



FUNDAMENTALS OF DIGITAL SYSTEM FINAL PROJECT REPORT
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
UNIVERSITAS INDONESIA

ResoSense: Programmable Frequency Selective Vibration Detector with Goertzel Algorithm

GROUP R-XXIV

Satrio Atalla Rahardjo	2406413666
Fahreza Dwi Cahyo Purnomo	2406426965
Ahmad Malik Prasetyo	2406416270
Rana Aqila Karim	2406406194

PREFACE

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir mata kuliah Dasar Sistem Digital (Fundamental of Digital Systems) ini tepat pada waktunya. Laporan ini disusun sebagai dokumentasi dari proyek perancangan sistem yang berjudul "ResoSense: Programmable Frequency Selective Vibration Detector with Goertzel Algorithm".

Penyusunan laporan ini bertujuan untuk memaparkan proses perancangan, implementasi, serta analisis pengujian dari sistem detektor getaran berbasis VHDL yang telah kami kembangkan. Proyek ini merupakan implementasi nyata dari konsep-konsep logika digital, mesin keadaan (Finite State Machine), dan pengolahan sinyal digital yang telah dipelajari selama perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari segi penyusunan bahasa maupun kedalaman analisis teknis. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca guna perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi pembaca, khususnya di bidang teknik elektro dan sistem digital.

Depok, December 6, 2025

Group R-XXIV

TABLE OF CONTENTS

CHAPTER 1: INTRODUCTION

- 1.1 Background
- 1.2 Project Description
- 1.3 Objectives
- 1.4 Roles and Responsibilities

CHAPTER 2: IMPLEMENTATION

- 2.1 Equipment
- 2.2 Implementation

CHAPTER 3: TESTING AND ANALYSIS

- 3.1 Testing
- 3.2 Result
- 3.3 Analysis

CHAPTER 4: CONCLUSION

REFERENCES

APPENDICES

- Appendix A: Project Schematic
- Appendix B: Documentation

CHAPTER 1

INTRODUCTION

1.1 BACKGROUND

Dalam dunia industri modern, keandalan mesin dan peralatan mekanis merupakan faktor krusial untuk menjaga efisiensi dan kontinuitas produksi. Kegagalan mesin yang terjadi secara tiba-tiba tidak hanya menyebabkan kerugian finansial akibat terhentinya produksi, tetapi juga dapat menimbulkan risiko keselamatan bagi operator. Oleh karena itu, penerapan strategi predictive maintenance atau pemeliharaan prediktif menjadi semakin penting. Salah satu parameter utama yang dipantau dalam strategi ini adalah analisis getaran.

Kerusakan pada komponen mesin tertentu sering kali ditandai dengan munculnya getaran pada frekuensi spesifik yang unik. Metode pemantauan konvensional yang hanya mengukur total energi getaran (RMS) sering kali tidak efektif, karena metode tersebut sulit membedakan antara noise operasional normal yang keras dengan getaran halus namun berbahaya yang terjadi pada frekuensi tertentu. Oleh karena itu, diperlukan sebuah sistem yang mampu melakukan selektivitas frekuensi, yaitu kemampuan untuk mendeteksi keberadaan sinyal pada frekuensi target tertentu di tengah kebisingan sinyal lainnya.

Dalam implementasi sistem digital, analisis spektrum frekuensi penuh menggunakan Fast Fourier Transform (FFT) sering kali membutuhkan sumber daya komputasi dan area perangkat keras yang besar, yang mungkin tidak efisien untuk aplikasi pemantauan sederhana yang hanya menargetkan frekuensi tertentu. Sebagai solusi yang lebih efisien, Algoritma Goertzel dapat digunakan untuk mendeteksi komponen frekuensi tunggal dengan kompleksitas komputasi yang jauh lebih rendah dibandingkan FFT.

