

O Programa SENSI

Documentação válida para a versão 5.0c.

1 - Introdução

O programa SENSI analisa circuitos lineares e invariantes no tempo, utilizando uma forma compacta da análise nodal modificada, e o método da rede adjunta para a análise de sensibilidades.

Da análise podem ser obtidos:

- Módulo fase e atraso de grupo de uma função de transferência.
- Sensibilidades.
- Desvios estatísticos de módulo e fase.
- Sensibilidade de pólos e zeros.
- Desvios estatísticos de pólos e zeros.
- Análise de faixa dinâmica.

2 - Parâmetros de entrada para o programa

O programa lê a descrição do circuito a analisar em um arquivo de texto, organizado na forma:

- Primeira linha: número de nós.

- Linhas seguintes: descrição (netlist), um elemento por linha:

- Resistor com resistência R:

R<nome> <nó1> <nó2> <R>

- Indutor com indutância L:

L<nome> <nó1> <nó2> <L>

- Capacitor com capacitância C:

C<nome> <nó1> <nó2> <C>

- Fonte de tensão controlada a tensão (VCCS), com ganho Av:

E<nome> <nóVo+> <nóVo-> <nóVi+> <nóVi-> <Av>

- Fonte de corrente controlada a corrente (CCCS), com ganho Ai:

F<nome> <nóIo+> <nóIo-> <nóIi+> <nóIi-> <Ai>

- Fonte de corrente controlada a tensão (VCCS), com transcondutância Gm:

G<nome> <nóIo+> <nóIo-> <nóVi+> <nóVi-> <Gm>

- Fonte de tensão controlada a corrente (CCVS), com

- Transresistência Rm:

H<nome> <nóVo+> <nóVo-> <nóIi+> <nóIi-> <Rm>

- Girador, com resistência de giração Rg:

Y<nome> <nó1+> <nó1-> <nó2+> <nó2-> <Rg>

- Amplificador operacional ideal, modelo nullator-norator:

O<nome> <nó entr. 1> <nó entr. 2> <nó saída>

- Amplificador operacional, com ganho GB/s (GB em rad/s) e resistência de saída Ro:

A<nome> <nó-> <nó+> <nósaída> <GB> <Ro>

- Transistor bipolar, modelo híbrido h simplificado:

Q<nome>, <nó c> <nó b> <nó e> <hfe> <hie>

- Transistor MOS:

M<nome>, <nó d> <nó g> <nó s> <Gm> <Gds>

- Fonte de tensão com resistor em série Rs:

Z<nome> <nó-> <nó+> <Rs> <V>

- Fonte de tensão:

V<nome> <nó+> <nó-> <V>

- Fonte de corrente:

I<nome> <nó+> <nó-> <I>

Todas as unidades em Ohms, Mhos, Farads e Henrys. O nó de terra é o nó 0. Os nomes devem possuir até 5 caracteres, incluindo a inicial. Os componentes podem estar em qualquer ordem e a numeração dos nós também, mas deve ser contínua, sem números faltando.

A descrição pode ser gerada pelo programa editor EdFil, a partir do diagrama esquemático do circuito.

3 - Resposta em frequência

O programa considera as entradas do circuito (as fontes "Z") como fontes de tensão unitárias. Todos os cálculos referem-se às tensões nos nós do circuito, que equivalem a funções de transferência das entradas até aí.

O gráfico de resposta em frequência pode ser pedido imediatamente após a leitura do arquivo de dados, usando-se as escalas "default", adequadas para circuitos normalizados em frequência.

Outras escalas podem ser determinadas antes da plotagem dos gráficos, ou ajustadas iterativamente durante a plotagem. Podem ser plotadas, em um único gráfico, curvas de módulo e fase da função de transferência, atraso de grupo e desvios estatísticos do módulo e da fase da função de transferência. Inicialmente, são plotadas apenas curvas de módulo, fase e desvio estatístico do módulo. Um cursor pode ser acionado a qualquer instante para leitura de valores no gráfico.

