

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA KHOA HỌC MÁY TÍNH VÀ KỸ THUẬT MÁY TÍNH



BÁO CÁO
ĐỒ ÁN MÔN HỌC THIẾT KẾ LUẬN LÝ

Hệ thống ổ khóa điện tử

Nhóm 6 - HK241

Giảng viên hướng dẫn: Huỳnh Phúc Nghị

STT	Họ và tên	MSSV	Lớp	Ghi chú
1	Đỗ Tuấn Anh	2210050	L03	
2	Nguyễn Khắc Duy	2210517	L03	
3	Dương Minh Hiếu	2210978	L03	
4	Trịnh Thị Mỹ Lệ	2211832	L03	

Thành phố Hồ Chí Minh, tháng 10 năm 2024

Mục lục

1	Giới thiệu	3
1.1	Lý do chọn đề tài	3
1.2	Mục tiêu nghiên cứu	3
1.3	Công cụ sử dụng	4
1.3.1	Công cụ phần mềm	4
1.3.2	Công cụ phần cứng	4
2	Cơ sở lý thuyết	5
2.1	Tổng quan lý thuyết về ổ khóa điện tử	5
2.1.1	Giới thiệu ổ khóa điện tử	5
2.1.2	Nguyên lý hoạt động	5
2.1.3	Các thành phần của ổ khóa	5
2.2	Những tính năng ứng dụng cơ bản của sản phẩm	6
2.2.1	Xác thực và quản lý mật khẩu	6
2.2.2	Cảnh báo bảo mật và tự động khóa	7
2.3	Những tính năng ứng dụng nâng cao của sản phẩm	7
2.3.1	Nhập mật khẩu từ bàn phím ma trận mềm 4x4	7
2.3.2	Hiển thị trạng thái và hướng dẫn qua LCD	8
2.3.3	Mở rộng với UART	8
3	Thiết kế sản phẩm	10
3.1	Sơ đồ khối cơ bản	10
3.2	Máy trạng thái	11
3.3	Mô tả hoạt động các khối	12
3.3.1	Khối hiển thị	12
3.3.2	Khối chuyển 10 bit sang 16 bit	13
3.3.3	Khối kiểm tra mật khẩu	13
3.3.4	Khối đặt lại mật khẩu	14
3.3.5	Khối sai mật khẩu	15
3.3.6	Khối trạng thái và thời gian	16
3.3.7	Khối LED RGB	17
3.3.8	Khối đóng mở cửa	18

4	Hiện thực	19
4.1	Flowchart	19
4.2	Mô phỏng trên Vivado	20
4.2.1	Khối hiển thị	20
4.2.2	Khối chuyển 10 bit sang 16 bit	20
4.2.3	Khối kiểm tra mật khẩu	21
4.2.4	Khối đặt lại mật khẩu	21
4.2.5	Khối sai mật khẩu	23
4.2.6	Khối trạng thái và thời gian	23
4.2.7	Khối LED RGB	25
4.2.8	Khối đóng mở cửa	26
5	Phương hướng cải tiến	27
5.1	Sơ đồ khối mở rộng	27
5.2	Liquid-crystal display LCD HD44780U 16x02	27
5.2.1	Mô tả	27
5.2.2	Bảng các chân kết nối với LCD 16x02	29
5.2.3	Bảng lệnh	30
5.2.4	Hoạt động	31
5.2.5	Sơ đồ khối	32
5.2.6	Thiết kế mạch LCD 16x02 giao tiếp Pmod bằng Altium	33
5.2.7	Mô phỏng trên Vivado	35
5.3	Bàn phím ma trận mềm 4x4	36
5.3.1	Giới thiệu	36
5.3.2	Nguyên lý hoạt động	37
5.3.3	Kết nối các chân với board Arty-Z7	38
5.3.4	Mô phỏng trên Vivado	39
6	Kết luận	40
7	Tài liệu tham khảo	41

1 Giới thiệu

1.1 Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh xã hội ngày càng hiện đại, nhu cầu về các hệ thống bảo mật an ninh ngày càng gia tăng, đặc biệt là những hệ thống linh hoạt và có khả năng thích ứng cao. Ổ khóa điện tử là một trong những thiết bị bảo mật và dần trở nên phổ biến trong cuộc sống. Nó thường được sử dụng trong các văn phòng hay nhà ở. Loại khóa này sử dụng mật khẩu để mở thay vì chìa khóa. Khi kẻ gian nhập mật khẩu sai nhiều lần, hệ thống sẽ tăng thời gian chờ nhập mật khẩu lần tới lên và phát thông báo đến thiết bị di động của chủ nhà. Từ những lý do đó, nhóm chúng em quyết định chọn đề tài "Hệ thống ổ khóa điện tử". Với đề tài này, chúng em sẽ vận dụng những kiến thức về Thiết kế luận lý HDL và các môn học liên quan để xây dựng một hệ thống khóa điện tử đơn giản trên kit phát triển FPGA Arty-Z7 kết hợp Extension board cho Arty-Z7. Kit FPGA Arty-Z7 không chỉ cung cấp một nền tảng mạnh mẽ với khả năng xử lý song song và khả năng tái cấu hình cao, mà còn cho phép tích hợp các tính năng mở rộng như giao tiếp UART, module SIM, và màn hình LCD, giúp cho thiết bị bảo mật trở nên toàn diện hơn. Việc thực hiện đề tài này giúp khai thác tối đa tiềm năng của FPGA trong các ứng dụng an ninh và tạo ra sản phẩm có tính ứng dụng cao trong đời sống.

1.2 Mục tiêu nghiên cứu

Đề tài hướng đến các mục tiêu cụ thể như thiết kế và phát triển hệ thống khóa điện tử với các thành phần cơ bản gồm: Led 7 đoạn, công tắc chọn số, các nút bấm, đèn LED RGB. Bên cạnh đó, đề tài sẽ triển khai các tính năng bảo mật nâng cao, bao gồm cơ chế xác thực mật khẩu với giới hạn số lần nhập sai, khóa thao tác khi quá số lần nhập sai cho phép. Hệ thống còn cung cấp chức năng quản lý mật khẩu linh hoạt, cho phép người dùng đặt lại mật khẩu sau khi nhập đúng, nhằm đảm bảo an toàn và tối ưu hóa trải nghiệm sử dụng. Ngoài ra, đề tài đặt mục tiêu phát triển giao diện thân thiện, dễ sử dụng với định hướng mở rộng hơn các tính năng như hiển thị trạng thái thông qua màn hình LCD, báo động thông qua buzzer, tích hợp thêm UART và loa vào trong hệ thống để hiển thị các trạng thái hoạt động và thông báo lỗi. Qua đó, nghiên cứu cũng sẽ đánh giá khả năng ứng dụng FPGA trong lĩnh vực bảo mật, đồng thời mở ra hướng nghiên cứu mới trong việc phát triển các thiết bị bảo mật điện tử có thể tùy biến linh hoạt.

1.3 Công cụ sử dụng

Trong đề tài này, chúng em sử dụng kết hợp các công cụ phần mềm và phần cứng nhằm đảm bảo tính linh hoạt, chính xác và khả năng mở rộng của hệ thống thiết kế.

1.3.1 Công cụ phần mềm

Về phần mềm, chúng em sử dụng Vivado như một công cụ chính để mô phỏng và triển khai hệ thống trên phần cứng. Đây là phần mềm mạnh mẽ hỗ trợ thiết kế logic số, từ mô phỏng đến tổng hợp và ánh xạ lên FPGA. Ngoài ra, công cụ phần mềm draw.io được chọn để thực hiện việc thiết kế sơ đồ khối và xây dựng các flowchart chi tiết cho toàn bộ hệ thống. Draw.io cho phép chúng em dễ dàng phác thảo và chỉnh sửa cấu trúc các khối chức năng, đồng thời minh họa rõ ràng các luồng xử lý và logic điều khiển của hệ thống khóa điện tử. Đây là công cụ hữu ích giúp trực quan hóa thiết kế và hỗ trợ nhóm trong quá trình phân tích và cải tiến các luồng xử lý phức tạp.

1.3.2 Công cụ phần cứng

Về phần cứng, nhóm hiện thực trên kit phát triển FPGA Arty-Z7 làm nền tảng chính. Kit Arty-Z7 này cho phép chúng em hiện thực các chức năng điều khiển phức tạp và xử lý song song, từ đó tối ưu hóa hiệu quả hoạt động của hệ thống. Board Arty Z7 bao gồm các thành phần chính sau:

- CPU: ARM Cortex-A9 dual-core processor (Zynq-7000 SoC).
- FPGA: Xilinx Artix-7 XC7A35T-1CPG236C.
- Bộ nhớ: 512 MB DDR3L SDRAM và 256 MB Quad-SPI Flash.
- Các nút bấm và công tắc, LED đơn màu và LED RGB.
- Các cổng giao tiếp: USB, Ethernet, HDMI, Pmod, ...
- Các thành phần khác

Ngoài ra, nhóm chúng em sử dụng thêm Extension board nhằm mở rộng các switch, LED đơn, và LED 7 đoạn. Cụ thể Extension board mở rộng thêm 8 switch, 4 LED đơn, và 4 LED 7 đoạn. Các chức năng mở rộng được kết nối thông qua các chân I/O trên board Arty Z7. Sự kết hợp giữa FPGA Arty-Z7 và Extension board giúp hệ thống đạt được tính hoàn thiện và đáp ứng tốt các yêu cầu kỹ thuật của đề tài.

2 Cơ sở lý thuyết

2.1 Tổng quan lý thuyết về ổ khóa điện tử

2.1.1 Giới thiệu ổ khóa điện tử

Ổ khóa điện tử là một thiết bị tiên tiến, được phát triển để thay thế các ổ khóa cơ truyền thống, dựa trên việc sử dụng mật mã và các công nghệ an ninh hiện đại. Với cấu trúc bên trong gồm mạch điện tử và cơ cấu cơ khí, ổ khóa điện tử cho phép kiểm soát việc đóng/mở cửa thông qua các phương thức xác thực như nhập mật khẩu. Không giống như ổ khóa cơ thông thường chỉ sử dụng chìa khóa vật lý dễ bị phá hoại, sao chép, khóa điện tử tích hợp các tính năng mã hóa thông tin và cảnh báo an ninh, giúp nâng cao mức độ bảo vệ tài sản. Hơn nữa, hệ thống còn có khả năng phát cảnh báo khi phát hiện các dấu hiệu cạy phá hoặc mở cửa không đúng cách, mang lại sự an tâm tối ưu cho người sử dụng.

2.1.2 Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý hoạt động của ổ khóa điện tử dựa trên sự kết hợp giữa công nghệ điện tử và cơ chế khóa cơ học. Khi người dùng thực hiện xác thực bằng các phương thức như nhập mật khẩu hoặc quét vân tay, thông tin này được chuyển đến một hệ thống để xử lý. Hệ thống sẽ so sánh dữ liệu đầu vào với thông tin mật khẩu đã được đặt trước đó để xác định tính hợp lệ. Nếu thông tin chính xác, tín hiệu được truyền đến cơ cấu cơ khí để chốt khóa được giải phóng, cho phép mở cửa. Ngược lại, nếu thông tin không hợp lệ, hệ thống sẽ từ chối quyền truy cập và có thể kích hoạt báo động. Người dùng có thể đặt được mật khẩu mới để tăng cường bảo mật sau một thời gian sử dụng. Ngoài ra, ổ khóa điện tử còn tích hợp chức năng tự động khóa lại khi cửa được đóng, đảm bảo an ninh ngay cả khi người dùng quên khóa cửa, hoặc nếu người dùng vẫn quên đóng cửa thì hệ thống có khả năng cảnh báo cho người dùng biết.

2.1.3 Các thành phần của ổ khóa

Ổ khóa điện tử được thiết kế với các thành phần chính nhằm đáp ứng các yêu cầu về nhập mật khẩu, hiển thị trạng thái, kiểm tra an ninh, và thực hiện các chức năng khóa/mở cửa một cách hiệu quả. Hệ thống dựa trên nền tảng kit phát triển FPGA Arty-Z7 để đảm bảo khả năng xử lý logic và điều khiển toàn bộ thiết bị. Các thành phần cụ thể bao gồm:

Đầu tiên, Switch (công tắc) được sử dụng để nhập các giá trị đầu vào, chẳng hạn

như mật khẩu để mở khóa hoặc thiết lập mật khẩu mặc định. Đây là giao diện chính để người dùng cung cấp dữ liệu trực tiếp cho hệ thống. Dữ liệu này được hiển thị trên LED 7-Segment, một thành phần quan trọng dùng để hiển thị từng ký tự của mật khẩu trong quá trình nhập liệu. Hệ thống sử dụng bốn LED 7-Segment để mô phỏng việc nhập mật khẩu theo cơ chế dịch chuyển: ký tự mới nhất hiển thị ở ngoài cùng bên phải, các ký tự trước tự động dịch sang trái, giúp người dùng dễ dàng theo dõi quá trình nhập.

Ngoài ra, LED đơn được tích hợp để hiển thị các trạng thái cơ bản của hệ thống, như tín hiệu khóa/mở cửa, thông báo mật khẩu đúng hoặc sai, cũng như báo hiệu khi có cảnh báo xâm nhập. Bên cạnh đó, button (nút nhấn) đóng vai trò quan trọng trong việc thực hiện các tác vụ như xác nhận nhập mật khẩu, mở/đóng cửa, hoặc dừng cảnh báo khi cần thiết. Một số button còn được sử dụng để thay đổi mật khẩu hoặc thiết lập hệ thống.