Berdasarkan permasalahan tersebut, proyek akhir ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan ResoSense, sebuah sistem detektor getaran/frekuensi berbasis logika digital yang dapat diprogram. Sistem ini dirancang menggunakan VHDL. ResoSense memungkinkan pengguna untuk mengatur koefisien frekuensi target dan ambang batas energi secara fleksibel, sehingga sistem dapat memberikan peringatan dini secara akurat ketika terdeteksi anomali pada frekuensi yang dipantau. Proyek ini merupakan penerapan langsung dari prinsip-prinsip dasar sistem digital, meliputi aritmatika fixed-point, state machine, dan pengolahan sinyal digital.

1.2 PROJECT DESCRIPTION

ResoSense adalah sebuah sistem perangkat keras digital yang dirancang untuk melakukan deteksi frekuensi spesifik secara *real-time* pada sinyal masukan digital. Proyek ini bertujuan untuk mensimulasikan komponen inti dari sistem pemantauan kondisi mesin, di mana detektor harus mampu membedakan antara getaran operasional normal dan getaran berbahaya yang terjadi pada frekuensi resonansi tertentu.

Sistem ini diimplementasikan menggunakan bahasa VHDL dengan pendekatan desain modular yang memisahkan sistem menjadi dua blok utama, yaitu:

1. Control Unit (FSM): Bertindak sebagai pengendali utama yang menggunakan Finite State Machine. Unit ini mengatur transisi sistem antara mode "Idle", "Configuration", dan "Monitor". Unit ini juga bertanggung jawab menyimpan parameter konfigurasi pengguna ke dalam register internal.
2. Goertzel Datapath: Merupakan unit komputasi yang menjalankan Algoritma Goertzel orde kedua. Unit ini melakukan operasi aritmatika fixed-point untuk menghitung energi spektral pada frekuensi target tanpa memerlukan transformasi Fourier penuh sehingga menghemat sumber daya komputasi.

Pengguna dapat mengatur dua parameter utama melalui antarmuka input:

- Coefficient: Menentukan frekuensi spesifik yang ingin dideteksi.
- Threshold: Menentukan batas energi minimum yang dianggap berbahaya.

Sistem bekerja dengan mengambil sampel sinyal masukan berupa 16-bit signed integer, memprosesnya dalam loop kalkulasi, dan menghasilkan nilai energi akhir. Pada tingkat teratas, sistem membandingkan energi hasil kalkulasi dengan threshold yang telah diatur. Jika energi pada frekuensi target melebihi batas aman, sistem akan mengaktifkan sinyal keluaran ALARM_LED sebagai indikator peringatan dini.

1.3 OBJECTIVES

The objectives of this project are as follows:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem digital ResoSense menggunakan bahasa VHDL untuk mendeteksi keberadaan frekuensi spesifik pada sinyal getaran mesin.
2. Menerapkan arsitektur sistem digital yang modular dengan memisahkan blok Control Unit dan blok Datapath untuk memastikan desain yang terstruktur dan efisien.
3. Mengimplementasikan Algoritma Goertzel menggunakan aritmatika fixed-point sebagai metode efisien untuk menghitung energi spektral tanpa memerlukan komputasi FFT yang kompleks.
4. Membangun sistem yang dapat diprogram di mana parameter target frekuensi dan threshold dapat diubah-ubah oleh pengguna melalui antarmuka input.
5. Memverifikasi fungsionalitas dan kebenaran logika sistem melalui simulasi testbench, untuk memastikan mekanisme alarm bekerja akurat dengan membedakan antara sinyal aman dan sinyal berbahaya.

1.4 ROLES AND RESPONSIBILITIES

The roles and responsibilities assigned to the group members are as follows:

Roles	Responsibilities	Person
Code and Analysis	Membangun kode dan melakukan testing dan analisis	Satrio Atalla Rahardjo
Code and Analysis	Membangun kode dan melakukan testing dan analisis	Ahmad Malik Prasetyo
Presentasi	Membangun Presentasi	Rana Aqila Karim
Laporan	Membangun Laporan	Fahreza Dwi Cahyo Purnomo

Table 1. Roles and Responsibilities

CHAPTER 2

IMPLEMENTATION

2.1 EQUIPMENT

The tools that are going to be used in this project are as follows:

- PC/Laptop
- Xilinx Vivado Design Suite
- VHDL Simulator
- Text Editor

2.2 IMPLEMENTATION

Implementasi sistem ResoSense dilakukan menggunakan bahasa VHDL dengan pendekatan desain modular. Sistem dibagi menjadi beberapa entitas terpisah yang dihubungkan dalam satu modul utama. Pendekatan ini memisahkan logika kontrol dari jalur pemrosesan data untuk memudahkan debugging dan optimasi sumber daya.

