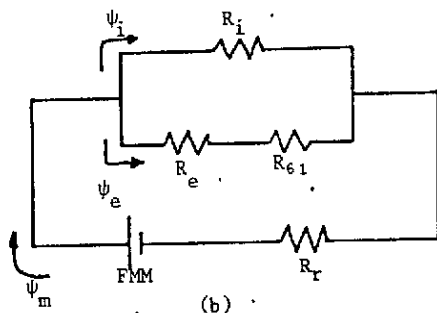
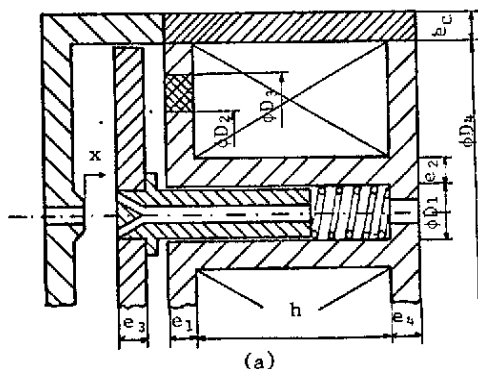
1. INTRODUÇÃO

A precisão de apontamento de um satélite frequentemente é alta. Assim, quando se usam jatos de gás no Sistema de Controle de Atitude, os transitórios de ligamento e desligamento adquirem importância fundamental. Os componentes que determinam estes tempos são: válvulas de controle, reservatórios de propelente, linhas de distribuição, válvulas reguladoras de pressão e micromotores propriamente ditos.

Neste trabalho é apresentado um modelo para um dos componentes mais importantes para a determinação dos tempos transitórios: a válvula de controle.

2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A Figura 1 mostra um esquema da válvula, bem como o circuito elétrico equivalente ao circuito magnético de acionamento.



- R_i - relutância do isolante;
 R_{61} - relutância no trecho 6-7-8-1, excluído o entreferro;
 ψ_m - fluxo magnético total;
 ψ_i - fluxo magnético no isolante;
 R_e - relutância do entreferro;
 R_r - relutância do resto do circuito;
 ψ_e - fluxo magnético no entreferro;
FMM - força magnetomotriz.

Fig. 1 - Válvula de controle: a) esquema; b) circuito elétrico equivalente.

Quando desligada, a válvula mantém-se fechada pela ação da mola sobre o cursor. Ao ser acionada, surge uma força magnética que,

ao superar o esforço da mola, provoca o deslocamento do cursor, abrindo a válvula. Ao ser desligada, a força magnética decresce e quando seu valor torna-se inferior ao esforço imposto pela mola, inicia-se o fechamento da válvula.

Considerando que a posição do cursor determina o estado da válvula, o transitório desta última pode ser obtido conhecendo a dinâmica do atuador.

Fazendo um balanço de forças no cursor, obtém-se:

$$m_c \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_m + F_{mo} \quad (1)$$

onde m_c é a massa do cursor, F_m a força magnética e F_{mo} a força da mola.

A força da mola é dada por:

$$F_{mo} = k \cdot (x_0 + x) \quad (2)$$

sendo k a constante da mola e x_0 seu deslocamento inicial.

Para o cálculo da força magnética utilizou-se a analogia entre circuitos magnéticos e elétricos. Nesta analogia, o fluxo magnético, a relutância e a força magnetomotriz correspondem, respectivamente, à intensidade de corrente, à resistência e à tensão.

De acordo com o princípio dos trabalhos virtuais, a força magnética entre os polos de um entreferro é calculada por:

$$F_m = \frac{dW_m}{dz} \quad (3)$$

sendo W_m a energia magnética do circuito, z o comprimento do entreferro ($z = x_{\max} - x$) e $x_{\max}$ o deslocamento máximo do cursor.