Hệ thống được lập trình bằng ngôn ngữ thiết kế phần cứng (HDL) trên FPGA, đảm nhận nhiệm vụ xử lý dữ liệu và kiểm tra tính hợp lệ của mật khẩu. Module xử lý tín hiệu bên trong FPGA điều khiển các thành phần đầu vào/đầu ra, đồng thời quản lý logic hoạt động, như so sánh mật khẩu, điều khiển hiển thị trên LED, và kích hoạt cảnh báo khi cần.

Để đảm bảo tính năng tự động hóa, hệ thống tích hợp bộ đếm thời gian (timer) để xử lý các tác vụ liên quan đến thời gian, chẳng hạn tự động khóa cửa sau 10 giây nếu không có thao tác mở, phát cảnh báo sau 30 giây nếu cửa chưa được đóng, hoặc tăng thời gian chờ khi nhập sai mật khẩu nhiều lần.

Các thành phần này phối hợp chặt chẽ để tạo nên một hệ thống khóa điện tử hoàn chỉnh, đáp ứng các yêu cầu đặt ra về bảo mật, tính tiện lợi, và khả năng xử lý hiệu quả các tình huống bất thường. Hệ thống không chỉ đảm bảo an toàn cho người sử dụng mà còn thể hiện tính linh hoạt, hiện đại, phù hợp với các ứng dụng thực tế.

2.2 Những tính năng ứng dụng cơ bản của sản phẩm

2.2.1 Xác thực và quản lý mật khẩu

Hệ thống ổ khóa điện tử được thiết kế với khả năng quản lý và xác thực mật khẩu thông minh. Người dùng nhập mật khẩu qua 4 switch để chọn từng ký tự (từ 0-9), các ký tự được hiển thị trên 4 LED 7-Segment và nháy với tần số 1Hz. Mỗi khi xác nhận bằng nút nhấn Confirm, ký tự hiện tại sẽ cố định và dịch sang trái, nhường chỗ cho ký tự mới được nhập. Khi hoàn thành việc nhập 4 ký tự, hệ thống sẽ so sánh với mật khẩu đã lưu trữ. Nếu mật khẩu chính xác, đèn LED RGB sẽ chuyển sang màu xanh

lá để báo hiệu người dùng có thể mở cửa. Nếu mật khẩu sai, đèn LED RGB sẽ chuyển sang màu đỏ.

Người dùng có thể thay đổi mật khẩu mặc định (0000) sau khi nhập đúng mật khẩu cũ. Để đặt lại mật khẩu, cần nhấn nút Confirm trong 3 lần, sau đó hệ thống sẽ chuyển sang trạng thái nhập mật khẩu mới. Cách nhập tương tự quy trình nhập mật khẩu thông thường. Để lưu mật khẩu mới, người dùng giữ nút Mở/Đóng cửa trong 3 giây, hoặc đang trong quá trình đặt lại mật khẩu người dùng có thể nhấn nút này để hủy thao tác và giữ nguyên mật khẩu cũ. Nếu không thao tác sau 10 giây kể từ lúc cửa được nhập đúng mật khẩu hoặc cửa đã được mở, tính năng đổi mật khẩu sẽ không thể được thực hiện.

2.2.2 Cảnh báo bảo mật và tự động khóa

Hệ thống tích hợp các tính năng bảo mật và tự động khóa để đảm bảo an toàn. Trong trường hợp này, đèn LED RGB sẽ nhấp màu đỏ để hỗ trợ quản lý số lần nhập sai mật khẩu. Người dùng được phép nhập sai không quá 3 lần liên tiếp. Nếu vượt quá giới hạn, hệ thống sẽ khóa bàn phím theo công thức: $(n - 3)^2 \times 60s + 60s$. Ví dụ sau 3 lần liên tục sẽ là 60s, 4 lần liên tục sẽ là 120s và trong lúc này sẽ nhấp đèn led RGB đỏ. Sau thời gian chờ, hệ thống sẽ cho phép nhập lại mật khẩu. Ngoài ra trong quá trình nhập nếu người dùng nhập sai một ký tự cũng có thể tiến hành nhấn nút Đóng/mở để xóa mật khẩu nếu chưa nhập đủ 4 số.

Khi người dùng nhập đúng mật khẩu và mở cửa, nếu không đóng cửa sau 30 giây, hệ thống sẽ phát cảnh báo nhấp đèn LED RGB màu vàng. Người dùng có thể nhấn nút Confirm để tắt cảnh báo này. Nếu cửa được đóng đúng cách, hệ thống sẽ tự động khóa sau 10 giây. Trường hợp người dùng mở và đóng cửa ngay sau đó, thời gian khóa được tính thêm tối thiểu 10 giây để đảm bảo an toàn.

2.3 Những tính năng ứng dụng nâng cao của sản phẩm

2.3.1 Nhập mật khẩu từ bàn phím ma trận mềm 4x4

Hệ thống được mở rộng với khả năng nhập mật khẩu từ bàn phím ma trận mềm 4x4, nâng cao tính linh hoạt, tiện lợi và thân thiện với người dùng hơn so với việc sử dụng các công tắc chuyển đổi (switch). Bàn phím ma trận 4x4 bao gồm 16 phím (4 hàng và 4 cột) tương ứng với các ký tự số (0-9), chữ cái (A, B, C, D) và ký tự (#, *), phù hợp với phạm vi mật khẩu hệ thống cho phép.

Bằng việc tích hợp bàn phím 4x4 vào hệ thống giúp cải thiện trải nghiệm người dùng, tăng độ chính xác và tốc độ nhập mật khẩu. Việc mở rộng này làm cho sản

phẩm ổ khóa điện tử thông minh trở nên hiện đại và phù hợp với nhu cầu thực tế hơn.

2.3.2 Hiện thị trạng thái và hướng dẫn qua LCD

Hệ thống hỗ trợ hiển thị trạng thái và hướng dẫn người dùng thông qua màn hình LCD. Màn hình sẽ hiển thị các thông báo như sau:

- "Enter password to open": Yêu cầu người dùng nhập mật khẩu để mở cửa.
- "Correct, press # open or 3* new": Nhấn "#" để mở cửa hoặc nhấn "*" 3 lần liên tiếp để đặt lại mật khẩu mới.
- "Door opening To close press #": Thông báo cửa đã mở và hướng dẫn người dùng nhấn "#" để đóng cửa.
- "Open over 30s Please press #,*": Khi cửa đã mở quá 30 giây, cảnh báo người dùng đóng cửa hoặc nhấn "*" để tắt cảnh báo.
- "Door close in 10To open press #": Thông báo thời gian cửa sẽ tự động khóa sau 10 giây và hướng dẫn cách mở cửa lại bằng "#".
- "Enter new pass Save press # 3s ": Hướng dẫn người dùng đặt mật khẩu mới và lưu bằng cách nhấn giữ "#" trong 3 giây.
- "Successfully save new pass, EXIT", "Fail to save new": Thông báo đặt mật khẩu thành công hoặc thất bại.
- "Wrong pass! Try again": Thông báo mật khẩu nhập sai, yêu cầu nhập lại.
- "Wrong pass! Wait after: ": Thông báo mật khẩu nhập sai quá số lần quy định và phải chờ sau bao lâu.

Tính năng này giúp người dùng dễ dàng theo dõi và thao tác đúng theo các yêu cầu của hệ thống.

2.3.3 Mở rộng với UART

Ngoài ra, để tăng cường an ninh, hệ thống có thể được mở rộng với module UART để gửi thông báo khi phát hiện nhiều lần nhập sai mật khẩu. Nếu mật khẩu sai được nhập liên tục quá 3 lần, hệ thống sẽ kích hoạt cảnh báo và gửi thông báo đến thiết bị qua giao tiếp UART với module sim (nếu được mở rộng). Nội dung tin nhắn có thể bao

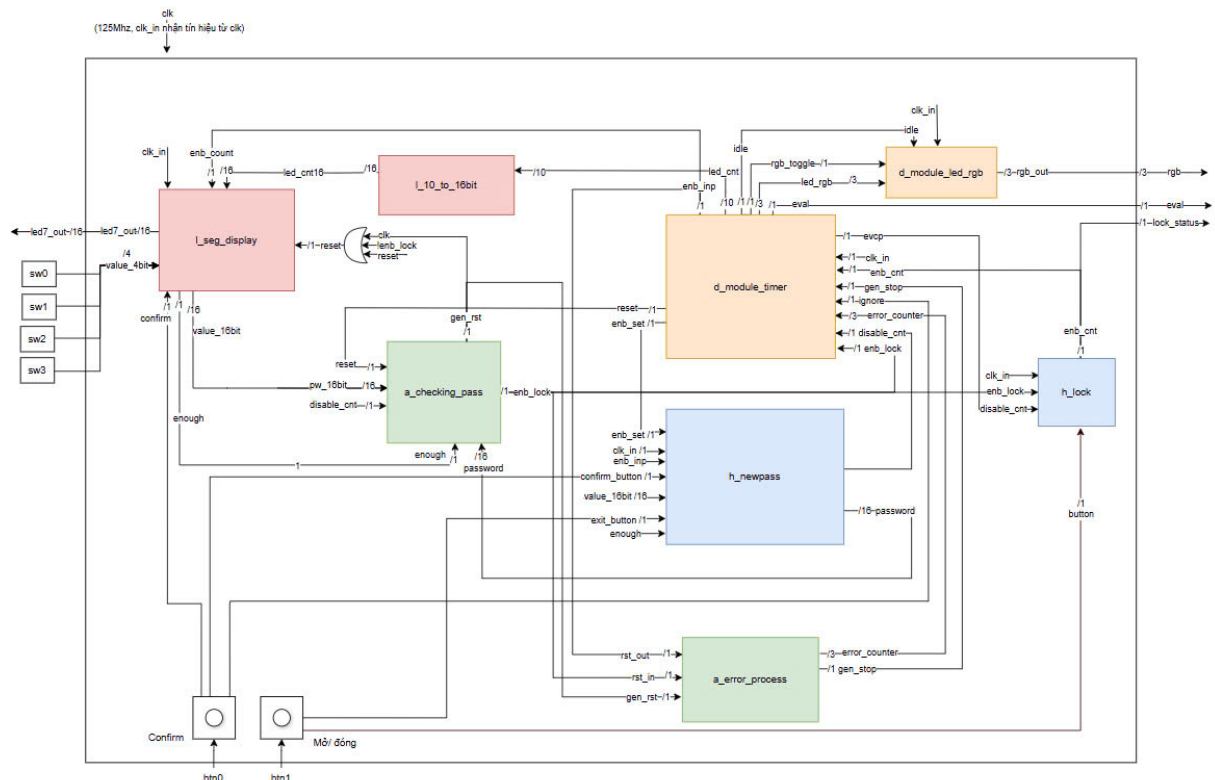


gồm thông tin thời gian và số lần nhập sai như: "Vào lúc 12:00:23 ngày 06/10/2024, có người đã nhập sai mật khẩu x lần" giúp chủ nhà chủ động hơn trong việc giám sát từ xa.

3 Thiết kế sản phẩm

3.1 Sơ đồ khối cơ bản

Dưới đây là sơ đồ khối cơ bản thể hiện mối quan hệ và kết nối giữa các module với nhau trong hệ thống, có thể thấy trong sơ đồ gồm 8 modules chính với các chức năng riêng biệt nhau để bảo đảm khóa hoạt động chính xác và hiệu quả.

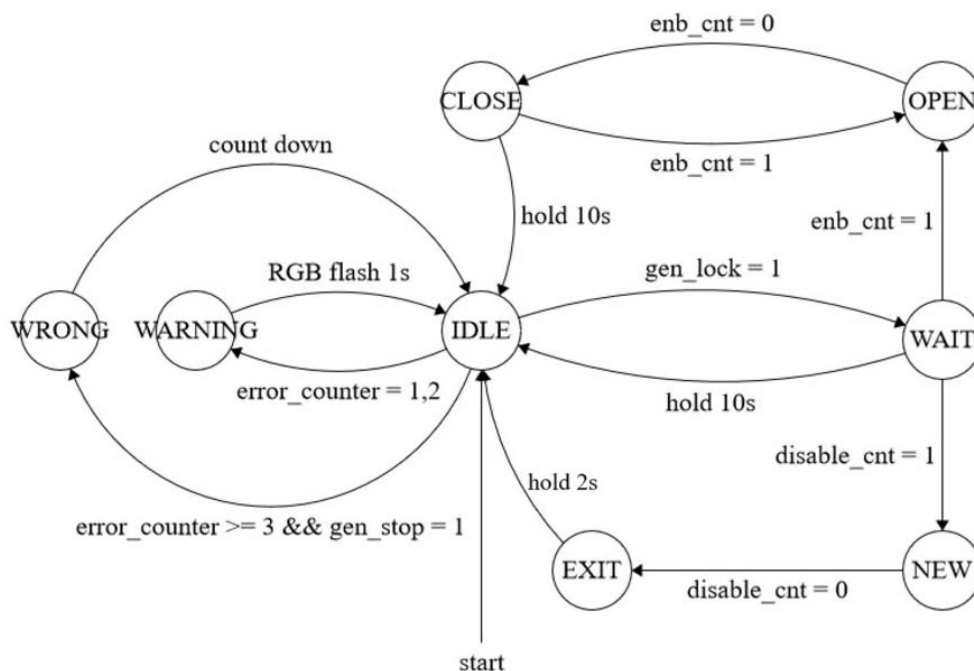


Hình 1: Sơ đồ khối cơ bản

Từ hình có thể thấy được cơ bản hệ thống có các đầu vào là tín hiệu 4 bit từ các switches, 2 nút nhấn, và tín hiệu clock 125Mhz, và các tín hiệu đầu ra là tín hiệu 16 bit để truyền vào các led 7 đoạn, tín hiệu 3 bit ra RGB, tín hiệu đơn thể hiện cửa đang đóng hay mở (`lock_status`) và tín hiệu đơn báo tình trạng cửa có mở quá 30s hay không (`eval`).