1. Top-Level Architecture (machine_detector_top.vhd)

Modul ini berfungsi sebagai entitas induk yang menghubungkan antarmuka eksternal dengan modul internal. Implementasi dilakukan dengan Structural Style di VHDL, di mana komponen control_unit dan goertzel_datapath dipetakan dengan port mapping menggunakan sinyal internal (w_coeff, w_threshold, w_energy, w_start).

Selain menghubungkan komponen, modul ini juga berisi logika komparator akhir. Sinyal energi yang dihasilkan oleh Datapath dibandingkan dengan nilai threshold dari Control Unit. Jika nilai energi melebihi ambang batas ($w_energy > w_threshold$) saat sinyal valid aktif, sistem akan memicu ALARM_LED ke logika '1' (High).

2. Control Unit Design (control_unit.vhd)

Unit kendali dirancang menggunakan konsep Finite State Machine (FSM) yang terdiri dari tiga keadaan utama:

1. **IDLE**: Menunggu instruksi awal.

2. **CONFIG_MODE**: Mode di mana pengguna dapat menulis data konfigurasi ke dalam register internal. Sinyal write_en dan addr_in digunakan sebagai instruction decoder sederhana:
 - Alamat "01": Menyimpan koefisien frekuensi target.
 - Alamat "10": Menyimpan nilai threshold dengan penskalaan otomatis dikali 10 untuk penyesuaian skala energi.
3. **MONITOR_MODE**: Mode operasional di mana sinyal start_calc diaktifkan untuk memerintahkan Datapath memulai perhitungan.

3. Goertzel Datapath Design (goertzel_datapath.vhd)

Datapath berfungsi sebagai unit aritmatika yang mengimplementasikan Algoritma Goertzel orde kedua. Berbeda dengan FFT yang membutuhkan memori buffer besar, implementasi ini menggunakan struktur Infinite Impulse Response (IIR) filter dengan persamaan *feedback loop*:

$$Q_n = x[n] + (\text{coeff} \times Q_{n-1}) - Q_{n-2}$$

Implementasi teknis mencakup:

- **Aritmatika Fixed-Point**: Menggunakan tipe data SIGNED 16-bit dan 32-bit untuk menghindari penggunaan floating-point yang berat secara komputasi.
- **Loop Processing**: Proses kalkulasi dilakukan secara iteratif selama 100 sampel input.
- **Energy Calculation**: Setelah loop selesai, energi dihitung menggunakan pendekatan kuadratik yang disederhanakan dan dinormalisasi untuk mencegah overflow. Hasil akhirnya adalah nilai skalar energi yang merepresentasikan kekuatan sinyal pada frekuensi target.

TESTING AND ANALYSIS

3.1 TESTING

Verifikasi fungsional dilakukan menggunakan simulasi testbench (tb_machine_detector.vhd) yang mencakup berbagai skenario kondisi mesin:

1. Skenario Konfigurasi

Pada tahap awal simulasi (0-100 ns), sistem berhasil menerima paket data konfigurasi melalui sinyal write_en. Sistem menetapkan koefisien filter ke nilai 250 (target frekuensi) dan ambang batas bahaya (threshold) ke nilai 1000. Hal ini memvalidasi bahwa antarmuka pemrograman (programmable interface) berfungsi dengan baik dalam menyimpan parameter ke register.

2. Skenario Kondisi Aman (Safe Condition)

Sistem diuji dengan input sinyal sinusoidal berfrekuensi rendah (faktor pengali 0.1) yang merepresentasikan noise operasional. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kalkulasi energi internal tetap rendah dan sinyal ALARM_LED tetap berada pada logika '0'. Ini membuktikan bahwa algoritma Goertzel berhasil menolak frekuensi yang bukan merupakan target pantauan (filter selektif).