Várias teclas possuem função, ao final e durante a plotagem do gráfico:

- Setas horizontais: Ligam e movimentam o cursor.
- Ctrl-Setas horizontais: Idem, com passo maior.
- Tab: Muda a curva selecionada pelo cursor.
- Del: Remove do gráfico a curva selecionada (e seleciona a de módulo).
- Ins: Recoloca no gráfico a curva selecionada.
- Setas verticais: Deslocam verticalmente (1/2 tela) a curva selecionada.
- + e -: Amplia (x2) e reduz (/2) o limite superior da curva selecionada.
- A: Amplia o limite superior de frequência, colocando no gráfico o que apareceria se a largura da área de plotagem fosse dobrada.
- R: Reduz o limite superior de frequência, colocando no gráfico o que apareceria se a largura da área de plotagem fosse a metade do que é.
- < e >: Movem as curvas em frequência de 1/2 tela.
- Return: Redesenha o gráfico, sem o cursor.
- Espaço: Mostra o cursor.
- E: Liga/desliga o traçado das curvas de módulo e fase com seus desvios estatísticos somados e subtraídos.
- G: Liga/desliga o traçado da grade (as escalas da grade sempre são as da curva selecionada, mesmo que ela esteja invisível).
- F: Liga/desliga o traçado de curvas de fase.
- T: Liga/desliga o traçado de curvas de atraso de grupo.
- Q: Muda a posição do quadro de medida do cursor.
- Esc: Encerra a plotagem, retornando ao menu principal.

Os valores calculados são sempre que possível aproveitados quando as escalas são mudadas. O cursor também não muda de frequência, se possível. Os gráficos somente serão totalmente recalculados se o nó de saída do circuito for mudado, ou se, no menu de escalas, o número de segmentos ou a escala de frequências for mudada. O número inicial de segmentos (pontos-1) no gráfico depende da memória disponível, e é normalmente de 78.

Havendo memória, pode ser aumentado até um máximo de 256. O programa sempre usa o máximo valor entre o especificado e o possível.

As respostas em frequência para vários circuitos diferentes podem ser comparadas pelo programa CPSENSI, a partir das tabelas geradas pelo SENSI.

4 - Listagens de sensibilidades

As sensibilidades $S(T,x) = (x/T) \cdot (dT/dx)$ da função de transferência $T(s)$ em relação a todos os parâmetros x podem ser observadas após a plotagem de um gráfico. A parte real pode ser interpretada como sendo a sensibilidade do módulo da função de transferência em Nepers e a parte imaginária como sendo a da fase em radianos. É listado também o valor de $S(T,s)$, a sensibilidade da função de transferência em relação a " s ". A listagem se inicia pela frequência do cursor, e pode ser mudada com as setas horizontais. A mudança se reflete no cursor do gráfico. O cursor vertical permite que as sensibilidades em relação a todos os componentes sejam listadas, caso não caibam todas na tela.

Os parâmetros que compõem os elementos com mais de um parâmetro (A e Q) são identificados nesta listagem e nas demais por:

- A<nome> - GB de um amp. op.
- a<nome> - Ro de um amp. op.
- Q<nome> - hfe de um transistor bipolar
- q<nome> - hie de um transistor bipolar
- M<nome> - Gm de um transistor MOS
- m<nome> - Rds de um transistor MOS

5 - Análise da faixa dinâmica

Durante os cálculos para o traçado dos gráficos de resposta em frequência, os máximos e mínimos valores do módulo da função de transferência para cada nó da rede são computados. Os valores são acumulados enquanto os gráficos não forem totalmente recalculados. As setas verticais permitem a listagem de nós que não caibam na tela.

6 - Desvios estatísticos

Os desvios estatísticos representam o erro que se deve esperar construindo o circuito com componentes com as variabilidades ou tolerâncias dadas, supondo não correlacionados os erros no valor dos parâmetros. Por exemplo, se X% dos parâmetros dos componentes usados possuírem menos que a variabilidade dada (com distribuição normal), X% dos circuitos que forem construídos estarão dentro dos limites dados pelos desvios.

As variabilidades para todos os parâmetros do circuito podem ser especificadas, para todos os elementos ou individualmente. O valor "default" é de 0.05 (ou 5% de tolerância). Alterar as variabilidades faz com que os desvios sejam recalculados (o cálculo é rápido). Esta facilidade permite que o efeito de cada parâmetro no comportamento do circuito seja estudado, e que a tolerância necessária para cada parâmetro seja facilmente determinada. Observe-se que o erro em dB causado por uma variabilidade isolada é função linear da variabilidade. Por exemplo, se com 5% de tolerância para todos os componentes o erro máximo de ganho em uma dada frequência for de 5 dB, se as tolerâncias forem reduzidas para 1%, o erro cairá para 1 dB. Inicialmente, as variabilidades das fontes independentes são nulas, já que usualmente não são consideradas em análises de sensibilidade. Se necessário, podem ser alteradas individualmente. A mudança global de variabilidades não as afeta.