3.2 Máy trạng thái

Để hệ thống hoạt động hiệu quả, hệ thống cần có thiết kế máy trạng thái phù hợp và đầy đủ các trạng thái cần thiết. Hình dưới đây là thiết kế máy trạng thái của khóa gồm 8 trạng thái chính. Bao gồm IDLE (trạng thái nghỉ), WAIT (trạng thái nhập mật khẩu đúng chờ thao tác tiếp theo), OPEN (cửa đã mở), CLOSE (cửa đã đóng), NEW (vào trạng thái đặt mật khẩu mới), EXIT (thoát trạng thái đặt mật khẩu mới), WARNING (nhập mật khẩu 2 lần đầu tiên), WRONG (nhập mật khẩu sai từ 3 lần liên tục trở lên).



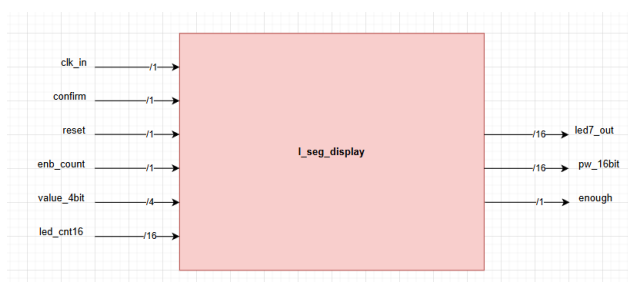
Hình 2: Máy trạng thái

- Bắt đầu ở trạng thái IDLE.
- Nếu nhận tín hiệu mật khẩu chính xác, khóa chuyển sang WAIT
- Tại WAIT, khóa sẵn sàng chuyển sang trạng thái OPEN để mở khóa hoặc NEW để đặt mật khẩu mới. Còn nếu không thực hiện gì trong 10s khóa sẽ chuyển lại sang trạng thái IDLE
- Tại NEW, sau khi đặt mật khẩu mới xong sẽ chuyển sang EXIT và quay lại IDLE
- Tại OPEN, có thể chuyển qua lại với CLOSE, nếu giữ trạng thái CLOSE, trạng thái đóng cửa, trong 10s thì sẽ quay lại IDLE

- Nếu nhập mật khẩu sai, ở lần thứ nhất và thứ hai chỉ chuyển sang WARNING và nháy led RGB trong 1s và quay lại IDLE
- Nếu nhập sai liên tục trên ba lần thì thực hiện đếm ngược, sau khi đếm xong mới quay lại trạng thái IDLE

3.3 Mô tả hoạt động các khối

3.3.1 Khối hiển thị



Hình 3: Sơ đồ khối module l_seg_display

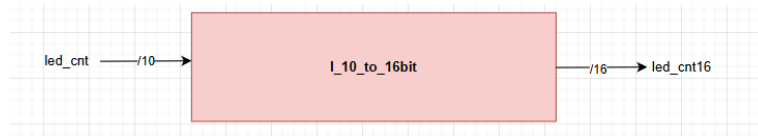
Input:

- clk_in: 125Mhz
- confirm: nhận cạnh xuống nút confirm lưu giá trị value_4bit vào 4 thanh ghi
- reset: nhận tín hiệu 1 tắt hết các led 7 đoạn đang hiển thị
- enb_count: nhận tín hiệu 1 hiển thị giá trị đếm ngược từ led_cnt16 và không nhận tín hiệu nhập từ các công tắc, nhận tín hiệu 0 cho phép đọc giá trị từ 4 công tắc và hiển thị lên led
- led_cnt16: giá trị đếm ngược thời gian
- value_4bit: giá trị nhập từ 4 Switch

Output:

- led7_out: hiển thị giá trị của 4 led 7 đoạn
- pw_16bit: giá trị mật khẩu khi nhấn đủ 4 lần confirm
- enough: khi nhập đủ 4 tín hiệu thì gửi tín hiệu 1 sang các module khác cùng với pw_16bit

3.3.2 Khối chuyển 10 bit sang 16 bit



Hình 4: Sơ đồ khối module l_10_to_16bit

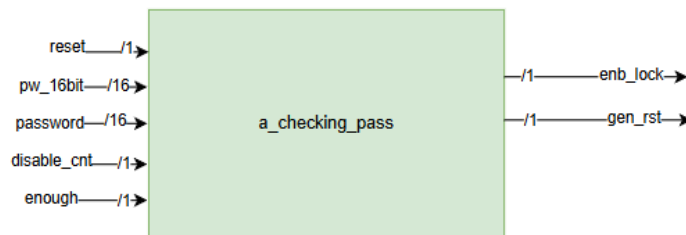
Input:

- led_cnt: giá trị đếm ngược thập phân 10 bit từ d_module_timer

Output:

- led_cnt16: giá trị 16 bit sau khi đã chuyển đổi để hiển thị trên led 7 đoạn

3.3.3 Khối kiểm tra mật khẩu



Hình 5: Sơ đồ khối module a_checking_pass

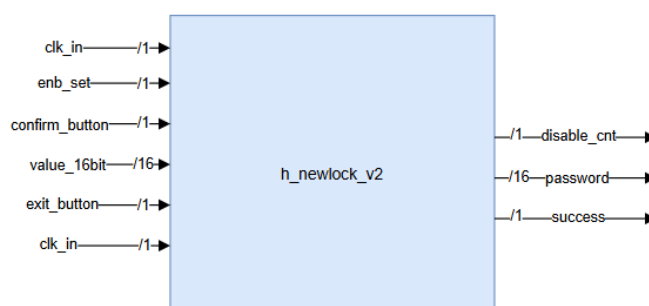
Input:

- reset: khi nhận tín hiệu cạnh xuống (negedge), tiến hành đưa toàn bộ tín hiệu enb_lock, enb_cmp và pw_16bit về mức 0.
- pw_16bit: nhận mật khẩu người dùng nhập vào
- password: nhận giá trị mật khẩu mặc định hoặc mật khẩu mới được cài đặt lại.
- disable_cnt: nhận tín hiệu 0 khi không đang ở trạng thái đặt mật khẩu mới, nhận tín hiệu 1 khi đang ở trạng thái đặt mật khẩu mới
- enough: nhận tín hiệu của pw_16bit khi enough là 1

Output:

- enb_lock: gửi tín hiệu 1 khi mật khẩu đúng và 0 khi mật khẩu sai
- gen_rst: tạo cạnh lên (posedge) khi đã nhận đủ 4 ký tự mật khẩu từ người dùng, để reset các module khác.

3.3.4 Khối đặt lại mật khẩu



Hình 6: Sơ đồ khối module h_newlock_v2

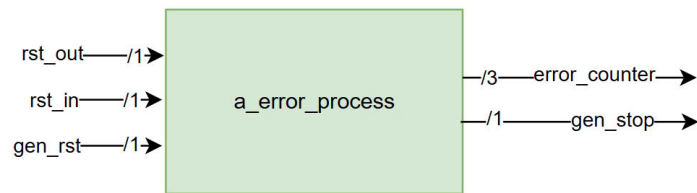
Input:

- clk_in: 125Mhz
- enb_set: khi nhận tín hiệu này là 1 thì bộ đặt lại mật khẩu này mới sẵn sàng hoạt động
- confirm_button: nút nhấn để vào chế độ lưu mật khẩu và dịch bit
- value_16bit: thanh ghi 16bit chứa giá trị mật khẩu mới
- exit_button: nút nhấn để thoát khỏi chế độ đặt lại mật khẩu
- clk_in: nhận tần số 125MHz

Output:

- disable_cnt: tín hiệu cho biết đang ở chế độ đặt lại mật khẩu
- password: thanh ghi lưu mật khẩu được sử dụng để kiểm tra với mật khẩu người dùng nhập, mặc định là 0000
- success: gửi tín hiệu 1 khi đặt mật khẩu mới thành công

3.3.5 Khối sai mật khẩu



Hình 7: Sơ đồ khối module a_error_processor

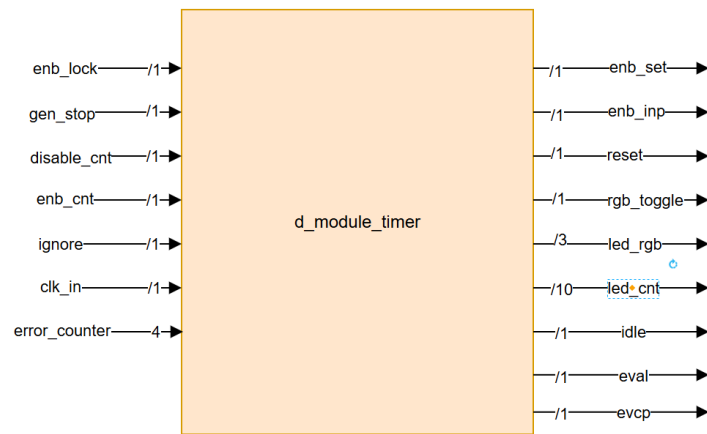
Input:

- rst_out: khi nhận tín hiệu cạnh lên (posedge) đưa tín hiệu gen_stop về 0
- rst_in: khi nhận tín hiệu cạnh lên (mở khóa thành công) thì reset tín hiệu đếm được của error_counter
- gen_rst: khi nhận đủ từ 3 tín hiệu từ gen_rst thì gen_stop có mức tín hiệu là 1

Output:

- error_counter: tạo tín hiệu đếm số lần nhập sai của khóa
- gen_stop: tạo tín hiệu 1 khi đếm đủ 3 lần sai trở đi. Tạo tín hiệu 0 khi nhận tín hiệu rst_in

3.3.6 Khối trạng thái và thời gian



Hình 8: Sơ đồ khối module d_module_timer

Input:

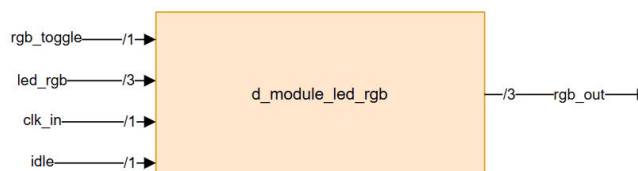
- enb_lock: nhận tín hiệu mật khẩu đúng
- gen_stop: nhận tín hiệu mật khẩu quá 3 lần trở lên
- disable_cnt: nhận tín hiệu đang ở trạng thái đặt lại mật khẩu
- enb_cnt: nhận tín hiệu biết trạng thái đang mở, đóng của khóa
- ignore: nhận tín hiệu tắt thông báo khi mở cửa quá 30s
- clk_in: nhận tần số 1Hz để đếm ngược
- error_counter: nhận tín hiệu đếm số lần sai của khóa

Output:

- enb_set: gửi tín hiệu cho phép đặt lại mật khẩu
- enb_inp: gửi tín hiệu ngừng nhập và hiển thị đếm ngược
- reset: tạo tín hiệu reset các module khác
- rgb_toggle: gửi tín hiệu giữ hay nháy đèn led RGB

- led_rgb: gửi tín hiệu sáng màu nào cho led RGB
- led_cnt: giá trị đếm cho các bộ đếm, tối đa đếm tới 1024s (15p)
- state: tín hiệu 3 bit cho biết trạng thái hiện tại của khóa
- idle: tín hiệu 1 khi chuyển về trạng thái IDLE trong máy trạng thái
- eval: tín hiệu 1 khi mở cửa quá 30s
- evcp: tín hiệu 1 khi vào trạng thái đặt mật khẩu mới

3.3.7 Khối LED RGB



Hình 9: Sơ đồ khối module d_module_led_rgb

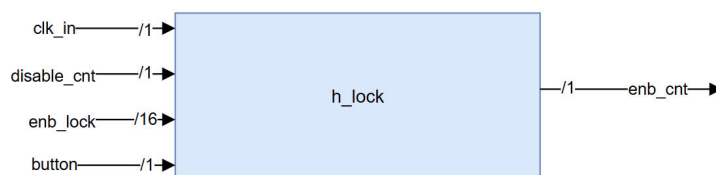
Input:

- rgb_toggle: nhận tín hiệu giữ hay nháy
- led_rgb: nhận tín hiệu màu nào sẽ sáng
- clk_in: nhận tần số 1Hz để nháy (nếu có)
- idle: là tín hiệu báo khi reset trạng thái mới

Output:

- rgb_out: gửi tín hiệu đèn ra led RGB

3.3.8 Khối đóng mở cửa



Hình 10: Sơ đồ khối module h_un_lock

Input:

- clk_in: nhận tần số 125MHz
- disable_cnt: tín hiệu cho biết đang ở chế độ đặt mật khẩu, khi tín hiệu bằng 1 không cho phép mở cửa
- enb_lock: tín hiệu cho phép mở cửa, khi tín hiệu là 1 cho phép đóng mở cửa
- button: nút nhấn đóng mở cửa

