



Design and Implementation of Structural Vibration Measurement Device Using MEMS Accelerometers

Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.1.36-45>

*Corresponding author:

Email address:

thangpb@utt.edu.vn

Received: 01/12/2024

Received in Revised Form:
21/01/2025

Accepted: 25/01/2025

Phung Ba Thang^{1*}, Duong Quang Khanh², Vu Quang Dung¹, Nguyen Xuan Duc Anh², Hoang Manh Quan¹, Le Hoang Giang¹

¹University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

²VNU Information Technology Institute, 144 Xuan Thuy, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

Abstract: This paper presents the design and implementation of a dedicated printed board circuit using a MEMS (Micro-ElectroMechanical System) accelerometer to collect data, assess and monitor the status of the structure. This device connects with two 3-axial accelerometers ADXL345 and ADXL355 to measure the acceleration of the structure, specifically a steel beam model at the laboratory of the University of Transport Technology. The results are compared with the reference vibration assessment device SDA-810C and numerical simulation using the Finite Element Analysis method. The analysis and comparison cases show that the system ensures accuracy and sensitivity when compared with commercial sensors. The device includes the complete hardware and software, giving results that meet the requirements, saving production costs and being convenient in use.

Keywords: MEMS accelerometers, Structural Vibration, Structural Monitoring.



Thiết kế, chế tạo thiết bị đo dao động kết cấu công trình sử dụng cảm biến gia tốc MEMS

Thông tin bài viết

Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2025.vn.5.1.36-45>

*Tác giả liên hệ:

Địa chỉ Email:

thangpb@utt.edu.vn

Ngày nộp bài: 01/12/2024

Ngày nộp bài sửa: 21/01/2025

Ngày chấp nhận: 25/01/2025

Phùng Bá Thắng^{1*}, Dương Quang Khánh², Vũ Quang Dũng¹, Nguyễn Xuân Đức Anh², Hoàng Mạnh Quân¹, Lê Hoàng Giang¹

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Công nghệ thông tin, Đại học Quốc gia Hà Nội, 144 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Bài báo này trình bày nội dung thiết kế, chế tạo mạch chuyên dụng sử dụng cảm biến gia tốc MEMS (Micro-ElectroMechanical System) để thu nhận dữ liệu, phục vụ đánh giá tình trạng kỹ thuật và theo dõi quan trắc kết cấu. Thiết bị này kết nối hai cảm biến gia tốc kế ba trục ADXL345 và ADXL355 để đo gia tốc của kết cấu, cụ thể là một mô hình dầm thép tại phòng thí nghiệm của Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải. Kết quả được so sánh với thiết bị đánh giá dao động tham chiếu là SDA-810C và mô phỏng số sử dụng phương pháp Phân tích phần tử hữu hạn. Các trường hợp phân tích và so sánh cho thấy hệ thống đảm bảo độ chính xác và độ nhạy khi so sánh với cảm biến thương mại. Thiết bị bao gồm phần cứng, phần mềm khá hoàn chỉnh cho kết quả đáp ứng yêu cầu, tiết kiệm chi phí sản xuất và thuận lợi trong quá trình sử dụng.

Từ khóa: cảm biến gia tốc MEMS, dao động kết cấu, quan trắc kết cấu.

1. Giới thiệu

Trong quá trình khai thác công trình, do tác động yếu tố về môi trường, khí hậu như thay đổi nhiệt độ, tia cực tím, xâm nhập mặn cùng với sự gia tăng của tải trọng giao thông, ... làm suy giảm kết cấu công trình. Trong kết cấu công trình, đặc trưng dao động như tần số, dạng dao động, độ giảm chấn phụ thuộc vào các yếu tố của kết cấu như khối lượng, độ cứng, liên kết, ... Trong quá trình khai thác, các thay đổi, hư hỏng của kết cấu công trình làm thay đổi các đặc trưng dao động. Do vậy trong quan trắc kết cấu (SHM - Structural Health Monitoring) hay trong đánh giá tình trạng kỹ thuật kết cấu người ta thường dựa vào thay đổi các đặc trưng của dao động [1], [2], [3], [4], [5].

SHM là một phương pháp giúp phát hiện các bất thường và nâng cao khả năng khai thác của kết

cấu bằng cách sử dụng các loại cảm biến, thiết bị thu thập dữ liệu và các phương pháp phân tích. SHM trở nên quan trọng vì có khả năng cung cấp dữ liệu thời gian thực, phát hiện sớm và đánh giá được những hư hỏng của công trình [6], [7].

Hệ thống SHM được công nhận là giải pháp toàn diện khi được chia ra nhiều mảng nhỏ như: SHM dựa trên ứng suất, SHM dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI), hình ảnh và cảm biến từ xa, cảm biến siêu âm và nhiều nhánh khác nữa. Đặc biệt, SHM dựa trên dao động là một trong những tính năng quan trọng, tập trung vào việc theo dõi ứng xử của công trình bằng phương pháp phân tích dao động.