7 - Sensibilidades com desconto

A opção de descontar as sensibilidades do valor em certa frequência pode ser usada para eliminar a parte invariante com a frequência das sensibilidades, apresentando apenas os erros que distorcem a forma das curvas da resposta em frequência. Em um filtro derivado de uma realização passiva LC duplamente terminada com máxima transferência de potência, esta frequência é onde o ganho é máximo (se o máximo ocorrer em CC, usa-se uma frequência baixa, não nula). Para filtros de outros tipos pode não ser rigorosamente correto usar esta opção, pois as sensibilidades podem não possuir uma parte invariante com a frequência, ou o valor constante pode não acontecer para todos os parâmetros na mesma frequência. Com o uso da opção, a parte real das sensibilidades listadas é apresentada com o desconto feito. Uma vez feito um desconto, ele permanece ativo até que a opção seja desligada ou que o nó de saída seja mudado. Note-se que os erros calculados desta forma só são válidos em circuitos em que o valor absoluto do ganho não seja importante.

8 - Sensibilidades normalizadas pela inclinação

A opção de normalizar as sensibilidades pela inclinação é útil para eliminar as falsas altas sensibilidades que parecem ocorrer sempre que módulo ou fase variam rapidamente, como nas vizinhanças de zeros de transmissão. Os novos desvios podem ser interpretados como a distância perpendicular entre as curvas ideais e as reais de módulo e fase, se os diagramas forem plotados em módulo em dB x 20log(w) ("frequência em dB"), e fase em graus x (180/pi)ln(w) ("frequência em graus").

9 - Sensibilidades dos pólos e zeros

Para análises de sensibilidade de pólos e zeros, é necessário um arquivo de texto contendo os pólos ou os zeros, no formato gerado pelo programa IFFT (1a. linha: número de frequências).

Linhas seguintes: <real> <imag.> de cada pólo ou zero). As sensibilidades calculadas para pólos e zeros são não normalizadas:

$S'(s,x)=ds/(dx/x)$. Os desvios estatísticos das partes real e imaginária calculados definem um retângulo onde o pólo ou zero dever estar, centrado na posição ideal.

Como um refinamento desta medida, são ainda calculados a direção angular onde a variação maior é esperada e os raios maior e menor de uma elipse dentro da qual o pólo ou zero dever estar. Os retângulos e elipses podem ser plotados juntamente com os pólos ou zeros em um gráfico.

Neste gráfico, as setas do cursor movimentam os limites, + e - mudam a ampliação e Tab muda a frequência selecionada. Esc encerra a plotagem.

O cálculo de sensibilidade dos pólos só funciona corretamente se a impedância de entrada da rede, como vista por um corte no ramo onde estiver o elemento usado como observador, que deve ser dos tipos R, L, C ou Z, possuir como zeros os pólos desejados, sendo nula nestas frequências. Ou seja, as sensibilidades dos pólos da rede em relação ao parâmetro observador usado não podem ser nulas. O programa verifica isto e não calcula as sensibilidades de pólos não claramente observáveis. Note-se que em alguns circuitos não existe um elemento que observe todos os pólos. Neste caso, podem ocorrer problemas numéricos, pois a impedância vista por um corte no ramo observador possui zeros sobre os pólos não observáveis, e o sistema de equações usado pelo programa torna-se singular. Uma redução na tolerância para admitâncias pode fazer com que o programa faça o cálculo, aproximadamente, assim mesmo, não parando por "determinante muito pequeno".

No cálculo de sensibilidade dos zeros é também feita a verificação da correção dos zeros.

As listagens de sensibilidades de pólos e zeros tem o mesmo formato das listagens de sensibilidades, e obedecem aos mesmos comandos: cursor horizontal para mudar frequências e cursor vertical para mudar parâmetros.