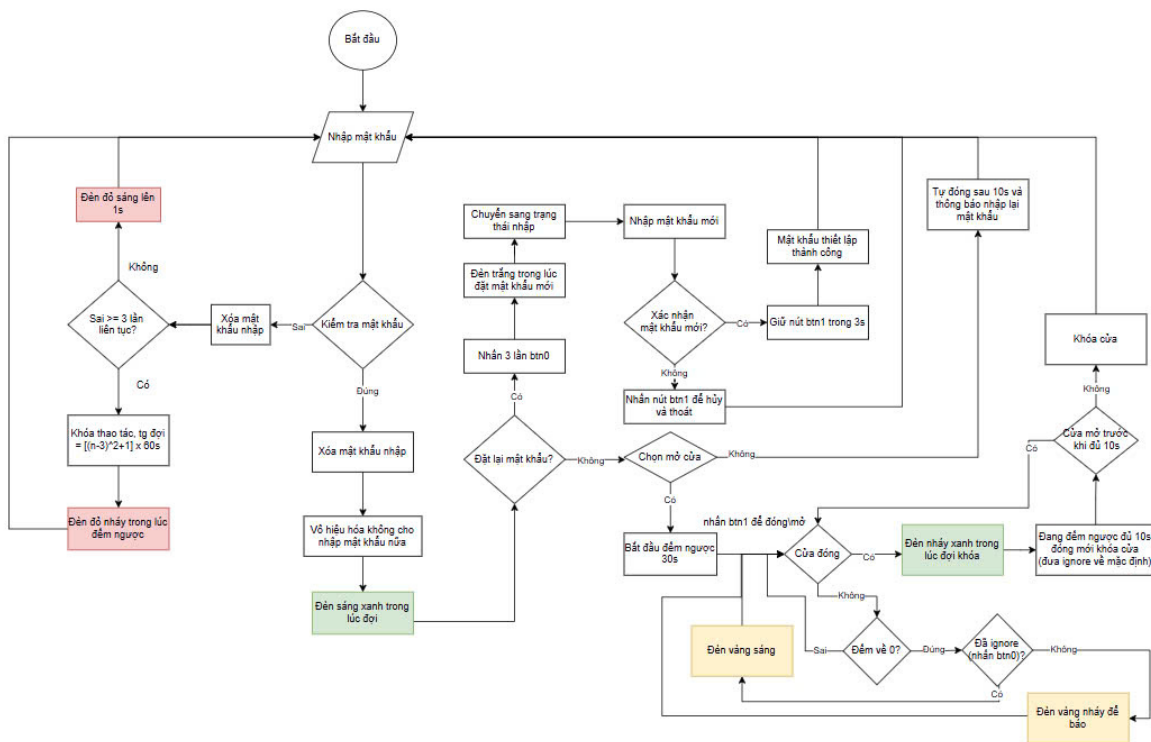
Output:

- enb_cnt: tín hiệu đóng mở cửa

4 Hiện thực

4.1 Flowchart

Để khóa hoạt động một các logic và hiệu quả, cần phải thiết kế hệ thống làm sao cho đúng theo flowchart đã được đề ra, từ đó tạo sự đồng nhất và hoạt động hiệu quả cho hệ thống. Dưới đây là thiết kế flowchart cho hệ thống khóa điện tử:

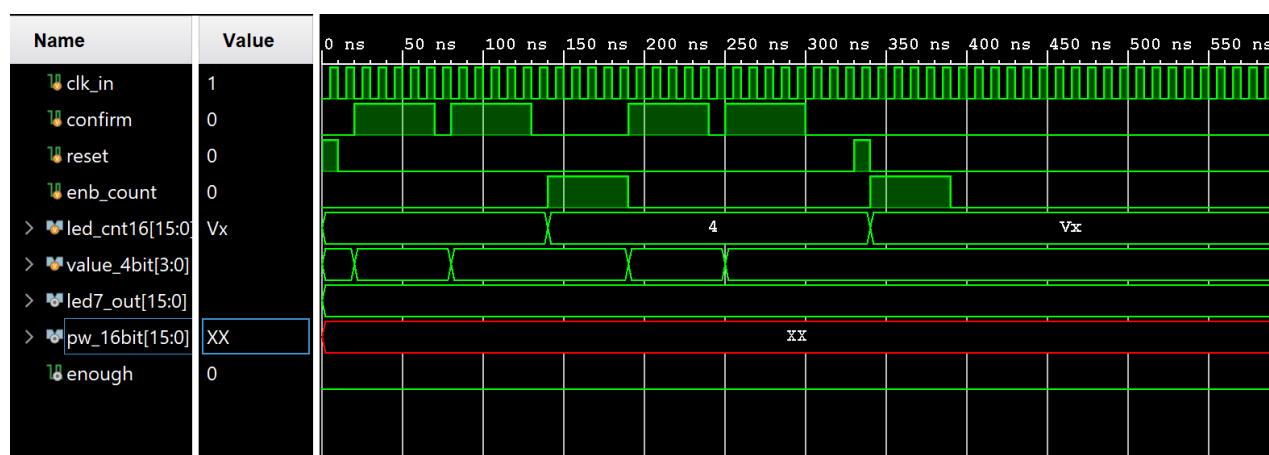


Hình 11: Flowchart của hệ thống

4.2 Mô phỏng trên Vivado

4.2.1 Khởi hiển thị

Module có nhiệm vụ hiển thị dữ liệu trên bộ LED 7 đoạn và xử lý các tín hiệu đầu vào. Nếu nhận đủ dữ liệu, nó sẽ cập nhật giá trị pw_16bit và kích hoạt tín hiệu enough là một để các module khác tiến hành nhận giá trị. Nhận tín hiệu reset sẽ xóa hết giá trị đã nhập và đưa enough về 0. Khi nhận tín hiệu enb_count, thay vì hiển thị giá trị đã nhập thì sẽ hiển thị giá trị đếm nhận từ tín hiệu led_cnt16. Các giá trị hiển thị trên led 7 đoạn sẽ được hiển thị khi thông qua tín hiệu đầu ra là led7_out.



Hình 12: Testbench khởi hiển thị

4.2.2 Khởi chuyển 10 bit sang 16 bit

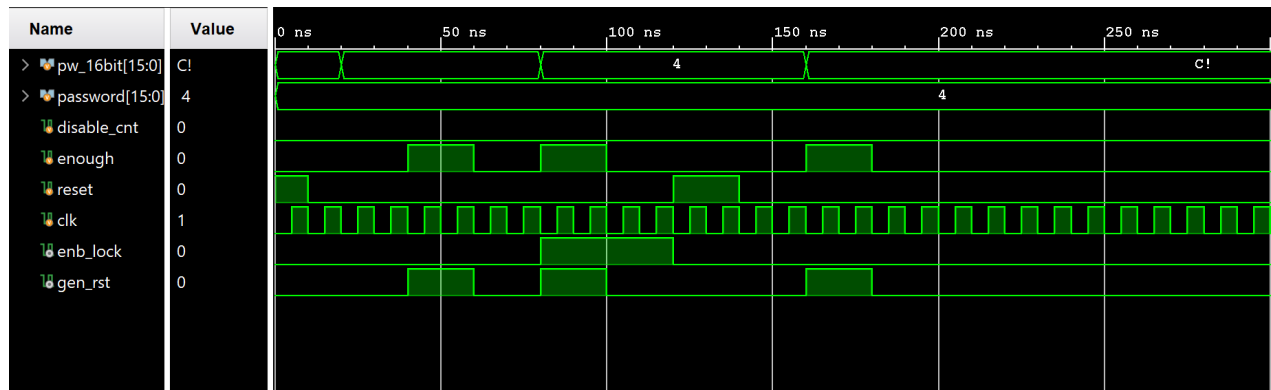
Khối này sẽ nhận giá trị đếm ngược thập phân 10 bit từ d_module_timer và chuyển đổi sang giá trị 16 bit để hiển thị lên led 7 đoạn



Hình 13: Testbench khởi chuyển 10 bit sang 16 bit

4.2.3 Khởi kiểm tra mật khẩu

Khởi này sẽ kiểm tra mật khẩu nhập vào pw_16bit với mật khẩu đúng password. Khi tín hiệu đủ dữ liệu enough được kích hoạt và các điều kiện khác thỏa mãn, module so sánh mật khẩu nhập với mật khẩu đúng. Nếu trùng khớp, tín hiệu kích hoạt khóa enb_lock được bật nếu không, tín hiệu tạo lại quá trình kiểm tra gen_rst sẽ được kích hoạt.



Hình 14: Testbench khởi kiểm tra mật khẩu

4.2.4 Khởi đặt lại mật khẩu

Khi nhấn button confirm 3 lần sẽ vào mode đặt lại mật khẩu, disable_cnt sẽ tích cực mức cao. Khi có tín hiệu tích cực mức cao enough, báo hiệu rằng đã nhập xong mật khẩu và đợi lưu. Nhấn giữ nút exit 3s để lưu mật khẩu mới.

Khi nhấn button confirm 3 lần sẽ vào mode đặt lại mật khẩu, disable_cnt sẽ tích cực mức cao. Có thể thoát chế độ đặt mật khẩu bằng cách nhấn nhả nút exit, disable_cnt sẽ về tích cực mức thấp.



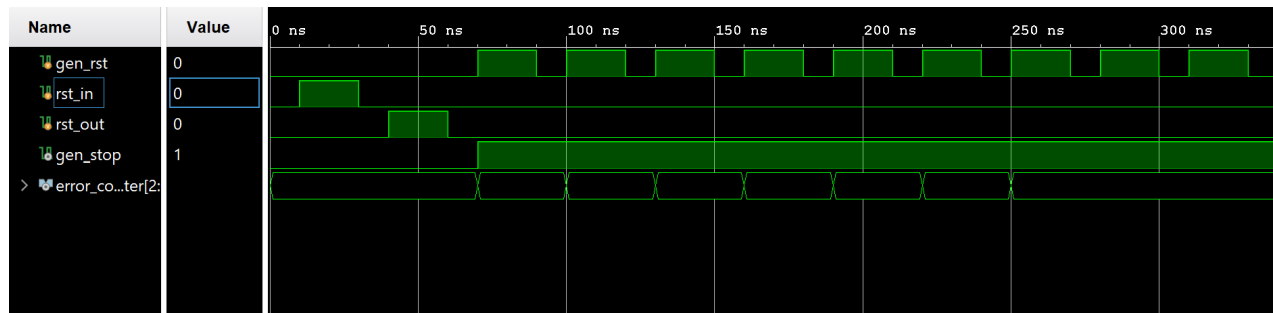
Hình 15: Testbench khối newlock 1



Hình 16: Testbench khối newlock 2

4.2.5 Khởi sai mật khẩu

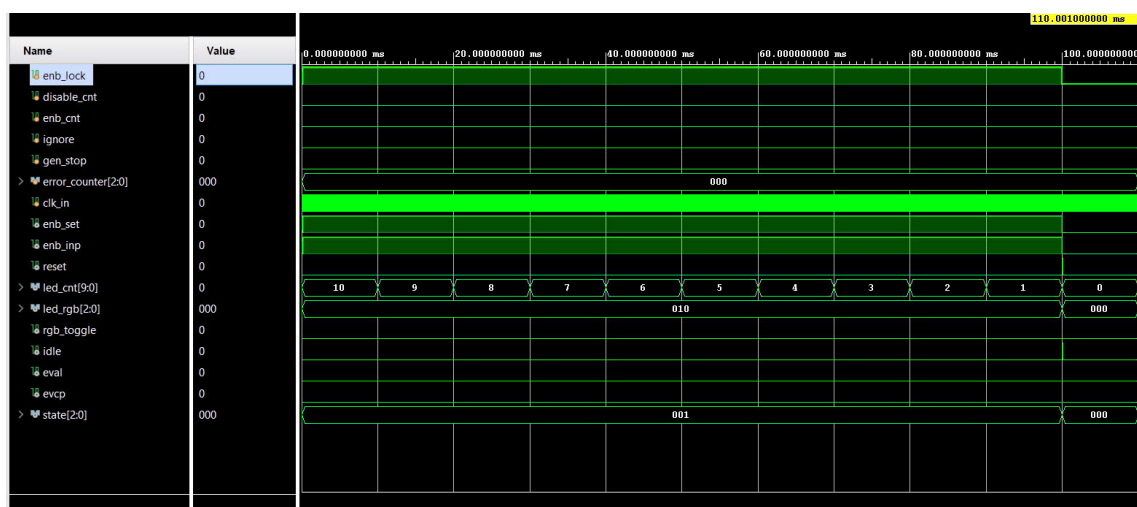
Module đếm số lần nhập sai mật khẩu thông qua tín hiệu `gen_rst` thể hiện đã nhập sai thông qua tín hiệu `gen_stop`. Khi nhận được tín hiệu `rst_in` là 1 thì tiến hành làm mới bộ đếm về 0. Nhận tín hiệu `rst_out` là 1 tiến hành làm mới tín hiệu `gen_stop` về 0.