Trên thị trường hiện nay có nhiều hệ thống thiết bị đo dao động, trong đó kể đến như hệ thiết bị SDA-810C/SDA-830C của công ty Tokyo Sokki Kenkyujo, Nhật Bản; hệ thiết bị VM 5123/6 với cảm

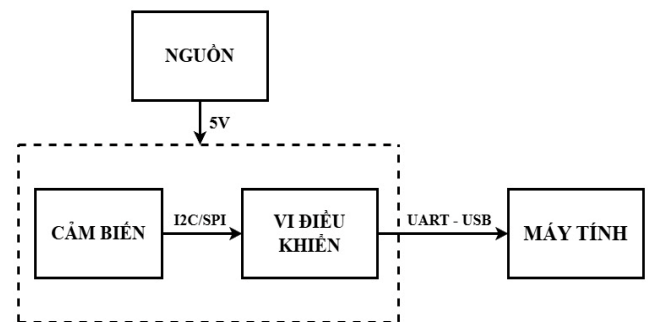
biến gia tốc loại sevo (VP-5123HHV) của công ty IVM. Các máy đo dao động gồm có: máy đo độ căng, máy đo độ dịch chuyển, máy đo vận tốc và máy đo gia tốc. Dựa theo nguyên lý hoạt động, gia tốc kế sử dụng 3 loại cảm biến chính: cảm biến áp trở, cảm biến áp điện và cảm biến vi cơ điện tử MEMS (Micro-electro-mechanical System). Cảm biến MEMS ngày càng được sử dụng trong các ứng dụng bởi kích thước nhỏ gọn, độ chính xác cao, chi phí thấp. Cảm biến MEMS được sử dụng ngày càng nhiều để đánh giá tình trạng kết cấu các công trình cầu thông qua đo gia tốc [8].

Từ các phân tích trên, nhóm tác giả đã đề xuất thiết kế một mạch điện tử chuyên dụng tích hợp cảm biến MEMS gia tốc. Các cảm biến gia tốc ADXL của hãng Analog Devices là cảm biến 3 trục có độ nhạy tốt, tần số lấy mẫu cao, khá phổ biến trong các mạch điện tử. Hai cảm biến ADXL345 và ADXL355 được lựa chọn cho thiết kế bởi có sự khác nhau về giá cả, chất lượng và giao thức truyền thông. Việc đánh giá tín hiệu gia tốc của kết cấu càng chính xác thì yêu cầu số lượng các điểm đo phải đủ lớn. Vi điều khiển STM32 của hãng

STMicroelectronics là KIT phát triển sử dụng dòng vi điều khiển 32 bit ARM có tốc độ xử lý cao, chi phí thấp, phù hợp với ứng dụng nghiên cứu. Để xác minh tính hiệu quả và độ tin cậy của mạch thiết kế, nhóm tác giả đã tiến hành các thử nghiệm trên mô hình dầm thí nghiệm tại trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải và đối chứng với các hệ thống thiết bị truyền thống. Mô hình dầm cũng được mô phỏng, phân tích, tính toán các dạng và tần số dao động tự do bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

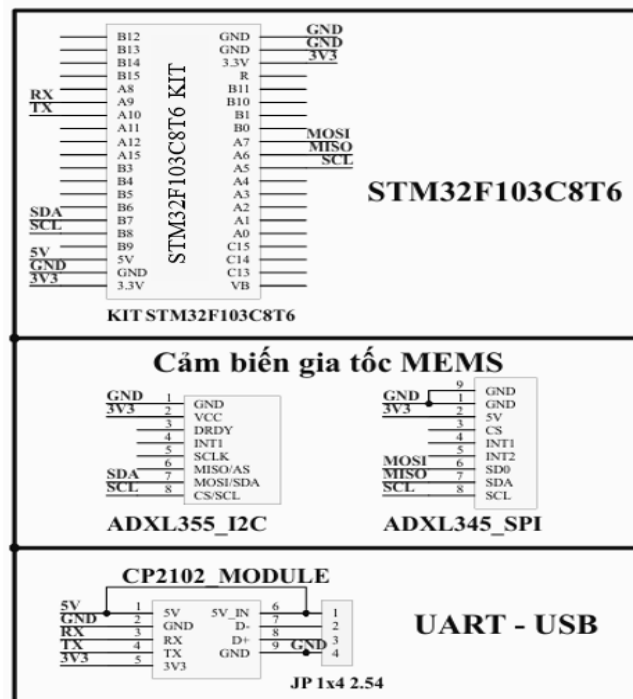
2. Thiết kế và chế tạo

2.1. Sơ đồ khối



Hình 1. Sơ đồ khối bo mạch chuyên dụng thiết kế

2.2. Sơ đồ nguyên lý



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý của cảm biến gia tốc MEMS dựa trên bo mạch chuyên dụng

Hình 1 mô tả sơ đồ khối của bo mạch được thiết kế chuyên dụng, trong đó cảm biến giao tiếp với vi điều khiển thông qua giao thức truyền thông

I2C hoặc SPI. Dữ liệu sau khi được thu thập từ vi điều khiển sẽ được gửi về máy tính thông qua bộ chuyển đổi giao thức từ UART sang USB. Dữ liệu

được lưu trong file dưới dạng text theo từng hàng và được đọc, phân tích bằng hàm của MATLAB.

Hình 2 mô tả sơ đồ nguyên lý mạch thiết kế cho bo mạch chuyên dụng trên phần mềm Altium Designer. Thiết kế này gồm có 3 khối cơ bản là: (1) Khối vi điều khiển STM32F103C8T6; (2) Khối cảm biến gia tốc MEMS chứa các chân của giao thức I2C và SPI, cho phép kết nối với cảm biến gia tốc MEMS; (3) Module CP2102 chuyển đổi giao thức truyền thông nối tiếp từ UART sang USB, có chức năng truyền dữ liệu từ vi điều khiển sang máy tính.

