

# Ελεγκτής φαναριών

1<sup>st</sup> Θεόδωρος Τσιφτελίδης

Μηχανικών πληροφορικής και ηλεκτρονικών συστημάτων

Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

Σίνδος, Θεσσαλονίκη

theotsif@protonmail.com

**Abstract**—Στο παρόν έγγραφο παρουσιάζεται η σχεδίαση και υλοποίηση ενός συστήματος ελέγχου φωτεινών σηματοδοτών σε VHDL. Το σύστημα υποστηρίζει κανονική λειτουργία, αιτήματα πεζών, κατάσταση έκτακτης ανάγκης και λειτουργία προτεραιότητας. Περιλαμβάνει χρονικά συγχρονισμένη FSM, δυναμική ηχητική ειδοποίηση μέσω buzzer, καθώς και ένδειξη αντίστροφης μέτρησης με 7-segment displays. Η υλοποίηση επιδιώκει λειτουργική πληρότητα, επεκτασιμότητα και προσεγγίζει ρεαλιστικά σενάρια σηματοδότησης.

**Index Terms**—φωτεινοί σηματοδότες, λειτουργία έκτακτης ανάγκης, αλληλεπίδραση πεζών

## I. Εισαγωγή

### A. Φωτεινοί Σηματοδότες

Οι φωτεινοί σηματοδότες, γνωστοί ευρέως ως «φανάρια», είναι απαραίτητα στοιχεία για τη ρύθμιση της κυκλοφορίας οχημάτων και πεζών σε αστικές περιοχές. Ο βασικός τους ρόλος είναι η ενίσχυση της οδικής ασφάλειας και η βελτίωση της κυκλοφοριακής ροής, μειώνοντας έτσι τα ατυχήματα και τις καθυστερήσεις. Ένας τυπικός σηματοδότης αποτελείται από τρία χρώματα:

- Κόκκινο : υποχρεωτική στάση.
- Πορτοκαλί: προειδοποιεί για επικείμενη αλλαγή.
- Πράσινο : επιτρέπει τη διέλευση.

Παρότι υπάρχει γενική τυποποίηση, η διάταξη και η σειρά των χρωμάτων μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τους τοπικούς κανονισμούς. Η Σύμβαση της Βιέννης του 1968, η οποία καθορίζει τα διεθνή πρότυπα για τη λειτουργία των φωτεινών σηματοδοτών, ορίζει ότι οι σηματοδότες πρέπει να διαθέτουν είτε τρία φώτα (κόκκινο, κίτρινο, πράσινο) είτε δύο (κόκκινο, πράσινο), χωρίς αποκλίσεις από αυτή τη δομή.

Οι πρώτοι φωτεινοί σηματοδότες εμφανίστηκαν το 1868 στο Λονδίνο, αρχικά για να μειώσουν την ανάγκη παρουσίας αστυνομικών στη ρύθμιση της κυκλοφορίας. Από τότε, με την εισαγωγή του ηλεκτρισμού και την εξέλιξη της τεχνολογίας, οι σηματοδότες έγιναν πιο αξιόπιστοι και αποδοτικοί.

### B. Ελεγκτές Φωτεινών Σηματοδοτών

Για να λειτουργούν σωστά οι σηματοδότες, χρησιμοποιούνται ειδικά συστήματα ελέγχου, που μπορεί να είναι είτε απλά συστήματα σταθερού χρόνου είτε πιο εξελιγμένα, που προσαρμόζονται ανάλογα με την κυκλοφοριακή κατάσταση.

Τα συστήματα σταθερού χρόνου βασίζονται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Είναι εύκολα στην εγκατάσταση και συντήρηση, αλλά δεν ανταποκρίνονται σε αλλαγές της κυκλοφορίας.

Τα ενεργοποιούμενα συστήματα χρησιμοποιούν αισθητήρες για να προσαρμόζονται δυναμικά στις συνθήκες κυκλοφορίας, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και επιτρέπουν αποτελεσματικότερη διαχείριση της κυκλοφορίας.