Hình 17: Testbench khởi sai mật khẩu

4.2.6 Khởi trạng thái và thời gian

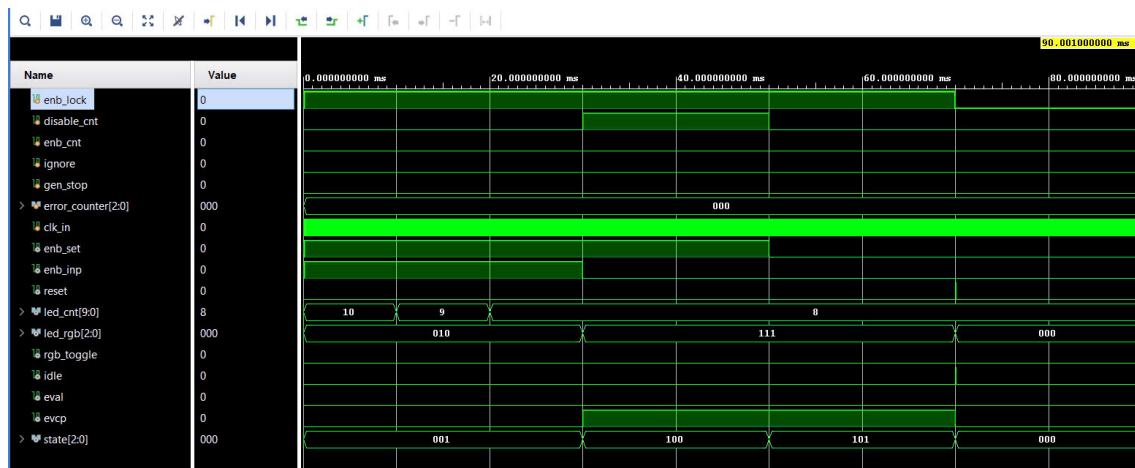
Thời gian mô phỏng đã được scale, tức 10ms trong mô phỏng tương ứng 1s thực tế. Khối này sẽ nhận tín hiệu từ các khối khác để chuyển các trạng thái tương ứng. Dưới đây là trạng thái WAIT (001) khi nhận tín hiệu đúng mật khẩu, nếu không thực hiện thao tác nào thì sẽ chuyển về trạng thái IDLE (000). Trong lúc đếm đèn RGB sẽ sáng xanh và không nháy.



Hình 18: Testbench khởi trạng thái và thời gian

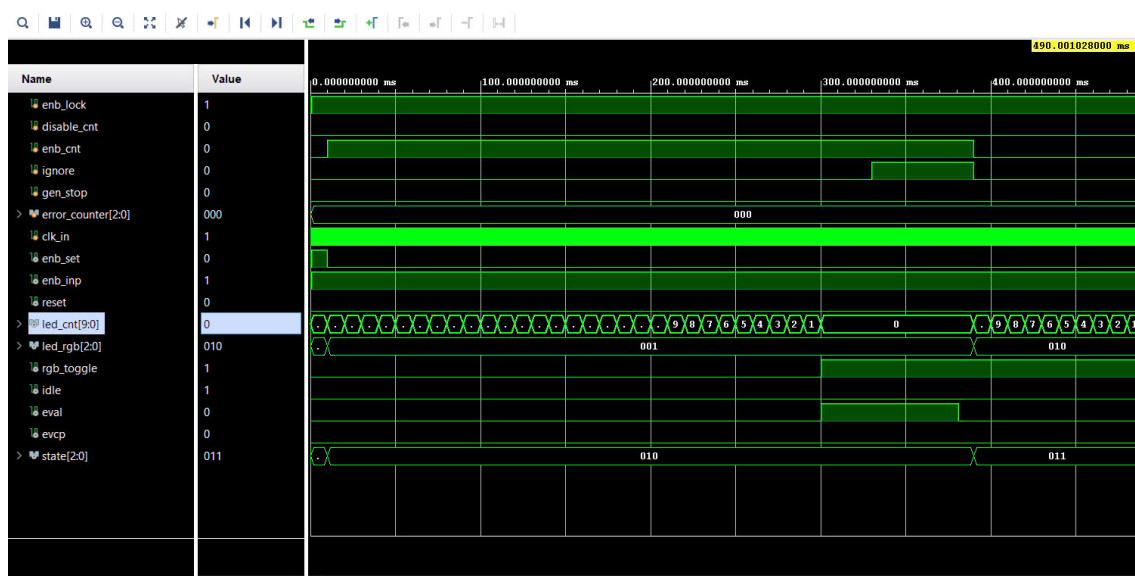
Tiếp theo, sau khi nhập đúng, lần này ta tiến hành đặt mật khẩu mới, khi đó trạng

thái chuyển sang NEW (100), lúc này đèn RGB sẽ chuyển sang màu trắng và không nháy, sau khi người dùng thiết lập xong sẽ chuyển sang trạng thái EXIT (101) trong 2s sau đó quay lại trạng thái IDLE (000).



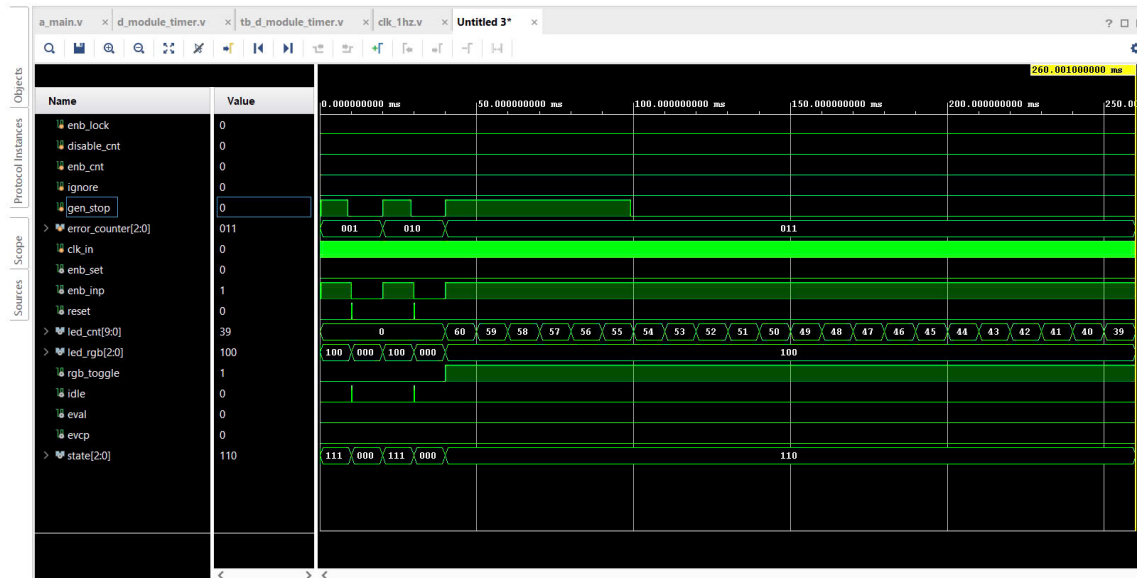
Hình 19: Testbench khởi trạng thái và thời gian

Tiếp theo, ta sẽ thử mở cửa khi nhập mật khẩu đúng qua tín hiệu enb_set là 1, khi đó cửa sẽ mở và trạng thái là OPEN (010) và bắt đầu đếm ngược từ 30s về 0s. Nếu đếm về 0 sẽ cho tín hiệu eval lên 1, báo rằng đã quá 30s mà cửa chưa được khóa, lúc này có thể cho tín hiệu ignore lên 1 để ngưng tín hiệu này hoặc đóng cửa. Khi đóng cửa sẽ chuyển sang trạng thái CLOSE (011), lúc này bắt đầu đếm ngược từ 10s về 0 để khóa cửa.



Hình 20: Testbench khởi trạng thái và thời gian

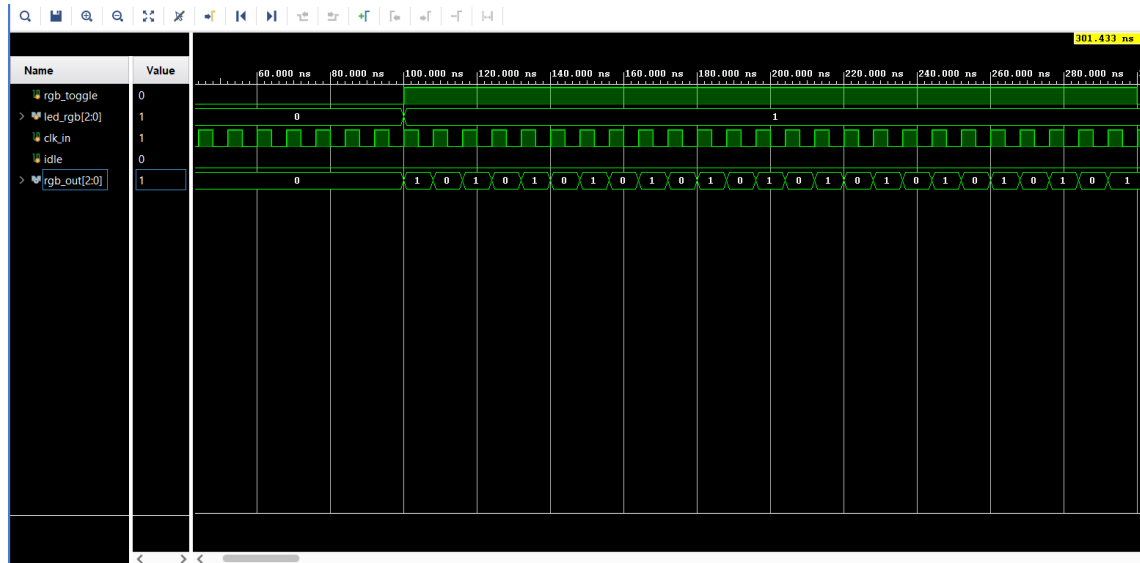
Cuối cùng, ta thử trạng thái nhập sai mật khẩu, lúc mà bộ đếm đang là 1 và 2, khi có tín hiệu `gen_stop` là 1 thì chỉ cấm nhập trong 1s và trạng thái khi đó là WARNING (111). Khi bộ đếm từ 3 trở lên mà nhận tín hiệu `gen_stop` là 1, khi đó chuyển trạng thái sang là WRONG (110) và tiến hành khóa nhập theo công thức bắt đầu 60s, 120s,...



Hình 21: Testbench khối trạng thái và thời gian

4.2.7 Khối LED RGB

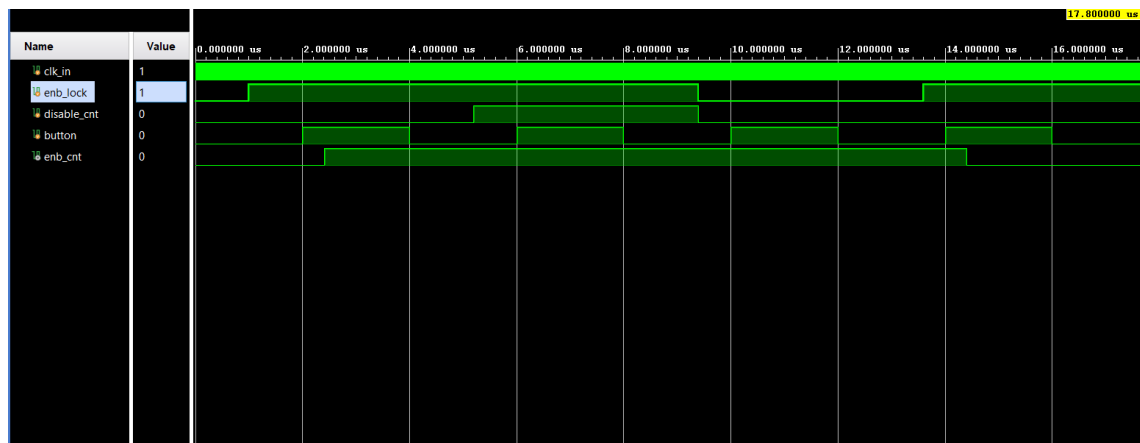
Ta tiến hành mô phỏng khối này bằng cách cấp tín hiệu `rgb` tương ứng và tín hiệu `rgb_toggle` để cho biết đèn có cần phải nhấp hay không, nhận tín hiệu 1 sẽ nhấp, ngược lại là 0. Ngoài ra nhận thêm tín hiệu `idle` như một tín hiệu để đồng bộ thay đổi màu đèn RGB tương ứng với trạng thái để tránh bị trễ quá nhiều. Khi đó thu được tín hiệu `rgb_out`.



Hình 22: Mô phỏng khối LED RGB

4.2.8 Khởi đóng mở cửa

Khi có tín hiệu `enb_lock` có nghĩa mật khẩu đã được nhập đúng và tín hiệu `disable_cnt` ở mức thấp có nghĩa không trong chế độ đặt lại mật khẩu, nhấn nút `exit` để mở/đóng cửa.