As seguintes hipóteses foram feitas para o equacionamento da força magnética:

- não há fugas através do circuito magnético;
- os fluxos magnéticos seguem os caminhos mostrados na Figura 1.a;
- a energia magnética no entreferro é muito maior que no resto do circuito;
- supõe-se que a densidade de fluxo magnético possui um valor médio para cada região, isto é, há um valor para o caminho 1-2-3-4-5-6, B_m , e outro para o caminho 6-7-8-1, B_{61} ;

Esta última hipótese está baseada no fato de o fluxo magnético, em um dado instante, ser constante em cada caminho (Y_e e Y_i) e a área da seção transversal ser variável. Desta forma, como a densidade de fluxo é dada genericamente por:

$$B = \frac{\psi}{S}$$

considerou-se uma área média para cada trecho, S_m e S_{61} , obtendo-se, assim, B_m e B_{61} .

A energia magnética acumulada no entreferro é dada por:

$$W_m = \frac{\psi_e^2 \cdot z}{2\mu_o \cdot S_{eq}} \quad (4)$$

sendo S_{eq} uma área "equivalente", como explicado na próxima seção.

Efetuada a substituição da Equação 4 na Equação 3 encontra-se:

$$F_m = \frac{\psi_e^2}{2\mu_o \cdot S_{eq}} \quad (5)$$

Da Figura 1 verifica-se:

$$\psi_m = \psi_e + \psi_i \quad (6)$$

Além disto, é válida a relação:

$$\psi_e \cdot (R_e + R_{61}) = \psi_i \cdot R_i \quad (7)$$

Definindo uma grandeza auxiliar Q como:

$$Q = \frac{R_i}{R_i + R_e + R_{61}} \quad (8)$$

e usando as Expressões 6 e 7, chega-se a:

$$\psi_e = Q \cdot \psi_m \quad (9)$$

O fluxo magnético ψ_m é dado por:

$$\psi_m = \frac{FMM}{R_{eq}} \quad (10)$$

sendo R_{eq} a relutância equivalente do circuito e a força magnetomotriz definida como:

$$FMM = N_e \cdot I \quad (11)$$

onde N_e é o número de espiras do solenóide e I é a corrente que o percorre. Logo,

$$\psi_e = \frac{Q \cdot N_e \cdot I}{R_{eq}} \quad (12)$$

Assim, a Equação 5 toma a forma:

$$F_m = \frac{1}{2\mu_o \cdot S_{eq}} \cdot \left(\frac{Q \cdot N_e \cdot I}{R_{eq}} \right)^2 \quad (13)$$

3 - CÁLCULO DAS RELUTÂNCIAS DO CIRCUITO

As relutâncias podem ser calculadas a partir da sua fórmula geral:

$$R = \int \frac{dl}{\mu \cdot S} \quad (14)$$

onde dl é a distância percorrida pelo fluxo magnético, S a área transversal e μ a permeabilidade magnética do material no trecho dl.

Aplicando esta equação ao circuito magnético, encontra-se:

$$R_i = \frac{K_r}{\mu_m} \quad (15)$$

$$R_i = \frac{1}{2\pi \cdot \mu_o \cdot e_1} \cdot \ln \frac{D_3}{D_2} \quad (16)$$

$$R_e = \frac{z}{\mu_o \cdot S_{eq}} \quad (17)$$

$$R_{61} = \frac{K_{61}}{\mu_{61}} \quad (18)$$

Nas equações acima, K_r e K_{61} são fatores geométricos, dados por:

$$K_r = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{1}{e_1} \cdot \ln \frac{(D_1+D_2) \cdot (D_4+e_c)}{(D_1+e_2) \cdot (D_3+D_4)} + \frac{1}{e_4} \cdot \ln \frac{D_4+e_c}{D_1+e_2} + (2h+e_1+e_4) \cdot \left[\frac{1}{e_c \cdot (D_4+e_c)} + \frac{1}{e_2 \cdot (D_1+e_2)} \right] \right\} \quad (19)$$

$$K_{61} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{e_1+e_3}{S_{eq}} + \frac{1}{\pi \cdot e_3} \cdot \ln \frac{D_3+D_4}{D_1+D_2} \right] \quad (20)$$

