



20º POSMEC

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Aplicação de acelerômetros de baixo custo em sistemas automatizados de medição.

Autor(es)

Prof. Antonio Fernando Moura Santos.

Prof. Marcus Antonio Viana Duarte.

Profa. Rosenda Valdés Arencibia.

Discente Vinicius Abrão da Silva Marques.

Orientador:

Prof. Marcus Antonio Viana Duarte.

Co-Orientadora:

Profa. Rosenda Valdés Arencibia.

Este trabalho tem como objetivo projetar e validar um sistema de medição de vibrações baseado no acelerômetro ADXL321, de baixo custo. Para tanto foram propostas as seguintes etapas: estudo das características metrológicas do acelerômetro, definição do sistema de medição e sua montagem, calibração, caracterização metrológica do sistema de acordo com as normas técnicas atuais e comprovação de sua eficácia. Ao finalizar o trabalho foi obtido um sistema de medição com excelentes propriedades metrológicas e capaz de coletar uma grande quantidade de dados, em pouco tempo, de forma totalmente automatizada.

1. Introdução

A evolução dos processos de usinagem levou à necessidade de desenvolver técnicas para aquisição e análise dos sinais de vibração. Estes sinais contêm informações úteis e oferecem excelentes possibilidades de diagnóstico em tempo real de vários problemas críticos da usinagem, incluindo o desgaste da ferramenta de corte. No entanto, o alto custo dos acelerômetros com sensibilidade em três eixos, dificulta a implementação desses sistemas de aquisição de sinais, ficando seu uso restrito a áreas onde o custo é irrelevante como nos sistemas militares e aeroespaciais.

Graças à tecnologia de sistemas microeletromecânicos (SMEM), atualmente os acelerômetros com sensibilidade em 2 e 3 eixos se reduzem a um componente de, aproximadamente, 15 mm³, poucos miligramas e custo reduzido. Em paralelo à evolução dos acelerômetros são observados avanços significativos nos componentes eletrônicos, incluindo os computadores, que permitem monitorar diversas variáveis ao mesmo tempo de forma rápida e automatizada.

Todos esses fatores tendem a reduzir significativamente os custos, já que um mesmo tipo de acelerômetro pode ser usado em diversas aplicações. No entanto, para que o acelerômetro ADXL321 possa ser utilizado no monitoramento, aquisição e análise de sinais, testes experimentais devem ser realizados em tempo real e em conformidade com as normas técnicas, para validar a aplicabilidade e eficácia dos mesmos.

Pelo exposto o objetivo deste trabalho é desenvolver e validar um sistema de medição de vibrações baseado no acelerômetro de baixo custo ADXL321. Além disso, a caracterização do mesmo com relação à: resolução, sensibilidade, precisão, linearidade, estabilidade, resposta de frequência, incerteza, entre outros.

2. Fundamentos Teóricos

Existem muitos tipos de acelerômetros, fabricados com diferentes tecnologias, cada um tem características únicas, vantagens e desvantagens. Entre os acelerômetros mecânicos, os mais comuns são os capacitivos, os piezelétricos e os piezoresistivos. Recentemente, os acelerômetros mecânicos começam a ser substituídos por um novo tipo, os microeletromecânicos (SMEM). A tecnologia SMEM é uma das mais promissoras no campo da tecnologia analógica. Explora as propriedades mecânicas do silício para criar estruturas móveis que, no caso dos sensores SMEM, detectam o movimento (aceleração e vibrações), em diferentes direções. Estes são sensíveis, compactos, baratos e podem adicionar novas capacidades aos produtos, tornando-os mais funcionais e seguros.

A confiabilidade das medições realizadas utilizando acelerômetros é garantida quando forem realizadas por pessoal qualificado, utilizando métodos de medição e instrumentação adequada e calibrada. A calibração de um transdutor de vibrações tem como principal objetivo a determinação de sua sensibilidade a vibrações mecânicas nas amplitudes e frequências de interesse, com o grau de liberdade de movimento para o qual foi concebido e será usado [1].