2.3. Các thông số kỹ thuật

2.3.1. Vi điều khiển STM32F103C8T6

STM32F103C8T6 là dòng vi điều khiển hiệu suất mật độ trung bình sử dụng vi điều khiển Arm® Cortex®-M3 32-bit RISC hoạt động ở tần số 72 MHz, bộ nhớ Flash lên đến 128 Kbytes và SRAM đến 20 Kbytes, bộ chuyển đổi ADC 12 bit.

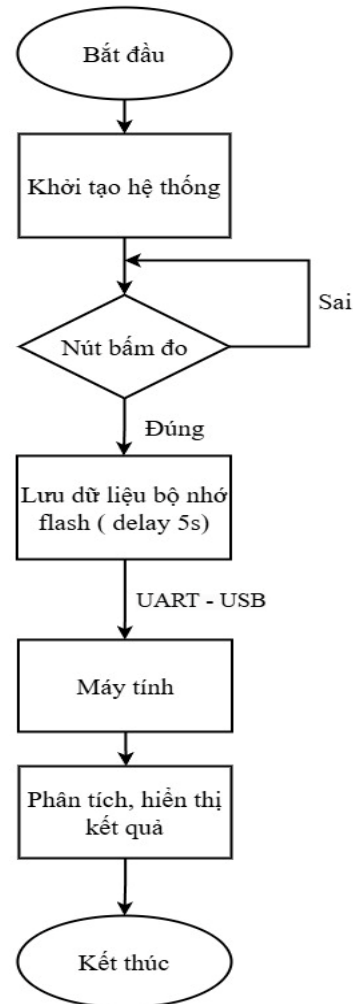
2.3.2. Cảm biến ADXL345 và ADXL355

Bo mạch chuyên dụng sử dụng cảm biến gia tốc ADXL345 và ADXL355 của hãng Analog Devices (Bảng 1).

ADXL345 là gia tốc kế 3 trục, nhỏ, gọn, công suất thấp với độ phân dải lên đến 13 bit trong dải đo ±16g. Đối với ứng dụng này, độ phân dải của cảm biến được cài đặt ở 10 bit trong dải đo +/- 2g. Trong khi đó, ADXL355 có độ phân dải cao hơn 20 bit và chu kỳ lấy mẫu có thể lên đến 4 000Hz với nhiễu ít hơn. Nguyên nhân là trong ADXL355 đã có sẵn bộ lọc tương tự và bộ lọc số ở trong mạch. So với ADXL345 thì ADXL355 cho độ chính xác cao hơn nhưng chi phí lại cao hơn.

2.4. Lưu đồ thuật toán

Hình 3 mô tả lưu đồ thuật toán, quy trình thu thập, truyền và phân tích dữ liệu. Sau khi được cấp nguồn và khởi động cho bo mạch, khi được ấn nút cảm biến sẽ đo dao động, lưu trong bộ nhớ flash 5 giây để tránh mất thông tin, sau đó truyền dữ liệu đến máy tính để xử lý, phân tích, hiển thị kết quả đo.



Hình 3. Lưu đồ thuật toán của cảm biến gia tốc MEMS dựa trên bo mạch chuyên dụng

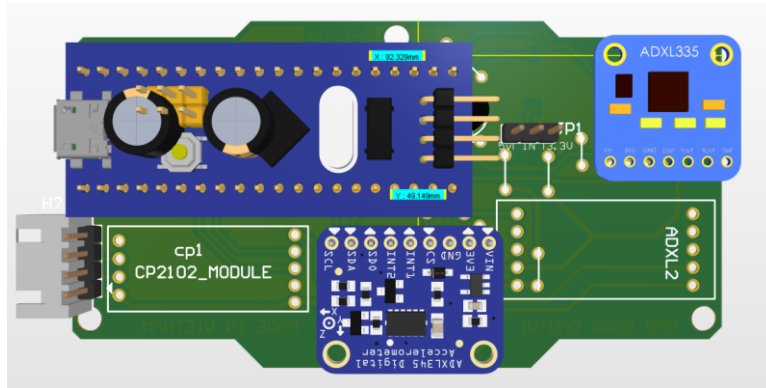
Bảng 1. So sánh các thông số kỹ thuật của ADXL345 và ADXL355

Thuộc tính	ADXL355			ADXL345		
	Điều kiện đo	Giá trị trung bình	Đơn vị đo	Điều kiện đo	Giá trị trung bình	Đơn vị đo
Độ nhạy	±2g (X, Y và Z)	256,000	LSB / g	±2 g, độ phân dải 10-bit	256	LSB / g
Nhiều (mật độ phổ)	±2g (X, Y và Z)	22.5	μg/√Hz	ODR = 100 Hz, ±2 g độ phân dải 10-bit	1.1	LSB rms
Độ nhạy thay đổi theo nhiệt độ	-40 °C đến +125 °C	±0.01	% / °C	-40 °C đến +85 °C	±0.01	% / °C
Độ phi tuyến	±2g	0.1	%	±2g	±0.5	%
Độ lệch 0	±2g (X, Y và Z)	25	mg	±2g (X, Y and Z)	±40	mg