As permeabilidades μ_m e μ_{61} são valores calculados com base nas densidades de fluxo magnético médias, B_m e B_{61} , mencionadas anteriormente:

Verifica-se, pela Figura 1.a, a existência de dois entreferros associados em série: um entre os pontos 8 e 1 e outro entre os pontos 6 e 7. Cada um destes entreferros, tem uma área transversal por onde passa o fluxo magnético. A área S_{eq} é a associação destas duas áreas, e seu valor pode ser obtido da Equação 14 aplicada aos dois entreferros.

Analisando a Figura 1.b verifica-se que a relutância equivalente do circuito é dada por:

$$R_{eq} = R_r + \frac{R_i + R_e + R_{61}}{R_i \cdot (R_e + R_{61})} \quad (21)$$

4 - EQUACIONAMENTO DA CORRENTE

Para a obtenção da força magnética é necessário o conhecimento, a cada instante, da corrente do solenóide. Esta variável é calculada através da resolução do circuito elétrico da válvula, que é do tipo R-L com indutância variável. A equação que caracteriza este circuito é:

$$U = R \cdot I + L_c \cdot \frac{dI}{dt} + I \cdot \frac{dL_c}{dt} \quad (22)$$

Nesta equação, R representa a resistência do solenóide e L_c sua indutância. Uma vez que esta última é, por definição:

$$L_c = \frac{N_e \cdot \psi_m}{I} \quad (23)$$

e lembrando as Equações 10 e 11, fica-se com:

$$L_c = \frac{N_e^2}{R_{eq}} \quad (24)$$

Verifica-se, portanto, que L_c é função apenas de R_{eq} que, por sua vez, é função da posição do cursor e da intensidade de corrente. Então pode-se escrever:

$$\frac{dL_c}{dt} = \frac{\partial L_c}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial L_c}{\partial I} \cdot \frac{dI}{dt} \quad (25)$$

Desenvolvendo as derivadas parciais e definindo as seguintes grandezas auxiliares:

$$G_1 = 1 - \frac{K_r \cdot N_e \cdot I}{S_m \cdot R_{eq}^2} \cdot \frac{\mu_m'}{\mu_m^2} \quad (26)$$

$$G_2 = \frac{K_{61} \cdot Q^2 \cdot N_e \cdot I}{S_{61} \cdot R_{eq}} \cdot \frac{\mu_{61}'}{\mu_{61}^2} \quad (27)$$

$$G_3 = \frac{1}{R_i} + \frac{Q}{R_{eq} \cdot G_1} \quad (28)$$

onde μ_m' e μ_{61}' são as derivadas de μ em relação a B nos pontos B_m e B_{61} , chega-se a uma expressão para dL_c/dt que, substituída na Equação 22 e isolando-se dI/dt , fornece:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{R_{eq}}{N_e^2} \cdot \frac{R_{eq} \cdot G_1 \cdot (R_i - G_2) - Q \cdot R_i \cdot G_2}{R_{eq} \cdot (G_1 - 1) \cdot (R_i - G_2) - Q \cdot R_i \cdot G_2} \cdot \left(U + \right. \\ \left. - R \cdot I - \frac{N_e^2 \cdot I \cdot Q}{\mu_o \cdot S_{eq} \cdot R_{eq}^2 \cdot G_1 \cdot (1 - G_2 \cdot G_3)} \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (29)$$

Como se pode notar, as equações que descrevem o comportamento do modelo proposto devem ser resolvidas simultaneamente devido ao acoplamento entre as Equações 1, 11 e 29. Para a resolução deste conjunto de equações, empregou-se o método de Runge-Kuta de quarta ordem acelerado pelo algoritmo de Hamming.

5 - RESULTADOS E CONCLUSÕES

Para verificar a consistência das equações acima, foram resolvidos casos genéricos. Embora as dimensões das válvulas tomadas como exemplo não fossem otimizadas, os tempos transitórios obtidos estão em concordância com os resultados de testes de válvulas existentes.