### C. Περιγραφή του Ειδικού Ελεγκτή

Ο ελεγκτής που αναλύεται σε αυτή την εργασία προορίζεται ειδικά για τη διαχείριση της κυκλοφορίας σε διασταυρώσεις με σταθερή και προβλέψιμη ροή οχημάτων και πεζών. Πρόκειται για σύστημα σταθερού χρονισμού, το οποίο χαρακτηρίζεται από απλή και εύκολα προβλέψιμη λειτουργία, προσφέροντας πλεονεκτήματα στην εγκατάσταση και τη συντήρησή του. Όσον αφορά τους σηματοδότες των οχημάτων, κωδικοποιούνται με τρία φώτα (κόκκινο, κίτρινο, πράσινο) και των πεζών με δύο (κόκκινο, πράσινο) τηρώντας την σύμβαση της Βιέννης. Η ακολουθία φάσεων του σηματοδότη για τα οχήματα είναι η εξής:

- Πράσινο: 11 δευτερόλεπτο
- Κίτρινο: 7 δευτερόλεπτα
- Κόκκινο: 6 δευτερόλεπτα

ατά τη διάρκεια που οι σηματοδότες των οχημάτων είναι πράσινοι ή κίτρινοι, ο σηματοδότης των πεζών παραμένει κόκκινος. Το πράσινο φως για τους πεζούς ενεργοποιείται μόνο όταν οι σηματοδότες των οχημάτων γίνονται κόκκινοι.

Για την ευκολία όλων, κάθε φανάρι συνοδεύεται από ψηφιακή οθόνη που προβάλλει τον υπολειπόμενο χρόνο κάθε χρώματος. Στο τέλος του κόκκινου για τα οχήματα—δηλαδή στα τελευταία 3 δευτερόλεπτα—ή αλλιώς στο τέλος του πράσινου για τους πεζούς, ενεργοποιείται ένας βομβητής (buzzer) μεταβαλλόμενης συχνότητας (από αργή σε γρήγορη), προειδοποιώντας ακουστικά τους πεζούς για την επικείμενη αλλαγή του σηματοδότη σε κόκκινο.

Επιπλέον, το σύστημα ενσωματώνει λειτουργία έκτακτης ανάγκης, κατά την οποία όλοι οι σηματοδότες—οχημάτων και πεζών—αναβοσβήνουν ταυτόχρονα, παρέχοντας σαφή οπτική ένδειξη για επικίνδυνες ή ασυνήθιστες καταστάσεις. Τέλος, περιλαμβάνεται και λειτουργία “σειρήνας”, όπου τα φανάρια λειτουργούν σε παλμική εναλλαγή με τρόπο που

υποδηλώνει την ανάγκη άμεσης εκκένωσης της διασταύρωσης, όπως σε περιπτώσεις διέλευσης οχημάτων έκτακτης ανάγκης (π.χ. αστυνομία).

## II. Clock Divider

### A. Γενική περιγραφή οντότητας

Η πρώτη και βασικότερη οντότητα που αναλύεται λειτουργεί με δύο βασικές εισόδους: το σήμα ρολογιού (clock\_in) και το σήμα επαναφοράς (reset). Επιπλέον, διαθέτει μία έξοδο (clock\_out), η οποία αντιπροσωπεύει το παραγόμενο ή τροποποιημένο σήμα ρολογιού. Σκοπός της οντότητας είναι να υλοποιήσει τη λειτουργία ενός διαχωριστή ρολογιού (clock divider), ο οποίος μετατρέπει ένα υψηλής συχνότητας ρολόι εισόδου των 50 MHz σε ένα χαμηλότερης συχνότητας ρολόι εξόδου του 1 Hz. Η επιλογή της συχνότητας εισόδου των 50 MHz είναι αποτέλεσμα της συχνότητας που συναντάται διαθέσιμη στην αναπτυξιακή πλακέτα.

### B. Αρχιτεκτονική οντότητας

Η μετατροπή της συχνότητας πραγματοποιείται μέσω ενός εσωτερικού μετρητή παλμών, ο οποίος καταγράφει τον αριθμό των κύκλων του ρολογιού εισόδου μέχρι να αλλάξει κατάσταση το σήμα εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζονται:

- Ένας ακέραιος μετρητής (counter), ο οποίος καταμετρά τους κύκλους του εισερχόμενου σήματος ρολογιού.
- Ένα ενδιάμεσο λογικό σήμα (clk\_sig), το οποίο χρησιμοποιείται για να παρακολουθεί την αλλαγή της κατάστασης του ρολογιού εξόδου.

Η λειτουργία της μετατροπής περιγράφεται μέσω ενός process, ευαίσθητου στις μεταβολές των σημάτων clock\_in και reset: **Αν το reset είναι 0:**

- Ο μετρητής counter μηδενίζεται.
- Το σήμα clk\_sig τίθεται σε λογική τιμή 0.