A calibração de transdutores de vibrações é abordada pelo conjunto de normas técnicas ISO 16063 [3] e incluem métodos primários de calibração, métodos de calibração e testes comparativos para determinar as características adicionais de transdutores de vibração e choques [1]. A ISO 16063-1 [4] apresenta os conceitos básicos relativos à calibração de transdutores de vibrações e orientações para o cálculo de incerteza. Por sua vez, a ISO 16063-11 [5] especifica a instrumentação e os procedimentos de calibração de acelerômetros, que consiste da obtenção da magnitude e do ângulo de fase da sensibilidade complexa utilizando excitação senoidal e interferometria laser. A ISO 16063-21 [6] descreve a calibração de transdutores de vibração por comparação, principalmente por comparação direta com um padrão calibrado por métodos primários, também pode ser aplicada a outros níveis da hierarquia metrológica. Finalmente, a ISO 16063-22 [7] especifica a instrumentação e os procedimentos a serem utilizados para a calibração secundária de transdutores de vibração através de excitação por choque.

3. Metodologia

O sistema de medição proposto (Figura 1c) consiste de: dois conjuntos de acelerômetros triaxiais obtidos a partir da montagem adequada de dois acelerômetros biaxiais (ADXL321) em um suporte blindado de alumínio, Figura 1a, [8], totalizando seis canais independentes de sinais. Uma fonte de alimentação, um retificador de potência, um regulador de tensão e, para cada canal de entrada, um filtro de baixa frequência para frequências acima de 2 kHz. Um conversor de sinal analógico-digital (A/D) (Figura 1b). Além disso, consta de um computador e software para armazenar e analisar os resultados.

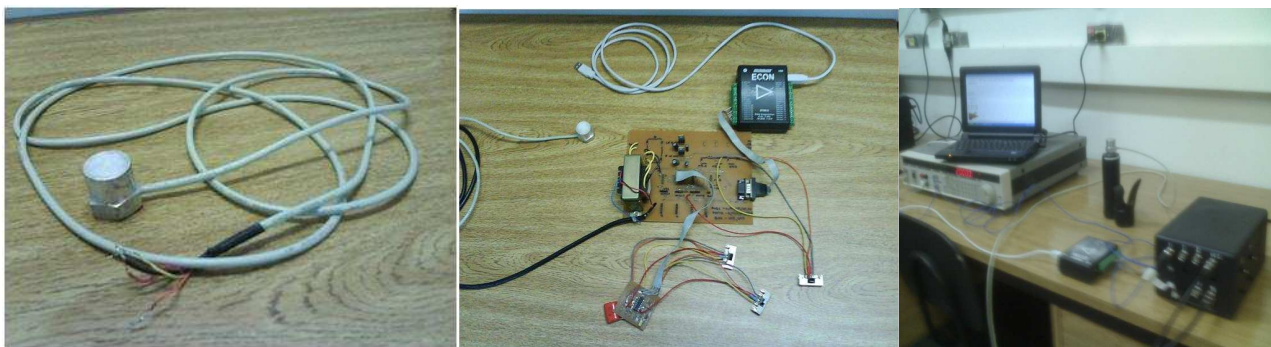


Figura 1 – Sistema de medição blindado (1a). Componentes (1b). Sistema de medição completo (1c).

Neste sistema de medição, os acelerômetros ADXL321 constituem o transdutor. Estes são fabricados pela Analog Devices, (Figura 2) e estão compostos por dois condensadores, Figura 2b e 2c. Os dois painéis são fixos e a placa interna está ligada à massa do sistema massa-mola. Quando a massa está em repouso, as distâncias entre as placas são iguais e os dois capacitores apresentam a mesma capacitância. Quando o sistema detecta vibrações a capacitância dos capacitores varia linearmente com o deslocamento da placa [8].

A unidade de processamento do sinal é composta por um transformador comercial, que reduz a tensão alternada fornecida pela rede para o valor nominal de ± 12 V. Posteriormente, uma ponte de Wheatstone com diodos (1N4007) retifica a tensão alternada, gerando duas saídas de correntes continua de ± 12 V. Ambas passam por um regulador de tensão fornecendo uma tensão mais estável. Depois um capacitor eletrolítico (200 μ F/25n V) filtra o sinal, eliminando a componente indesejável chamada ondulação (efeito) “ripple”.

O regulador de tensão é do tipo LM 7812 e LM 7912. Para cada sinal de entrada, esta tensão alimenta um filtro de tipo passa-baixa, um amplificador e um somador. Todos são amplificadores operacionais do tipo LM 348, que têm as seguintes funções: filtrar as frequências indesejadas ou superiores a um valor nominal; amplificar o pequeno sinal de saída do sensor e somar um determinado valor à saída nominal para que o conversor analógico digital (A/D) somente converta sinais elétricos positivos. Simultaneamente, a tensão continua passa por uma ponte de Whetstone com diodos de condução inversa (Zener) que tem a função de alimentar os sensores nas faixas de 2,7, 4,7 ou 5,7 V. Garantindo uma tensão estável na alimentação dos sensores.