2.5. Mạch in PCB

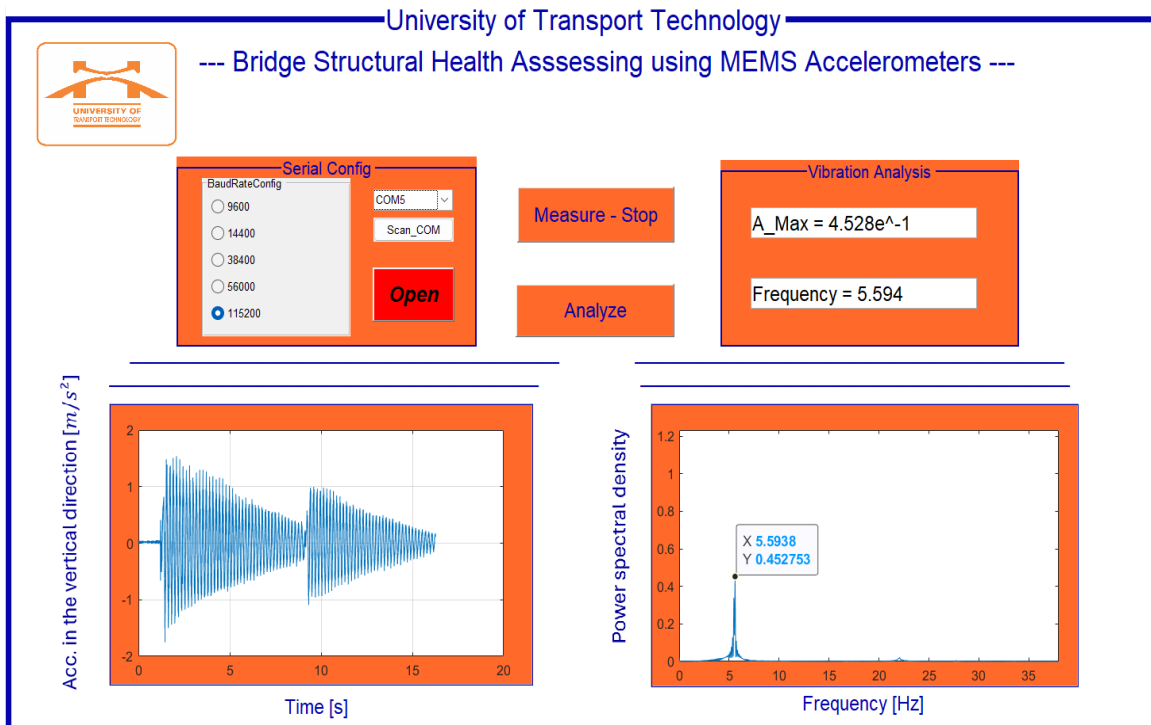
Hình 4 mô tả bo mạch thiết kế dưới dạng 3D.

Để bảo vệ và giữ cân bằng bo mạch được đặt trong hộp kỹ thuật gắn trên đế sắt dày.



Hình 4. Bo mạch chuyên dụng dạng 3D

2.6. Giao diện người dùng (GUI)



Hình 5. Giao diện người dùng trên Matlab

Để tiện sử dụng, giao diện người dùng (GUI-Graphical User Interface) đã được thiết kế trên phần mềm Matlab. Giao diện thiết kế gồm có các chức năng chính: (1) Cài đặt cấu hình cho truyền thông nối tiếp, (2) nút Measure – Stop cho phép đo – dừng đo dữ liệu; (3) nút Analyze để hiện thị dữ liệu đo trên miền thời gian và miền tần số, tần số dao động tương ứng với độ lớn cực đại của phổ tín hiệu sẽ được hiển thị trên cửa sổ Vibration Analysis (Hình 5).

3. Thục nghiệm và kết quả

Để kiểm nghiệm tính năng và độ chính xác

của bộ thiết bị chế tạo, tiến hành các thí nghiệm tại phòng thí nghiệm trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải.

Tiến hành thiết kế và chế tạo dầm bản thép, chiều dài dầm 1500mm, mặt cắt ngang 70x5mm. Hai gối cầu cho hai mô hình là dầm trên gối đàn hồi cao su và dầm trên gối ngàm. Kết cấu dầm được cắt theo công nghệ CNC Laser đảm bảo độ chính xác. Vật liệu thép dùng chế tạo dầm có mô đun đàn hồi $E = 1,9995 \cdot 10^8 \text{ kN/m}^2$, trọng lượng bản thân $77,09 \text{ kN/m}^3$.

Sơ đồ kết cấu dầm bản thép trên gối cao su

và gổi ngòm cùng các thông số của kết cấu được thể hiện trên Hình 6 và Bảng 2.

Tiến hành phân tích trị riêng để xác định các tần số dao động riêng (natural frequencies) và dạng dao động (mode shapes) của kết cấu. Kết quả phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm Midas Civil 2022 [9] nhận được 2 tần số và dạng dao động cơ bản đầu tiên của kết cấu dầm trên gổi cao su được thể hiện trên Hình 7, của kết cấu trên gổi ngòm được thể hiện trên Hình 8.

Tiến hành đo dao động kết cấu dầm trong phòng thí nghiệm. Kích thích dao động cho dầm và sử dụng thiết bị được chế tạo với các cảm biến gia tốc ADXL345 và ADXL355 để đo gia tốc của dầm (Hình 9).

Với gổi cao su là dạng liên kết dị hướng, tần số dao động có thể bị ảnh hưởng bởi lực kích thích do điều kiện biên thay đổi. Khi lực kích thích lớn làm tăng biến dạng đàn hồi của gổi, liên kết gần với liên kết mềm. Khi lực kích thích nhỏ, biến dạng không đáng kể, điều kiện biên gần giống liên kết cứng.