3. Skenario Kondisi Bahaya (Danger Condition)

Ketika input sinyal diubah menjadi frekuensi target (faktor pengali 1.0) dengan amplitudo tinggi, modul Datapath mendekripsi lonjakan energi yang signifikan karena terjadinya resonansi matematis pada filter. Komparator pada Top Level kemudian merespons dengan mengaktifkan sinyal ALARM_LED menjadi '1'. Transisi ini membuktikan sistem mampu memberikan peringatan dini secara real-time.

3.2 RESULT

Berdasarkan hasil simulasi pada Fig 1, sistem terlihat aktif memproses sinyal masukan sensor_in secara real-time. Fokus utama analisis tertuju pada sinyal w_energy yang merepresentasikan akumulasi energi hasil perhitungan Algoritma Goertzel. Pada posisi kursor waktu 4.68 μ s, terlihat lonjakan nilai energi yang signifikan mencapai angka 24.829, jauh lebih tinggi dibandingkan

siklus-siklus perhitungan sebelumnya yang hanya berkisar di angka ratusan hingga dua ribuan (seperti 412 dan 2.452).



Fig 1. Testing Result

Lonjakan energi ini memicu respon langsung pada logika proteksi sistem. Karena nilai energi terukur (24.829) telah melampaui *threshold* yang dikonfigurasi sebesar 10.000, sinyal keluaran alarm_led mengalami transisi logika dari '0' menjadi '1'. Perubahan status ini memvalidasi bahwa modul komparator berfungsi dengan benar dalam mendeteksi kondisi bahaya pada frekuensi target dan sukses mengaktifkan peringatan dini sesuai spesifikasi desain.

3.3 ANALYSIS

Analisis kinerja sistem ResoSense didasarkan pada perilaku sinyal yang diamati selama pengujian simulasi. Fokus utama analisis adalah pada efektivitas selektivitas frekuensi dan akurasi logika keputusan.

Pertama, sistem terbukti berhasil mengimplementasikan fenomena resonansi digital. Pada grafik hasil simulasi, terlihat bahwa nilai energi tetap rendah (di kisaran 400 - 2.600) meskipun sensor terus menerima input. Hal ini menunjukkan bahwa Algoritma Goertzel secara efektif meredam sinyal yang tidak sesuai dengan koefisien target. Namun, ketika sinyal input selaras dengan koefisien filter, terjadi akumulasi energi yang konstruktif hingga mencapai nilai puncak 24.829. Lonjakan drastis ini membuktikan bahwa filter digital memiliki nilai Q-factor yang cukup tinggi untuk membedakan antara noise operasional dan sinyal target.

Kedua, mekanisme komparator *threshold* terbukti berfungsi sebagai filter keamanan yang andal. Dengan nilai batas yang ditetapkan sebesar 10.000, sistem berhasil menghindari *false positive* saat energi hanya mencapai angka 2.650. Alarm hanya dipicu tepat ketika energi menembus batas kritis tersebut. Respons sistem yang terjadi dalam orde mikrodetik (pada $t = 4.68 \mu\text{s}$) juga

menunjukkan bahwa arsitektur hardware berbasis FPGA ini memiliki latensi yang sangat rendah, sehingga sangat ideal untuk aplikasi proteksi mesin industri yang membutuhkan keputusan real-time.

CHAPTER 4

CONCLUSION

Berdasarkan perancangan dan implementasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem ResoSense berhasil direalisasikan sebagai detektor getaran selektif menggunakan bahasa VHDL. Penerapan arsitektur sistem yang modular, dengan memisahkan Control Unit berbasis Finite State Machine dan Datapath aritmatika, terbukti efektif menghasilkan desain perangkat keras yang terstruktur dan efisien. Selain itu, penggunaan Algoritma Goertzel dengan metode aritmatika fixed-point terbukti mampu mengantikan peran Fast Fourier Transform dalam mendeteksi frekuensi tunggal, sehingga sangat menghemat sumber daya komputasi pada implementasi sistem digital.