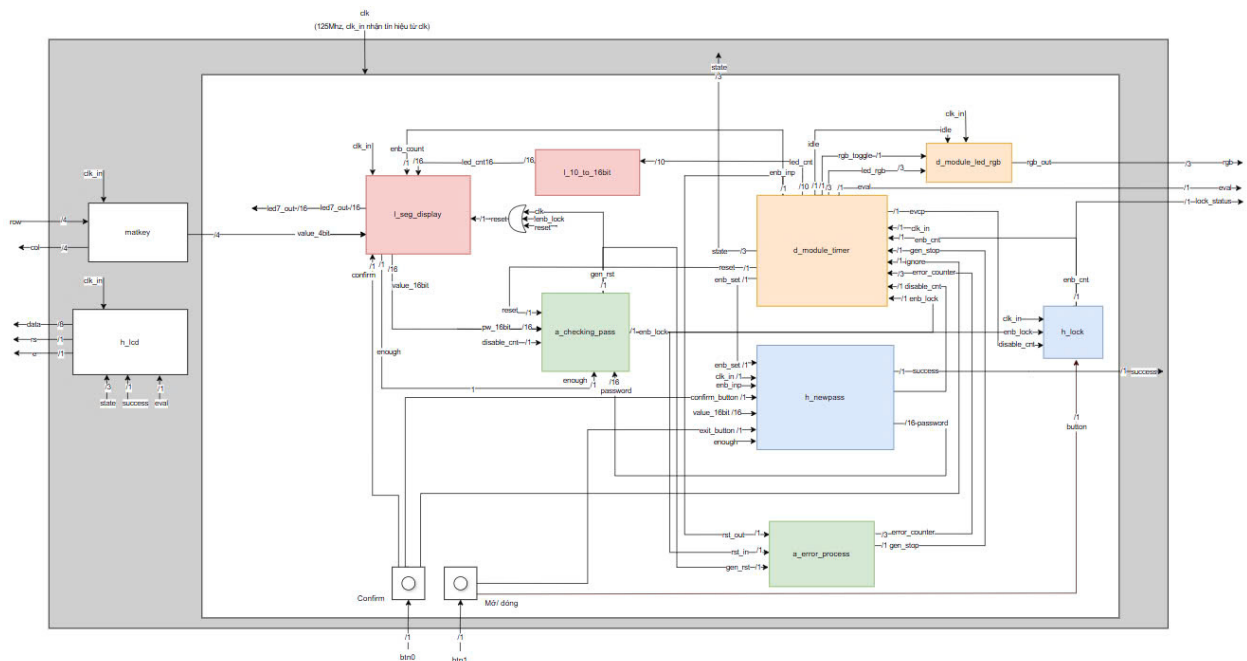


Hình 23: Testbench khối đóng mở cửa

5 Phương hướng cải tiến

5.1 Sơ đồ khối mở rộng

Mở rộng từ sơ đồ khối cơ bản, ở sơ đồ khối mở rộng này, nhóm thực hiện thêm các cải tiến gồm thêm màn hình LCD và thêm bàn phím ma trận vào hệ thống. Theo đó, sơ khối cũng cần được mở rộng và bổ sung một số các tín hiệu để hệ thống hoạt động hiệu quả, các giao tiếp giữa các module và các module mở rộng được đồng bộ và chính xác.



Hình 24: Sơ đồ khối mở rộng

5.2 Liquid-crystal display LCD HD44780U 16x02

5.2.1 Mô tả

Màn hình text LCD1602 sử dụng driver HD44780, có khả năng hiển thị 2 dòng với mỗi dòng 16 ký tự, màn hình có độ bền cao, rất phổ biến và dễ sử dụng.

Thông số kỹ thuật:

- Điện áp hoạt động là 5 V.
- Kích thước: 80 x 36 x 12.5 mm.

- Chữ đen, nền xanh dương.
- Khoảng cách giữa hai chân kết nối là 0.1 inch tiện dụng khi kết nối với Breadboard.
- Tên các chân được ghi ở mặt sau của màn hình LCD hỗ trợ việc kết nối, đi dây điện.
- Có đèn led nền, có thể dùng biến trở hoặc PWM điều chỉnh độ sáng để sử dụng ít điện năng hơn.



Hình 25: LCD 16x02

5.2.2 Bảng các chân kết nối với LCD 16x02

Chân	Kí hiệu	Mô tả	Giá trị
1	VSS	GND	0V
2	VDD	VCC	5V
3	V0	Độ tương phản	
4	RS	Lựa chọn thanh ghi	RS = 0, lựa chọn thanh ghi lệnh. RS = 1 lựa chọn thanh ghi dữ liệu
5	R/W	Chọn thanh ghi đọc/ghi	R/W = 0, thanh ghi viết. R/W = 1, thanh ghi đọc
6	E	Enable	
7	DB0		Data 0
8	DB1		Data 1
9	DB2		Data 2
10	DB3		Data 3
11	DB4		Data 4
12	DB5		Data 5
13	DB6		Data 6
14	DB7		Data 7
15	A	Cực dương led nền	0V -> 5V
16	K	Cực âm led nền	Data

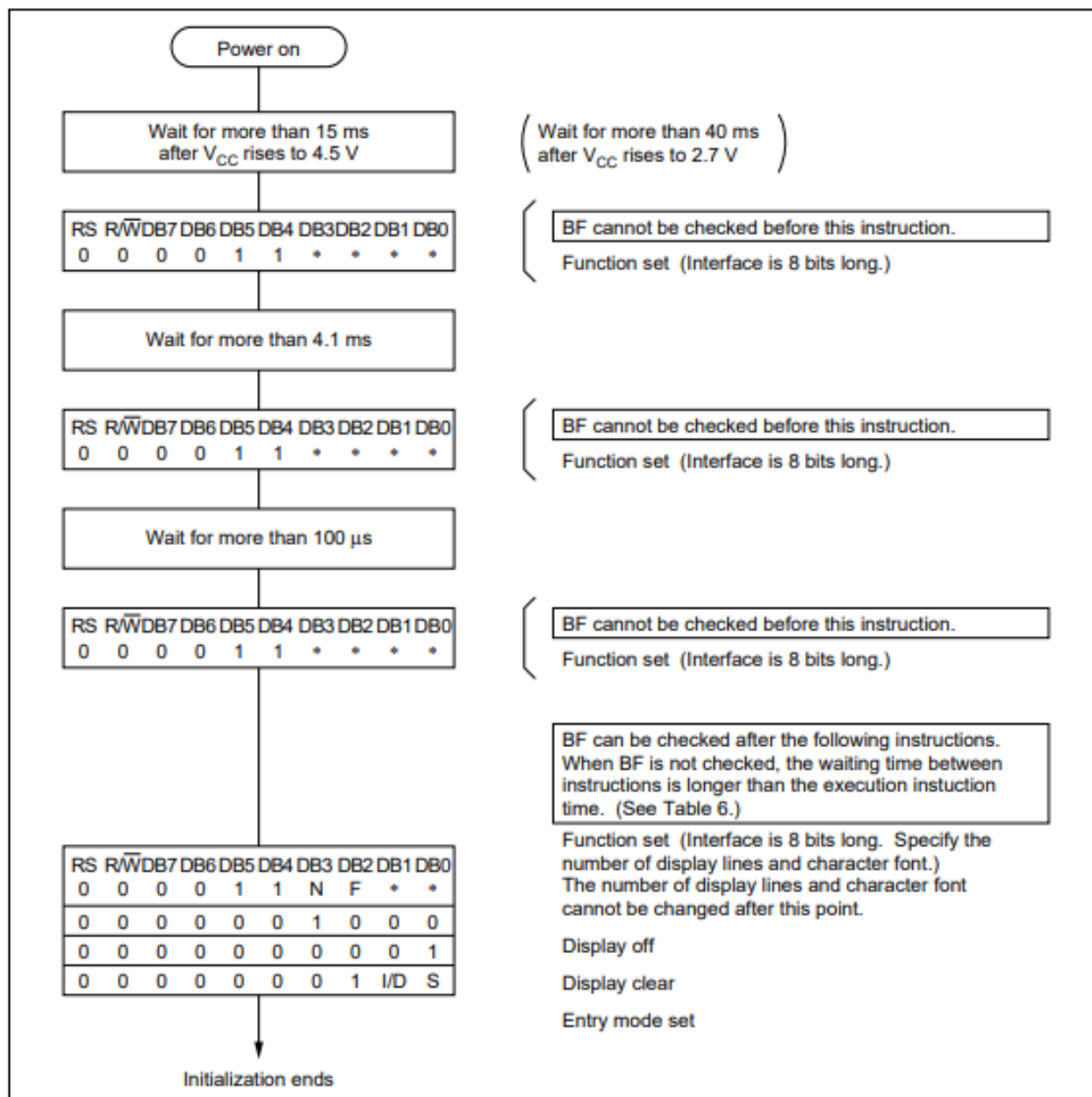
Bảng 1: Các chân của LCD 16x02

5.2.3 Bảng lệnh

Instruction	Code										Description	Execution Time (max) (when f_{cp} or f_{osc} is 270 kHz)
	RS	R/W	DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0		
Clear display	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Clears entire display and sets DDRAM address 0 in address counter.	
Return home	0	0	0	0	0	0	0	0	1	—	Sets DDRAM address 0 in address counter. Also returns display from being shifted to original position. DDRAM contents remain unchanged.	1.52 ms
Entry mode set	0	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S	Sets cursor move direction and specifies display shift. These operations are performed during data write and read.	37 μ s
Display on/off control	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Sets entire display (D) on/off, cursor on/off (C), and blinking of cursor position character (B).	37 μ s
Cursor or display shift	0	0	0	0	0	1	S/C	R/L	—	—	Moves cursor and shifts display without changing DDRAM contents.	37 μ s
Function set	0	0	0	0	1	DL	N	F	—	—	Sets interface data length (DL), number of display lines (N), and character font (F).	37 μ s
Set CGRAM address	0	0	0	1	ACG	ACG	ACG	ACG	ACG	ACG	Sets CGRAM address. CGRAM data is sent and received after this setting.	37 μ s
Set DDRAM address	0	0	1	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	ADD	Sets DDRAM address. DDRAM data is sent and received after this setting.	37 μ s
Read busy flag & address	0	1	BF	AC	AC	AC	AC	AC	AC	AC	Reads busy flag (BF) indicating internal operation is being performed and reads address counter contents.	0 μ s

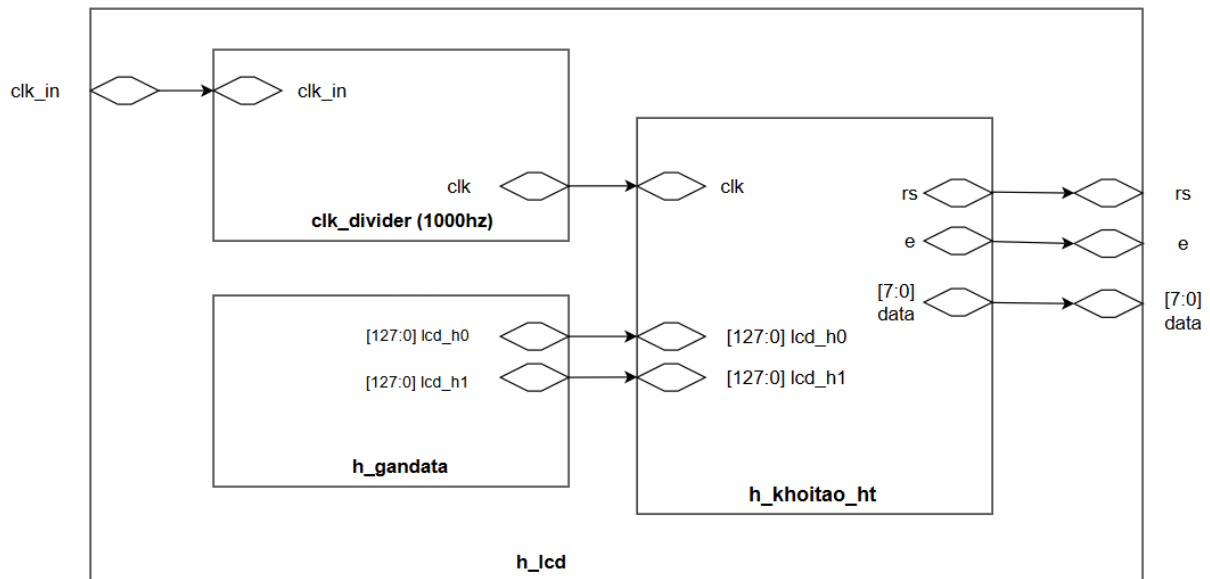
Hình 26: Bảng các lệnh của LCD 16x02

5.2.4 Hoạt động



Hình 27: Khởi tạo cho LCD 16x02

5.2.5 Sơ đồ khối



Hình 28: Sơ đồ khối

Khối clk_divider: Chia tần số của clk hệ thống 125MHz thành 1000Hz.

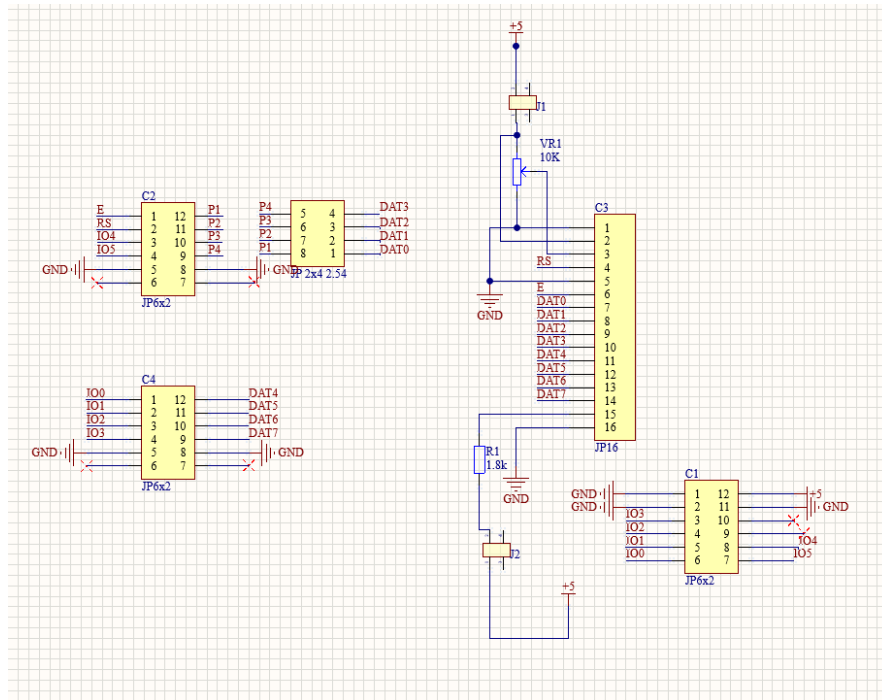
Khối h_gandata: Lưu trữ dữ liệu để xuất ra lcd, kiểu string gồm 128 bit tương ứng với 16 cột, mỗi cột 8 bit.