Các cảm biến được bố trí ở giữa dầm, là điểm có biên độ, năng lượng lớn, phù hợp với việc đo dao động của dạng dao động uốn đầu tiên (mode 1).

Khối lượng của thiết bị đo cũng sẽ ảnh hưởng đến dao động của kết cấu, khi gắn vào kết cấu có thể coi như làm tăng khối lượng kết cấu nên làm thay đổi tần số dao động. Với thiết bị IMV5123/6, trọng lượng của cảm biến khá lớn ~3 kN so với trọng lượng dầm. Thiết bị này để tránh bị ảnh hưởng nên không được sử dụng để đo trong phòng thí nghiệm mà được sử dụng khi đo thực tế ở công trình cầu để làm so sánh. Các cảm biến được dùng đo trong phòng thí nghiệm là cảm biến được chế tạo ADXL345, ADXL355 và cảm biến SDA-810C có trọng lượng nhỏ, hầu như không ảnh hưởng tới kết quả đo dao động.

Trước khi chuyển dữ liệu đến máy tính để phân tích, dữ liệu ban đầu được lưu trữ trong bộ nhớ ROM của vi điều khiển. Phép biến đổi nhanh Fourier (FFT) được sử dụng để phân tích tần số

dao động trong phần mềm được thiết kế trên máy tính. Mỗi loại thiết bị gắn với cảm biến chế tạo được đo 3 lần. Biểu đồ gia tốc và phân tích Fourier (FFT) của một lần đo của các cảm biến ADXL345 và ADXL355 được thể hiện trên Hình 10 và Hình 12.

Để đối chiếu với kết quả của thiết bị chế tạo bằng các cảm biến ADXL345 và ADXL355, tiến hành đo dao động bằng thiết bị SDA-810C là thiết bị của công ty Tokyo Sokki Kenkyujo, Nhật Bản được dùng khá phổ biến trong đo dao động kết cấu công trình, và phân tích số phần tử hữu hạn (PTHH). Kết quả đo với biểu đồ gia tốc và phân tích Fourier của thiết bị đo SDA-810C được thể hiện trên Hình 11 và Hình 13. Kết quả đo được tổng hợp trên Bảng 3.

Trường hợp dầm thí nghiệm kê trên gổi cao su, thiết bị SDA cho kết quả đo trung bình ba lần đo là 9,73 Hz, phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn với phần mềm Midas Civil là 9,33 Hz với sai khác 4,1%, đo bằng thiết bị với cảm biến ADXL345 là 9,45 Hz với sai khác 2,9%, cảm biến ADXL355 là 9,47 Hz với sai khác là 0,1%.

Trường hợp dầm thí nghiệm kê trên gổi ngòm là hệ do có điều kiện biên ngòm nên toàn hệ có độ cứng lớn hơn hệ trên gổi đàn hồi cao su. Thiết bị SDA-810C cho kết quả trung bình ba lần đo là 12,45 Hz, phân tích phần tử hữu hạn với phần mềm Midas Civil là 12,99 Hz lớn hơn đo bằng SDA-810C bởi vì trong phần mềm sử dụng liên kết tuyệt đối cứng, nhưng trong liên kết thực tế vẫn có độ cứng nhất định không hẳn là tuyệt đối cứng/độ cứng vô cùng. Kết quả đo dùng thiết bị chế tạo với cảm biến ADXL345 là 11,71 Hz với sai khác 5,9%, cảm biến ADXL355 là 12,28 Hz với sai khác 1,4%.

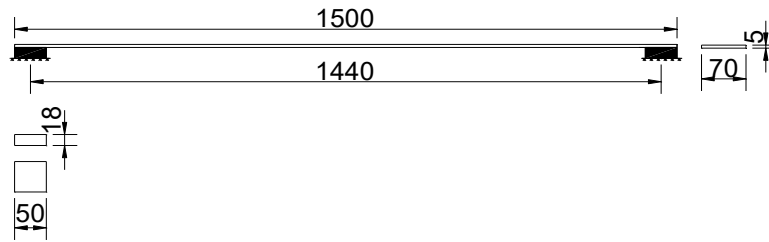
Các kết quả đo cho thấy thiết bị chế tạo có sai khác với kết quả đo của thiết bị tham chiếu là SDA-810C là khá nhỏ dưới 6%, cảm biến ADXL355 cho kết quả sát hơn với SDA-810C, tín hiệu thu được tốt hơn so với ADXL345.

So sánh trên Hình 10 và Hình 12 cho thấy gia tốc đo được của hai cảm biến ADXL345 và ADXL355 của dầm thí nghiệm trên gổi ngòm lớn hơn dầm thí nghiệm trên gổi đàn hồi cao su. Các tần số đo được của các thiết bị đều cho kết quả lớn

hơn của dầm thí nghiệm trên gối ngàm so với dầm thí nghiệm trên gối cao su.