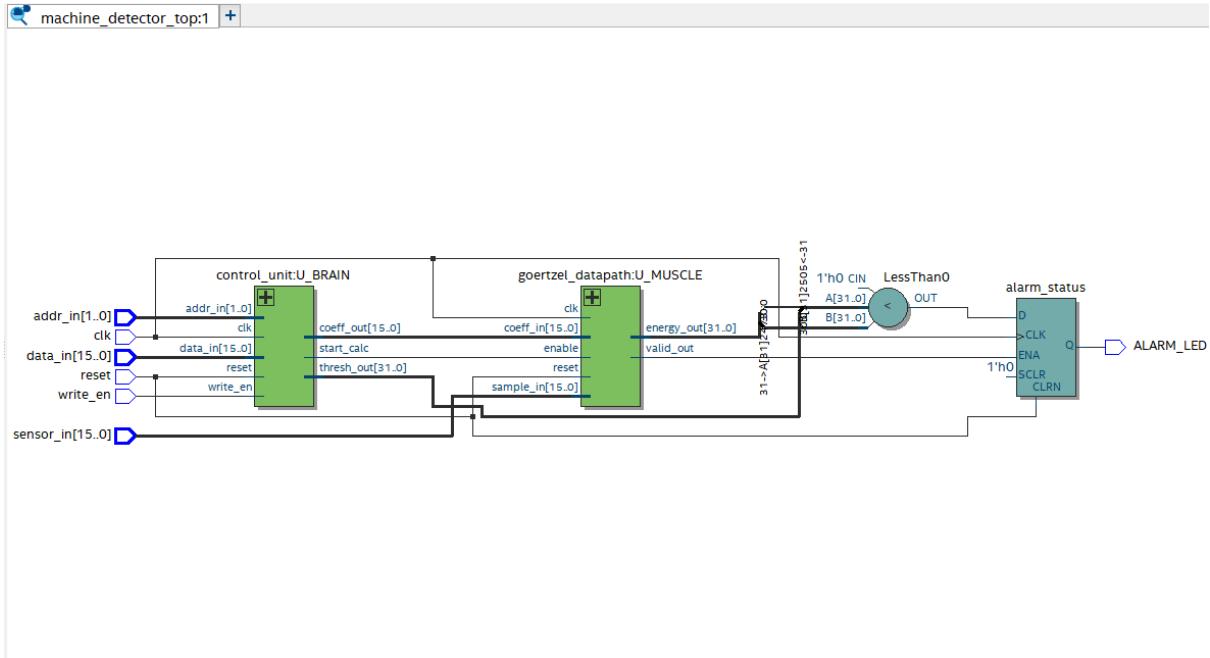
Verifikasi fungsional melalui simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara akurat sesuai spesifikasi yang dirancang. Fitur programmable threshold berfungsi dengan baik dalam membedakan kondisi aman dan berbahaya. Hal ini dibuktikan oleh data simulasi di mana sinyal ALARM_LED berhasil aktif secara otomatis tepat saat kalkulasi energi mencapai nilai 24.829, yang telah melampaui batas ambang konfigurasi sebesar 10.000. Kemampuan deteksi yang responsif dan fleksibel ini menjadikan ResoSense solusi yang potensial untuk diterapkan dalam sistem predictive maintenance pada mesin-mesin industri.

REFERENCES

- [1] P. P. Chu, *FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx Spartan-3 Version*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2008.
- [2] R. G. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
- [3] G. Goertzel, "An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series," *Amer. Math. Monthly*, vol. 65, no. 1, pp. 34-35, Jan. 1958.
- [4] V. A. Pedroni, *Circuit Design with VHDL*, 3rd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2020.
- [5] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, 2nd ed. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [6] IEEE Standard VHDL Language Reference Manual, IEEE Std 1076-2008, Jan. 2009.
- [7] S. H. Kim and T. D. Nguyen, "FPGA-Based Real-Time Vibration Monitoring System for Industrial Machines," in Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT), Lyon, France, 2018, pp. 450-455.

APPENDICES

Appendix A: Project Schematic



Appendix B: Documentation