Khối h_khoitao_ht: Khởi tạo LCD, ghi địa chỉ vị trí DDRAM, xuất dữ liệu ra LCD.

5.2.6 Thiết kế mạch LCD 16x02 giao tiếp Pmod bằng Altium

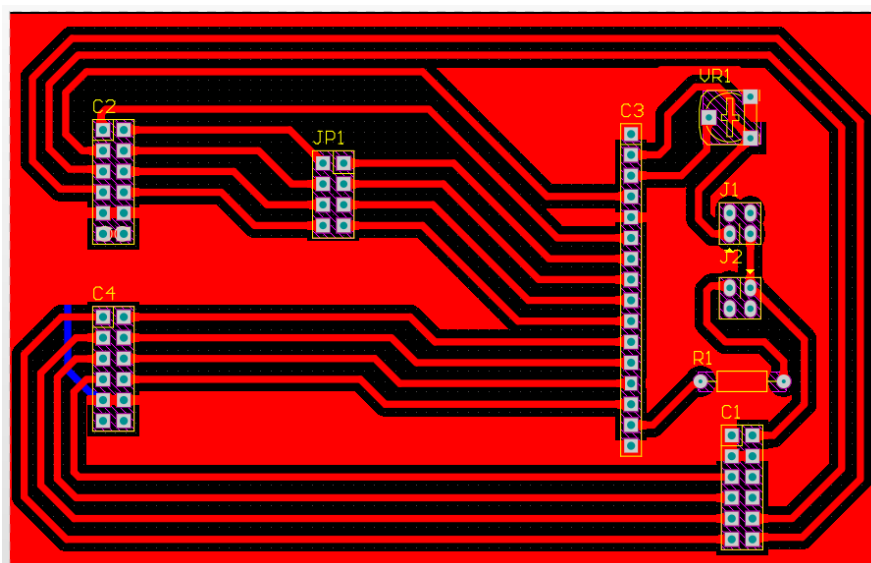
5.2.6.1 Schematic & PCB

SCHEMATIC:



Hình 29: Schematic

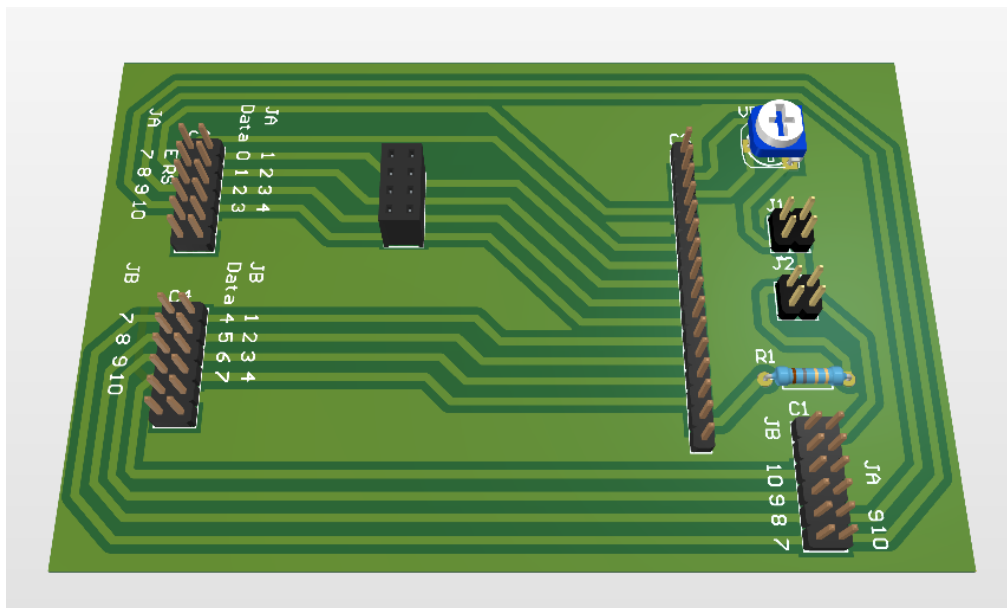
PCB:



Hình 30: PCB

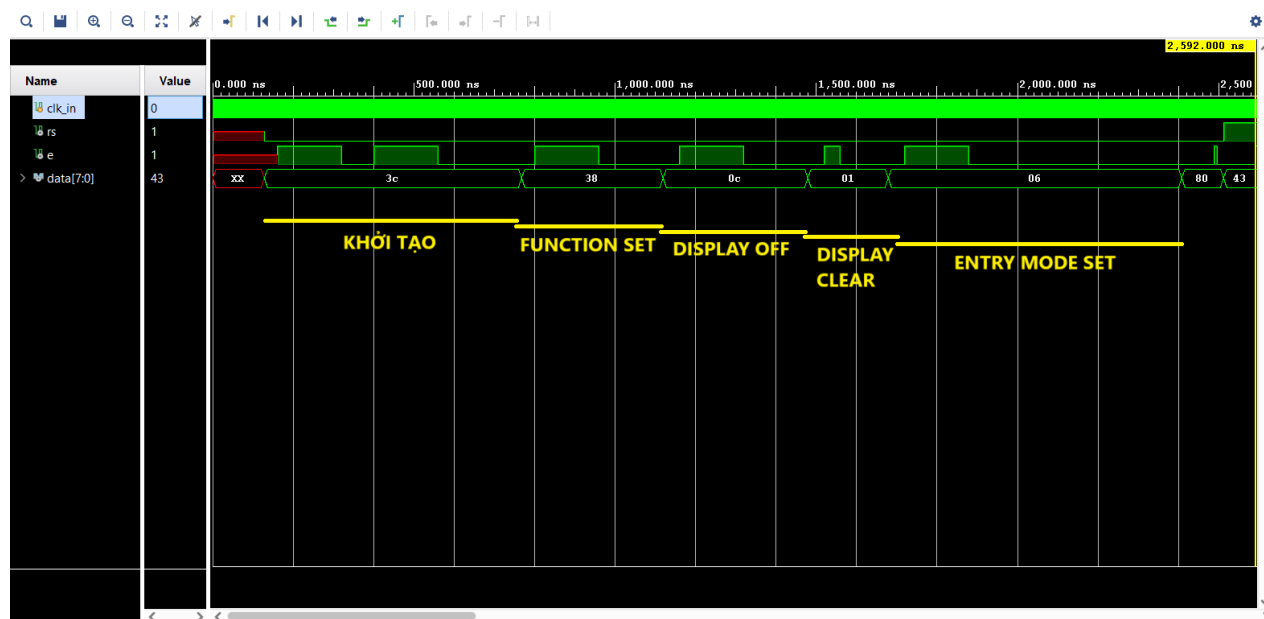
5.2.6.2 3D và mạch thật

Hình ảnh 3D: Mạch thật:

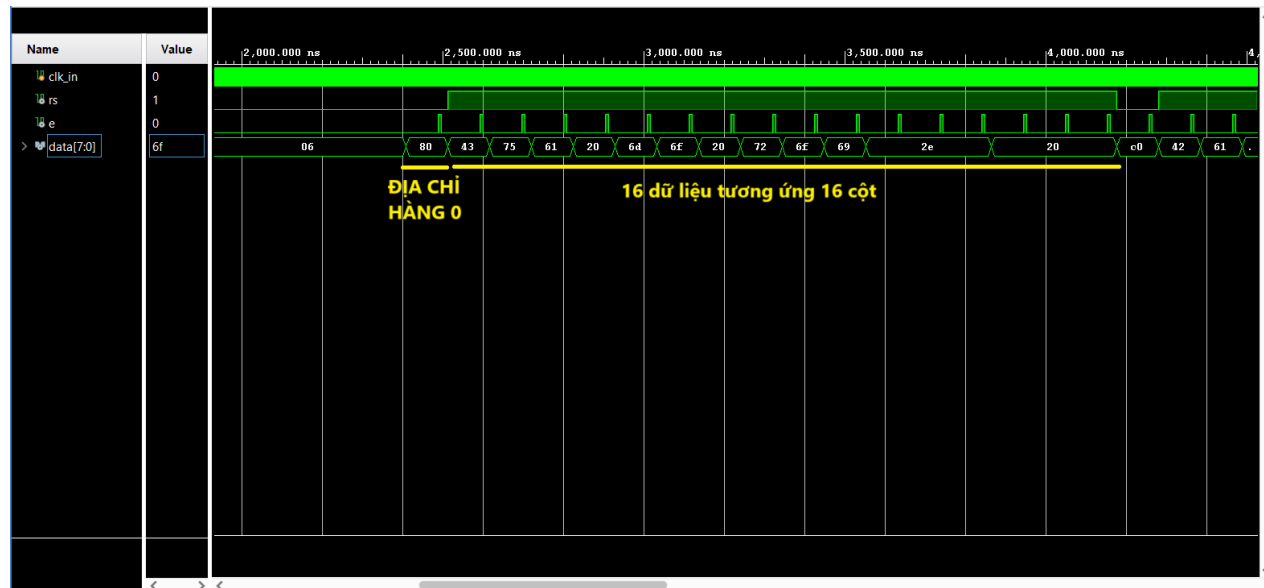


Hình 31: Hình 3d

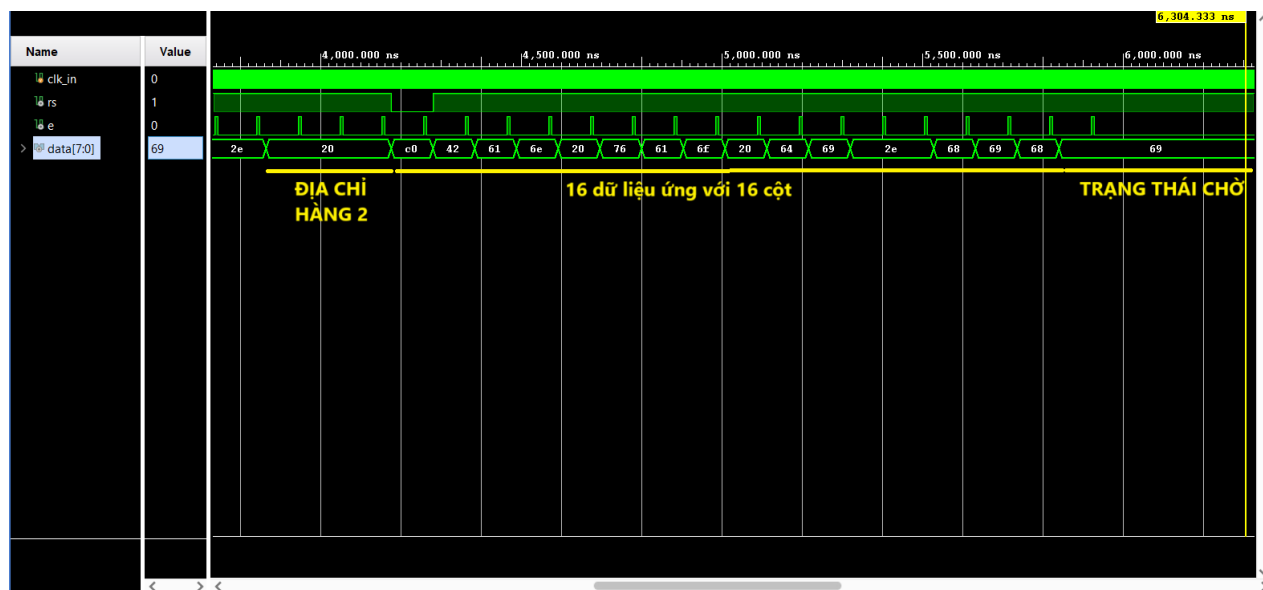
5.2.7 Mô phỏng trên Vivado



Hình 32: Testbench LCD 1



Hình 33: Testbench LCD 2



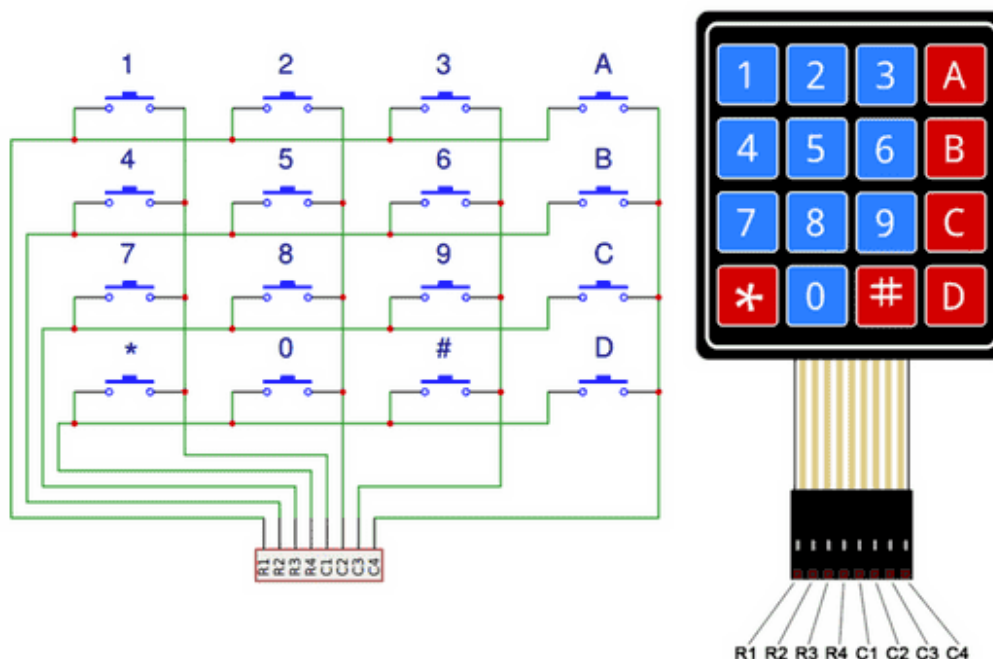
Hình 34: Testbench LCD 3

*Testbench được mô phỏng với clk là 125MHz (khác với mạch thực tế)