A Figura 3 a seguir mostra a variação da força magnética, da intensidade de corrente, da posição do cursor e da indutância em função do tempo. Para este caso, as principais dimensões da válvula são: $U = 24$ V; $D_1 = 4$ mm; $D_4 = 28$ mm; $h = 34$ mm; $F_{mo} = 15$ N; $N_e = 6.691$ espiras.

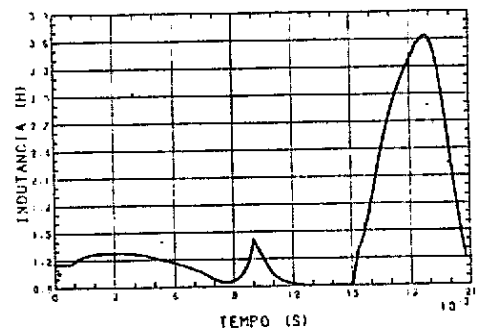
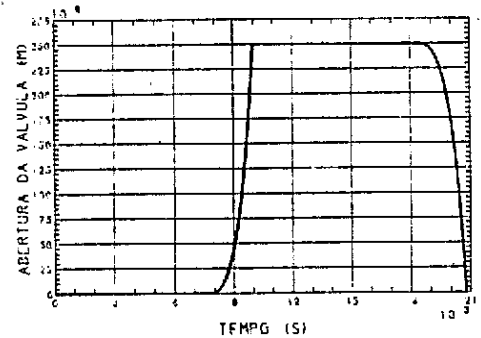
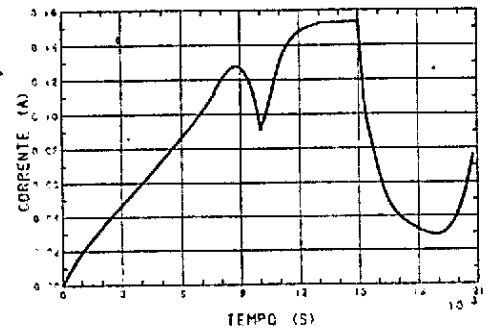
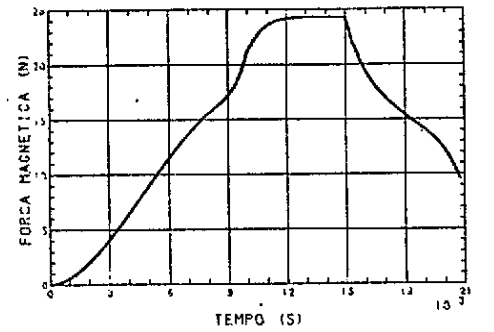


Fig. 2 - Gráficos obtidos para o exemplo.

Como se pode notar, para o exemplo mostrado, a indutância apresenta variações significativas, não podendo ser considerada constante, o que justifica o equacionamento desenvolvido para o cálculo da corrente.

O modelo exposto apresentou resultados coerentes com a literatura existente. Em

etapa posterior deverão ser construídos e testados protótipos específicos, de maneira a confirmar a validade deste equacionamento. Assim, a aplicação deste modelo proporcionará um avanço na análise e no desenvolvimento do projeto de eletroválvulas monoestáveis.

6 - BIBLIOGRAFIA

PEREIRA, E.A.G.; OLIVEIRA Jr., I.E. Análise da força magnética de acionamento de uma eletroválvula de controle. Seminário ADUNESP, 6., Guaratinguetá, SP, 4-9 nov., 1985. 8p.

OLIVEIRA Jr., I.E.; PEREIRA, E.A.G. Modelling of a cold gas jet for satellite attitude control. TELECOM, Rio de Janeiro, RJ, dez. 10-13, 1985. 8p.

KRAUS, J.D.; CARVER, K.R. Eletromagnetismo. 2.ed. Rio de Janeiro. Guanabara Dois, 1978.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Metals handbook.