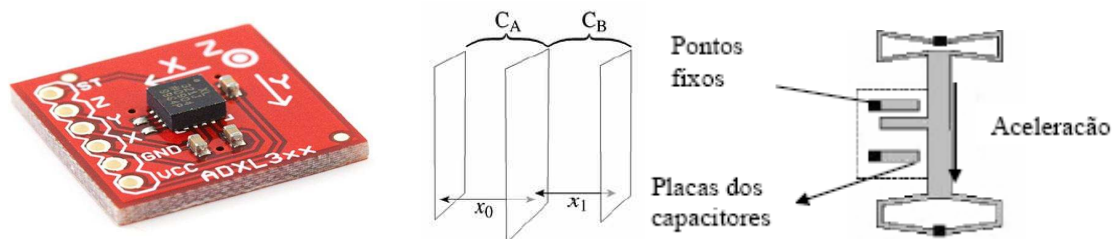


Figura 2. Acelerômetro ADXL321 (2a). Esquema do sensor capacitivo (2b). Sistema masa-mola (2c).

O conversor (A/D) modelo DT9812 tem oito canais de entrada, é programável e tem como função a multiplexação de cada sinal de entrada proveniente dos acelerômetros. A interface universal (USB) conecta e alimenta o conversor A/D, ao mesmo tempo, que envia informações para um computador. Por sua vez, o mostrador é composto de um computador, um programa computacional em linguagem C++, especificamente desenvolvido.

Foi efetuada a calibração direta por comparação do sistema de medição, como recomendado por [6]. Inicialmente, foi realizada uma calibração pontual do sistema de medição padrão (um acelerômetro piezelétrico, um condicionador de sinais e um conversor), na frequência de 159,2 Hz. Foram coletadas 4 amostras com um total de 16.384 leituras por segundo, durante 20 segundos de aquisição, totalizando 327.680 valores. Entre a coleta de uma amostra e a outra todos os equipamentos foram desligados para avaliar a precisão (repetitividade) do sistema.

Este procedimento foi repetido e novos dados foram coletados, substituindo o condicionador padrão pelo condicionador desenvolvido e o conversor padrão pelo conversor a ser usado no sistema de medição proposto. No final todos os equipamentos foram desligados e o procedimento foi repetido 2 h mais tarde para ambos os sistemas. Posteriormente, todos os equipamentos foram desligados durante 20 h, e o procedimento foi repetido novamente. Os resultados preliminares foram satisfatórios e novos testes foram realizados, especificamente, para uma calibração com três ganhos diferentes (1, 2 e 5). Em uma segunda fase, uma nova calibração por comparação direta foi efetuada acoplando, simultaneamente, ambos os sistemas de medição em um excitador padrão modelo 4808 com intervalo de indicação de 2 Hz a 20 kHz. Um amplificador de ganho 3, modelo 2712 e um gerador de sinais modelo 1049, todos fabricados pela Bruel & Kjaer.

Para estimar as Funções de Resposta em Frequência (FRF) entre o acelerômetro de referência (calibrado com um laser Doppler Vibrometer da Polytec) e o ADXL321, utilizou-se uma frequência de aquisição de 16.384 Hz, durante 16.000 segundo, janela Hanning, número de pontos da FFT de 16384 ($\Delta f = 1$ Hz) e sobre posição de 50%, resultando em um erro máximo de 1,58% [9] em amplitude para o estimador H1. Foram adquiridos três conjuntos de dados para diferentes níveis de aceleração: 3,0, 6,0 e 9,0 m/s² (RMS) e não foram observadas diferenças maiores que 0,1 dB entre as FRFs na faixa de 2 a 4000 Hz.

4. Resultados e discussão

O sistema de medição desenvolvido apresentou, em doze amostras, uma média de 159,5 Hz e desvio padrão igual a zero sendo que a frequência padrão foi de 159,2 Hz. Isso mostra que o sistema proposto possui boa exatidão, pois a tendência para o ponto avaliado apresenta um valor pequeno.