5.3 Bàn phím ma trận mềm 4x4

5.3.1 Giới thiệu

Keypad có sự kết hợp của các tiếp điểm nút bấm và các dây dẫn của các hàng và cột. Bàn phím 4×4 có tổng cộng 8 chân, bao gồm 4 chân cho các cột và 4 chân cho các hàng. Khi một nút bấm được nhấn, một hàng và một cột được kết nối với nhau, tạo ra đường dẫn dòng điện qua chúng. Ví dụ: khi nút '4' được nhấn, cột 1 và hàng 2 sẽ được kết nối với nhau.



Hình 35: Bàn phím ma trận mềm 4x4

Bằng cách xác định cột và hàng tương ứng được kết nối, chúng ta có thể xác định nút bấm nào đã được nhấn.

5.3.2 Nguyên lý hoạt động

Bàn phím ma trận 4x4 bao gồm 16 nút bấm được kết nối theo dạng ma trận với 4 hàng (rows) và 4 cột (columns). Mỗi nút bấm đại diện cho một tổ hợp hàng và cột cụ thể hoạt động theo nguyên lý quét bàn phím. Để xác định phím nào được nhấn ta sử dụng phương pháp quét theo hàng hoặc quét theo cột.

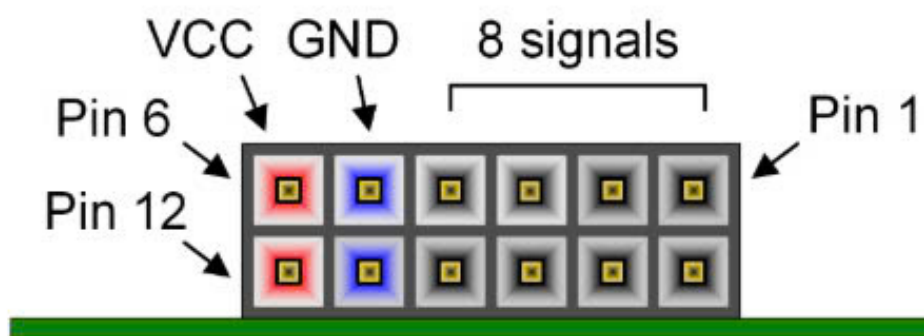
- Quét theo hàng : các chân I/O nối với các cột là input, các chân I/O nối với các hàng là output sẽ thực hiện việc quét phím.
- Quét theo cột : ngược lại

Trong đồ án này, chúng em sử dụng cách quét theo cột. Trong đó, Các cột (col) được cấu hình để nhận tín hiệu mức cao, lần lượt được kích hoạt để quét. Các hàng (row) được cấu hình để xuất tín hiệu, dùng để đọc tín hiệu trạng thái từ bàn phím. Mỗi chu kỳ quét, chỉ một cột đang được quét trong ma trận được kích hoạt ở mức thấp (LOW), trong khi các cột khác ở mức cao (HIGH). Sau khi một cột được kích hoạt, trạng thái của các hàng (row) được đọc. Nếu một hàng có giá trị 1 (mức cao), điều

này cho thấy nút bấm ở giao điểm giữa hàng đó và cột đang được kích hoạt đã được nhấn. Dựa vào cột đang quét và hàng phát hiện tín hiệu, tọa độ của nút bấm được xác định.

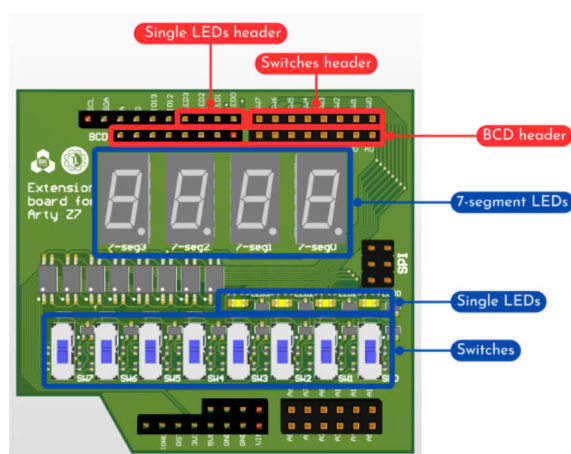
5.3.3 Kết nối các chân với board Arty-Z7

4 chân cột của bàn phím là: C1, C2, C3 và C4 sẽ được kết nối với Pmod JB của board Arty-Z7: Pin 7, Pin 8, Pin 9 và Pin 10 tương ứng để nhận tín hiệu mức cao xuất ra từ board.

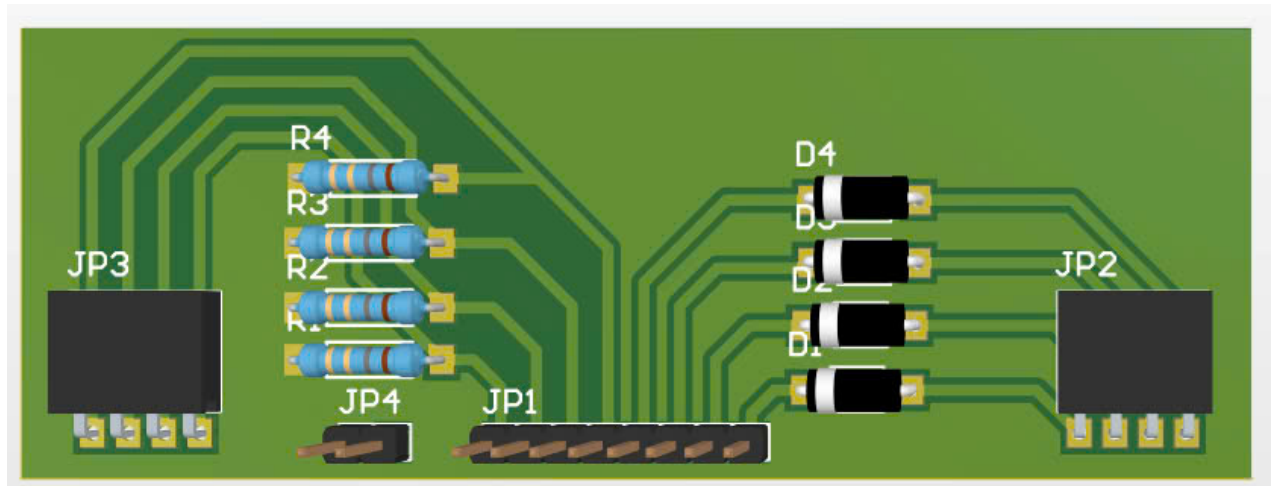


Hình 36: Cổng Pmod JB

Còn 4 chân hàng của bàn phím là: R1, R2, R3 và R4 sẽ được kết nối với Single LEDs trên Extension board là: LED0, LED1, LED2 và LED3 để xuất tín hiệu hiển thị trên led đồng thời hiển thị sang module hiển thị lên led 7 đoạn.

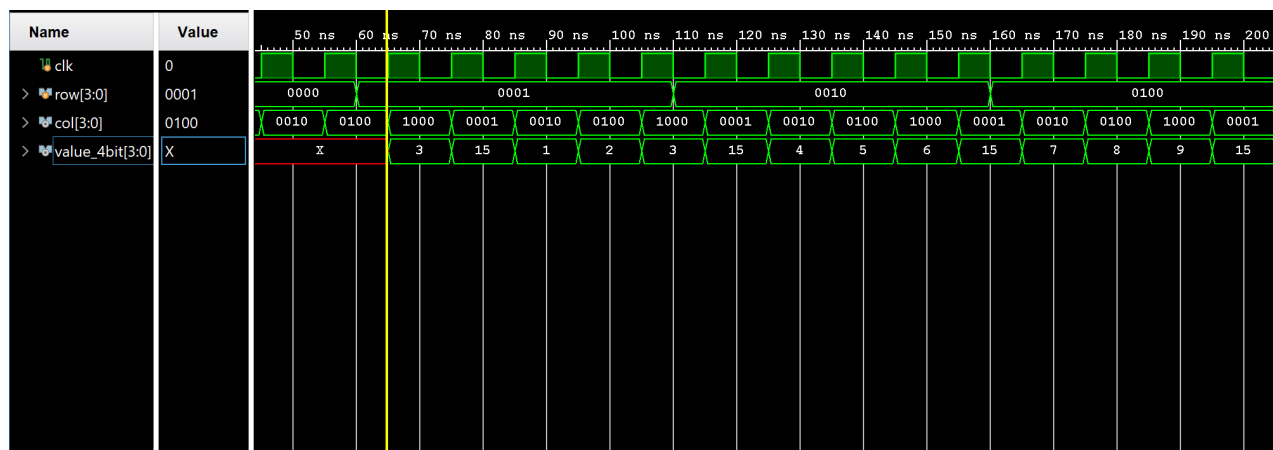


Hình 37: Extension board's layout



Hình 38: Hình 3D mạch kết nối bàn phím ma trận với board Arty-Z7

5.3.4 Mô phỏng trên Vivado



Hình 39: Testbench module matkey

6 Kết luận

Trong đề tài đồ án Thiết kế luận lý này, nhóm chúng em đã tìm hiểu, nghiên cứu và nâng cao khả năng sử dụng ngôn ngữ đặc tả phần cứng Verilog HDL cùng các môn học liên quan để thiết kế mô phỏng ổ khóa điện tử đơn giản trên kit phát triển FPGA Arty-Z7. Qua đồ án này, chúng em đã rèn luyện được kỹ năng phân tích, thiết kế mạch số theo hướng tiếp cận mô hình phân cấp: phân chia chức năng, module, . . . Nâng cao tính sáng tạo trong thiết kế các sản phẩm ứng dụng hệ thống số. Đồng thời rèn luyện kỹ năng nghiên cứu, tự học, có thêm hiểu biết về các lĩnh vực liên quan: các kỹ thuật trong các mạch điện tử số thông dụng, các lĩnh vực ứng dụng hệ thống số, . . .

Bên cạnh các chức năng cơ bản như nhập và so sánh mật khẩu, đóng mở cửa, hệ thống được mở rộng với các tính năng hiện đại nhằm nâng cao tính tiện dụng và hiệu quả. Điển hình là việc tích hợp màn hình LCD để hiển thị thông tin và hướng dẫn người dùng, cũng như sử dụng ma trận bàn phím mềm giúp cải thiện trải nghiệm nhập liệu. Việc tích hợp màn hình LCD giúp cung cấp giao diện hiển thị trực quan, hỗ trợ người dùng trong việc theo dõi các trạng thái của hệ thống, như xác nhận nhập mật khẩu thành công, cảnh báo sai mật khẩu, và các thông báo quan trọng khác. Điều này không chỉ giúp tăng cường hiệu quả sử dụng mà còn nâng cao tính thẩm mỹ của sản phẩm. Trong khi đó, việc sử dụng ma trận bàn phím mềm không chỉ tối ưu hóa thời gian mà còn cải thiện tính linh hoạt so với việc sử dụng 4 switch.

Các kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống hoạt động ổn định, chính xác, đáp ứng yêu cầu bảo mật và tính linh hoạt cao. Những cải tiến này không chỉ làm tăng tính thẩm mỹ và chuyên nghiệp của hệ thống mà còn mở ra tiềm năng phát triển thêm các chức năng thông minh khác như kết nối IoT, điều khiển từ xa qua thiết bị di động, hoặc tích hợp sinh trắc học.

Nhìn chung, đề tài ổ khóa điện tử sử dụng ARTYZ7 là một giải pháp tiềm năng, đáp ứng các tiêu chí về tính năng, hiệu suất và tính ứng dụng thực tế trong đời sống hiện đại. Trong tương lai, việc tối ưu hóa và mở rộng thêm các chức năng khác sẽ giúp hệ thống hoàn thiện hơn và trở thành một sản phẩm hữu ích, có giá trị cao trên thị trường.

7 Tài liệu tham khảo

[1] <https://www.chipverify.com/tutorials/verilog>