O parâmetro de tolerância para impedâncias e tensões pode ser aumentado para permitir cálculos aproximados quando os pólos são pouco observáveis ou não muito precisos ou os zeros não muito precisos. O outro parâmetro de tolerância, para admitâncias e frequências, é usado para detecção de sistemas de equações nodais singulares (determinante muito pequeno) e para impedir cálculo de sensibilidade de zeros na origem.

O programa IFFT deve ser usado para a obtenção precisa dos pólos e zeros. Os cálculos devem ser feitos com a opção de apresentar resultados desnormalizados em frequência.

Os desvios estatísticos dos pólos e zeros para diversos circuitos diferentes podem ser comparados pelo programa CPSPZ, a partir das tabelas geradas pelo SENSI.

10 - Arquivo de saída

O programa pode criar um arquivo contendo tudo o que for calculado usando-se a opção "abrir arquivo de saída" do menu principal. O programa pergunta em ocasiões apropriadas (opção "Salvar", tecla "s", nos menus) se o resultado dos últimos cálculos ou alterações deve ser arquivado. Vários arquivos podem ser criados. O arquivo atual é automaticamente fechado quando é pedida a análise de outra rede ou quando o programa é encerrado.

11 - Observações

Amplificadores operacionais ideais devem ser usados sempre que possível, pois isto acelera o processo de solução do circuito e reduz o erro numérico.

Podem ocorrer problemas numéricos se os níveis de impedância do circuito forem muito elevados ou muito baixos. É recomendado que todas as análises sejam feitas em circuitos normalizados em frequência e impedância. Principalmente em impedância.

Nenhuma admitância ou transadmitância pode ser infinita, implicando que resistências e indutâncias não podem ser nulas, e que circuitos contendo indutores ou amplificadores operacionais reais não podem ser analisadas em CC.

Em escala logarítmica não é permitida a análise em frequência menor ou igual a zero. As escalas verticais e horizontais não podem ser invertidas se a grade estiver sendo usada.

Quando a resolução usada nos gráficos não é grande, detalhes importantes podem ser perdidos. Um caso crítico é o de máximos dos desvios de módulo normalizados pela inclinação, que em alguns filtros forma picos agudos. O valor correto dos picos pode ser obtido aumentando-se o número de segmentos, expandindo-se a escala horizontal, ou tomando-se o valor do desvio não normalizado na frequência do pico, que coincide com o normalizado, já que aí a curva de módulo é horizontal.

Nas telas gráficas, tocando-se as teclas "H" e "V" são acionadas rotinas de impressão da tela, em formato horizontal ou vertical, em impressora tipo EPSON. As rotinas não emitem aviso algum, e somente funcionam com a placa CGA. A impressão pode ser interrompida tocando-se qualquer tecla.

A partir da versão 4.4, são calculadas as sensibilidades em relação impedância de saída dos amplificadores, antes ignorada. Foi introduzido também o modelo para transistor.

Na versão 4.5, o formato das tabelas e das listagens na tela foi mudado. Uma nova versão dos programas CPSENSI e CPSPZ teve que ser escrita. Foi introduzido o transistor MOS.

Na versão 4.6, pequenas mudanças foram feitas no formato das tabelas e nos comandos dos gráficos.

Na versão 4.7, a fonte "F" foi mudada para "Z", e as letras iniciais dos segundos parâmetros dos elementos com mais de um foram mudadas para versões minúsculas, como preparação para uma futura versão usando análise nodal modificada.

Na versão 4.8, a análise nodal modificada compacta foi implementada, com todas as quatro fontes controladas e as fontes de tensão e corrente.

A versão 4.9 inclui uma versão de modo protegido (sensi-p), que admite gráficos de maior resolução. O arquivo de saída passa a incluir as curvas de ganho +/- erro e fase +/- erro. A versão 4.9a é um pouco mais rápida devido a uma otimização no algoritmo de fatoração LU.

As versões 5.0x são pequenas mudanças internas, sem maiores conseqüências.

O programa SENSI pode ser distribuído livremente para propósitos educacionais e acadêmicos, desde que não seja alterado, e que referência a seu uso seja feita em trabalhos realizados com sua ajuda.

Comentários ou dúvidas sobre a utilização do programa podem ser remetidos para:

Dr. Antônio Carlos Moreirão de Queiroz
Programa de Engenharia Elétrica, COPPE
Universidade Federal do Rio de Janeiro
CP 68504
21945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Ou, via e-mail, para: acmq@ufrj.br

Última atualização: 16/12/2008