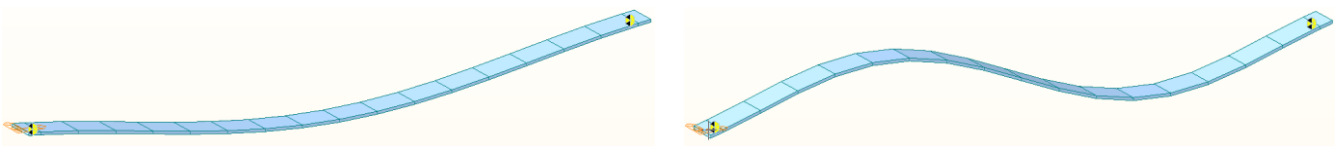
Phép đo sử dụng cảm biến ADXL345 và ADXL355 được thực hiện đơn giản, không cần

nguồn điện 220V như các thiết bị truyền thống trên thị trường (IMV5123/6, SDA-810C, SDA-830C), điều này rất cần thiết, thuận lợi trong khi đo thực tế công trình.



Hình 6. Sơ đồ kết cấu dầm thí nghiệm
Bảng 2. Các thông số của dầm thí nghiệm

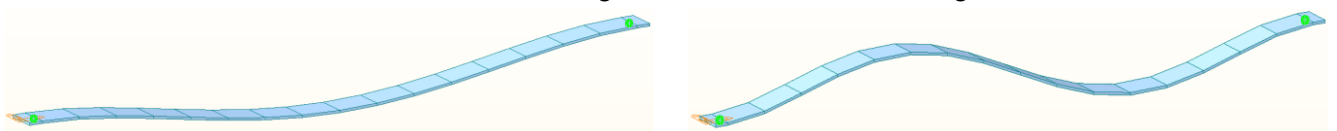
Thông số	Đơn vị	Sơ đồ gối đàn hồi	Sơ đồ gối ngàm
Chiều dài nhịp	mm	1500	1500
Mặt cắt ngang	mm	70x5	70x5
Mô đun đàn hồi	kN/m ²	1,9995.10 ⁸	1,9995.10 ⁸
Trọng lượng bản thân	kN/m ³	77,09	77,09
Kích thước gối cao su	mm	50x50x18	-
Độ cứng gối cao su Dx	kN/mm	0,1	-
Độ cứng gối cao su Dy	kN/mm	0,1	-
Độ cứng gối cao su Dz	kN/mm	0,3	-



a) Dạng dao động 1, $f_1 = 9,333$ Hz

b) Dạng dao động 2, $f_2 = 27,183$ Hz

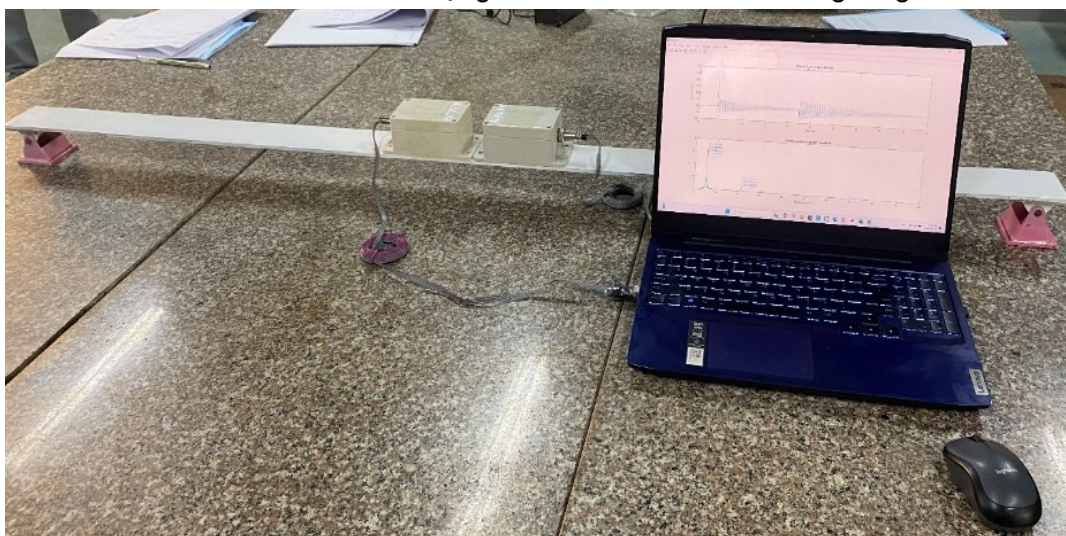
Hình 7. Hai mode dao động đầu tiên của dầm kê trên gối cao su