A sensibilidade média do sistema padrão de doze amostras foi de $1,1687 \pm 0,0055$, enquanto que para o sistema de medição foi de $1,1663 \pm 0,0019$. Resultados semelhantes foram obtidos para outros ganhos. A sensibilidade do sistema de medição foi de $6,2020 \pm 0,0021$ para o ganho de 5 e alimentação do acelerômetro ADXL321 de 5,7 VCC. Este resultado era esperado, uma vez que para valores maiores de ganhos na unidade de tratamento diminuem as correntes parasitas e os ruídos indesejados. A Figura 4 mostra as amplitudes das FRFs na direção da excitação (—) e na direção transversal (—) e a resposta de fase no sentido de excitação. A análise dos dados mostrou que o FRF na direção da excitação apresenta uma variação máxima de 0,5 dB de 2 a 5000 Hz. A resposta de fase é linear no intervalo de 2 a 4000 Hz.

A amplitude da FRF cruzada é, em média, 8 dB menor que na direção da excitação, o qual é um valor razoável para as aplicações destinadas ao acelerômetro estudado.

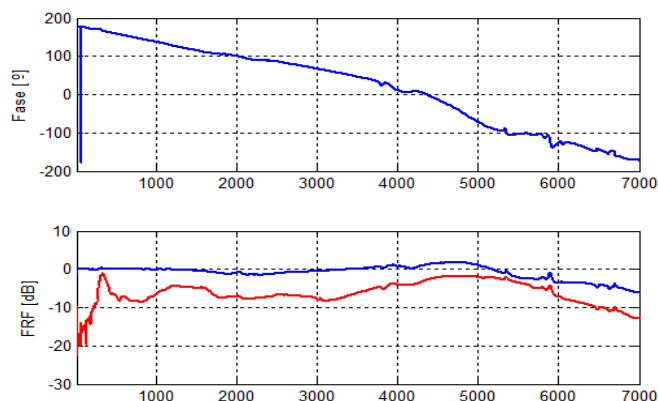


Figura 4. FRFs na direção de excitação (—) e na direção transversal (—).

5. Conclusões

Ao finalizar o trabalho as seguintes conclusões podem ser feitas: o sistema de medição proposto, baseado no acelerômetro ADXL321 funciona corretamente, com exatidão e precisão, mostrando uma sensibilidade média de $1,1663 \pm 0,0019$. A resposta de fase foi linear no intervalo de 2 a 4000 Hz. O sistema tem uma sensibilidade de $6,2020 \pm 0,0021$ para o ganho de 5 e ADXL321 poder acelerômetro de 5,7 VDC. A FRF no sentido de excitação mostrou uma variação máxima de 0,5 dB 2 a 5000 Hz. A amplitude da FRF cruzada é, em média, menos de 8 dB no sentido da excitação. O programa de computador desenvolvido para a aquisição de sinais e análise dos dados também mostrou consistência e bom desempenho.

6. Referências

- [1] Ripper, G.P. Silva Dias, R. e Garcia, G.A. “A importância da calibração de acelerômetros para a indústria automobilística” INMETRO – Diavi – Divisão de Metrologia em Acústica e Vibrações / Lavib - Laboratório de Vibrações Av. N. S. das Graças 50, Xerém. D. Caxias, RJ 25250-020, 15p. Brasil, 2006.
- [2] INMETRO “Vocabulário de termos fundamentais e gerais de metrologia” VIM 2009.
- [3] ISO 16063, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers - part 11: primary vibration calibration by laser interferometry”, 1st edition, ISO Standard. 1999.
- [4] ISO 16063-1:1998, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic Concepts”, Geneve, 1998.
- [5] ISO 16063-11:1999, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 11: Primary vibration calibration by laser interferometry”, Geneve, 1999.
- [6] ISO 16063-21:2003, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer” Geneve, 2003.
- [7] ISO 16063-22:2005, “Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 22: Shock calibration by comparison to a reference transducer”, Geneve, 2005.
- [8] Douglas W. Gomes, Roniclei G. dos Santos, Maurício V. Quintino, Gustavo W. Brandão, Christian Arruda., “Acelerômetro”. Universidade de Caxias do Sul – UCS Rua Carlos Bosi, 24 - CEP 95076-080 – Caxias do Sul, RS.
- [9] Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000. “Random Data, Analysis and Measurements Procedures”, John Wiley & Sons Inc.