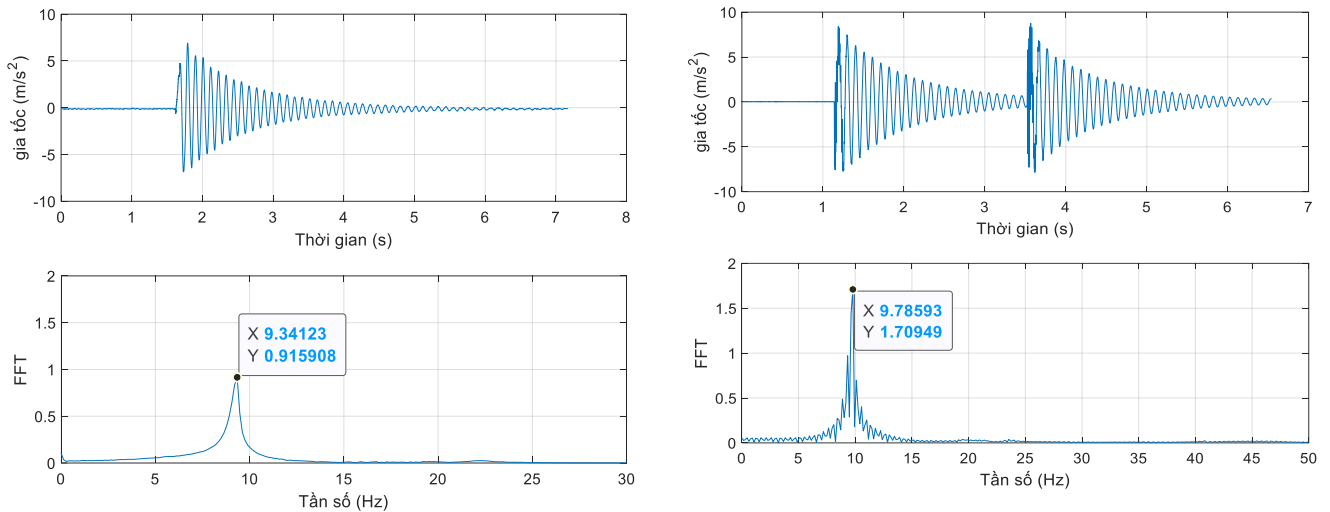
a) Dạng dao động 1, $f_1 = 12,999$ Hz

b) Dạng dao động 2, $f_2 = 35,827$ Hz

Hình 8. Hai mode dao động đầu tiên của dầm kê trên gối ngàm



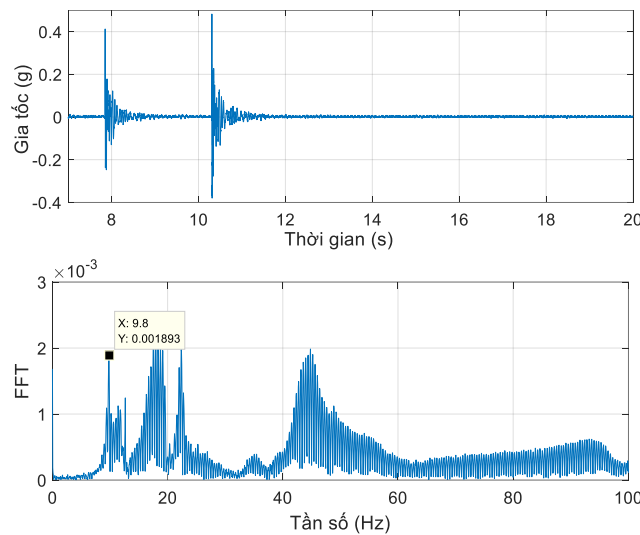
Hình 9. Đo dao động dầm thí nghiệm



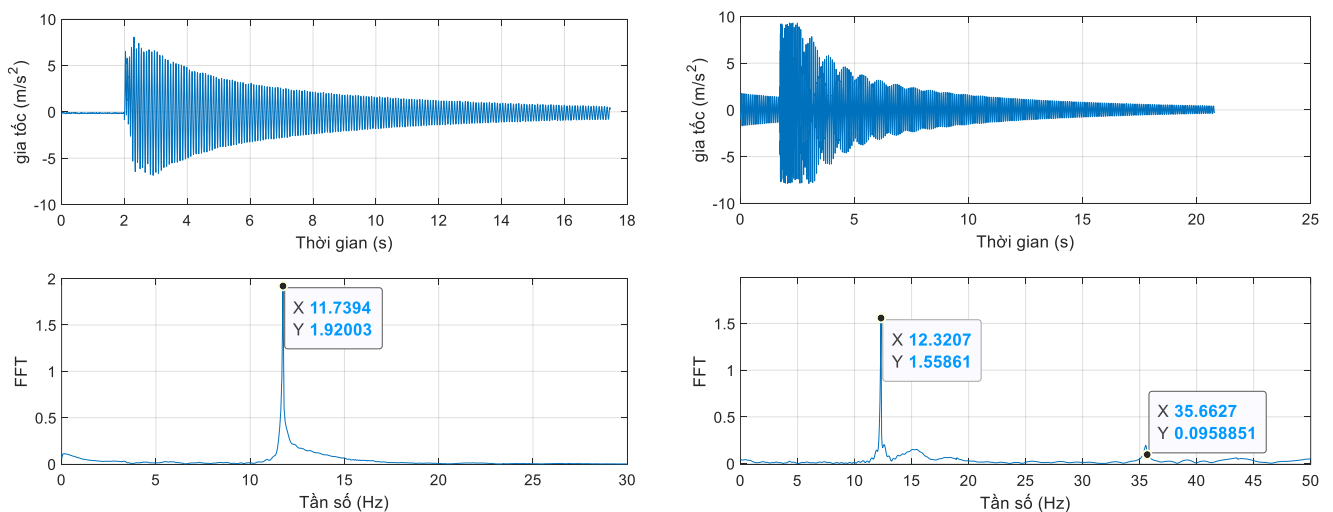
a) Cảm biến ADXL345 lần đo 1

b) Cảm biến ADXL355 lần đo 1

Hình 10. Biểu đồ gia tốc và phân tích FFT dao động dầm thí nghiệm trên gối cao su khi sử dụng cảm biến ADXL345 và ADXL355



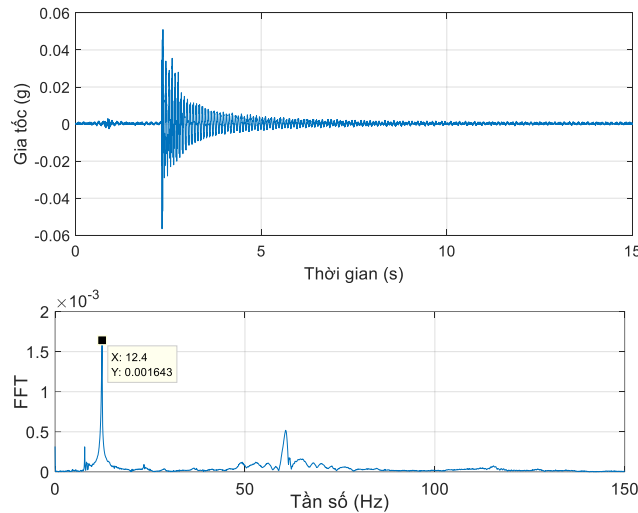
Hình 11. Biểu đồ gia tốc và phân tích FFT dao động dầm thí nghiệm trên gối cao su khi sử dụng thiết bị SDA-810C



a) Cảm biến ADXL345 lần đo 3

b) Cảm biến ADXL355 lần đo 1

Hình 12. Biểu đồ gia tốc và phân tích FFT dao động dầm thí nghiệm trên gối ngàm khi sử dụng cảm biến ADXL345 và ADXL355



Hình 13. Phân tích dao động dầm thí nghiệm trên gối ngàm khi sử dụng thiết bị SDA-810C

Bảng 3. Kết quả đo, tần số phân tích của dầm thí nghiệm

Lần đo	SDA				Phân tích PTHH				ADXL345				ADXL355			
	1	2	3		Phân tích	Sai khác	1	2	3	Sai khác	1	2	3	Sai khác		
Trường hợp dầm thí nghiệm kê trên gối cao su																
Tần số (Hz)	9,80	9,60	9,80		9,33		9,34	9,49	9,51		9,78	9,63	9,80			
Trung bình (Hz)		9,73			9,33	4,1%		9,45		2,9%		9,74		0,1%		
Trường hợp dầm thí nghiệm kê trên gối ngàm																
Tần số (Hz)	12,40	12,47	12,47		12,99		11,69	11,71	11,74		12,23	12,27	12,32			
Trung bình (Hz)		12,45			12,99	4,4%		11,71		5,9%		12,28		1,4%		

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày việc thiết kế, chế tạo thiết bị chuyên dụng sử dụng cảm biến gia tốc MEMS ADXL345 và ADXL355.

Tiến hành chế tạo mô hình và thí nghiệm phân tích dao động tự do bằng thiết bị chế tạo, kết quả được so sánh tham chiếu với thiết bị được sử dụng khá phổ biến trong đo dao động công trình là SDA-810C và phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn.

Các kết quả đo cho thấy sự phù hợp về mặt cơ học trong các kết quả đo. Kết quả đo bằng các cảm biến chế tạo là khá tốt khi so sánh với SDA-810C với sai số dưới 6%.

Kết quả này cho thấy khả năng ứng dụng của thiết bị chế tạo sử dụng cảm biến MEMS trong phân tích, xác định tần số dao động phục vụ đánh giá tình trạng kỹ thuật của kết cấu công trình. Ưu điểm nổi trội của thiết bị chế tạo là khả năng di động, chi phí thấp, giám sát trực tuyến so với các thiết bị đo truyền thống. Hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là lưu trữ dữ liệu sử dụng

công nghệ LoRa hoặc kết nối 4G và học máy để đưa ra các dự báo, đánh giá về tình trạng kết cấu công trình.

Tài liệu tham khảo

[1] G. Boscato, L.Z. Fragonara, A. Cecchi, E. Reccia, D. Baraldi. (2019). Structural Health Monitoring through Vibration-Based Approaches. *Shock and Vibration*, 2019(1), 2380616.

[2] K.-W. Liao, M.-Y. Cheng, Y.-F. Chiu, J.-H. Lee. (2016). Preliminary bridge health evaluation using the pier vibration frequency. *Construction and Building Materials*, 102(1), 552-563.

[3] A. Lyapin, Y. Shatilov. (2016). Vibration-based Damage Detection of the Reinforced Concrete Column. *Procedia Engineering*, 150, 1867-1871.

[4] H.P. Hoa, N.N. An. (2017). Đánh giá sức khỏe kết cấu cầu bằng phương pháp đo dao động xung kích. *Tạp chí Giao thông vận tải*, 7.

[5] N.T. Minh, Đ.A. Tú. (2016). Ảnh hưởng một số loại hư hỏng đến các đặc trưng dao động của

- cầu dầm bê tông dự ứng lực giản đơn. *Tạp chí Giao thông vận tải*, 9, 39-41.
- [6] A.S. Azhar, S.A. Kudus, A. Jamadin, N.K. Mustaffa, K. Sugiura. (2024). Recent vibration-based structural health monitoring on steel bridges: Systematic literature review. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102501.
- [7] C.-C. Comisu, N. Taranu, G. Boaca, M.-C. Scutaru. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *Procedia Engineering*, 199, 2054-2059.
- [8] H. Hasani, F. Freddi, R. Piazza, F. Ceruffi. (2024). A Wireless Data Acquisition System Based on MEMS Accelerometers for Operational Modal Analysis of Bridges. *Sensors*, 24(7), 2121.
- [9] MIDAS IT Co., Ltd. (2022). Midas Civil: Analysis for Civil Structures.