**Αν το reset είναι 1:**

- Για κάθε ανοδικό παλμό του ρολογιού εισόδου ελέγχεται αν ο μετρητής έχει φτάσει την τιμή 25.000.000.
- Όταν φτάσει την τιμή αυτή, το σήμα clk\_sig αντιστρέφει την κατάστασή του (toggle από 0 σε 1 ή αντίστροφα).
- Ο μετρητής counter επανέρχεται στην τιμή 0.
- Αν ο μετρητής δεν έχει φτάσει την τιμή 25.000.000, τότε αυξάνεται κατά 1.

Η έξοδος clock\_out λαμβάνει την τιμή του σήματος clk\_sig.  
**Ανάλυση Χρονισμού:** Το εισερχόμενο σήμα ρολογιού των 50 MHz συνεπάγεται ότι πραγματοποιούνται 50 εκατομμύρια κύκλοι ανά δευτερόλεπτο. Για την επίτευξη μιας συχνότητας εξόδου 1 Hz, απαιτείται περίοδος ενός δευτερολέπτου (δηλαδή αλλαγή κατάστασης κάθε 0,5 δευτερόλεπτα). Με δεδομένο ότι το σήμα clk\_sig αλλάζει κατάσταση κάθε 25 εκατομμύρια κύκλους (25.000.000 κύκλοι ÷ 50.000.000 κύκλοι ανά δευτερόλεπτο = 0,5 δευτερόλεπτα), απαιτούνται συνολικά  $2 \times 25.000.000 =$

50.000.000 κύκλοι για την ολοκλήρωση μιας πλήρους περιόδου του σήματος εξόδου, επιτυγχάνοντας έτσι τη συχνότητα των 1 Hz.

## III. Debouncer

Ο αποκαταστατής διακοπών (debouncer) χρησιμοποιείται για τον «καθαρισμό» του σήματος που παράγεται από έναν μηχανικό διακόπτη, όπως ένας διακόπτης. Λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων του διακόπτη, κάθε φορά που σηκώνεται ή κατεβαίνει, οι επαφές ενδέχεται να δημιουργούν στιγμιαίες ανεπιθύμητες μεταβολές στο σήμα, φαινόμενο γνωστό ως «αναπήδηση» (bouncing). Ο debouncer εξασφαλίζει ένα σταθερό και αξιόπιστο ψηφιακό σήμα, αποτρέποντας αυτές τις ανεπιθύμητες μεταβάσεις.

### A. Γενική περιγραφή οντότητας

Πρόκειται για ένα απλό σύστημα - οντότητα που αποτελείται από τρεις εισόδους και μία έξοδο:

- clk: Είσοδος ρολογιού που συγχρονίζει τη λειτουργία του κυκλώματος.
- rst: Είσοδος επαναφοράς, όπου όταν βρίσκεται στο λογικό '0', επαναφέρει το κύκλωμα στην αρχική του κατάσταση.
- sw\_in: Σήμα εισόδου από τον διακόπτη.
- sw\_out: Έξοδος τύπου buffer που παρέχει το καθαρισμένο σήμα του διακόπτη.

### B. Αρχιτεκτονική οντότητας

Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει:

- Δύο ενδιάμεσα σήματα, sync\_0 και sync\_1, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό του εισερχόμενου σήματος του διακόπτη. Ο συγχρονισμός είναι απαραίτητος για την αποφυγή του φαινομένου metastability.
- Έναν ακέραιο μετρητή (counter), αρχικοποιημένο στο 0, που καταμετρά τον αριθμό των κύκλων του ρολογιού για τους οποίους το σήμα πρέπει να παραμείνει σταθερό πριν γίνει αποδεκτή η αλλαγή.
- Μία σταθερά debounce\_limit με τιμή 50000000, η οποία καθορίζει τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων σταθερότητας για να θεωρηθεί έγκυρη μια αλλαγή στο σήμα.

Η λειτουργία του debouncer περιγράφεται από μια διαδικασία (process) ευαίσθητη στις αλλαγές των σημάτων clk και rst: Αν το reset είναι 0, τότε μηδενίζονται και όλα τα σήματα / μετρητές. **Αν το reset είναι 1:** Ελέγχεται αν βρισκόμαστε στο ανερχόμενο άκρο του παλμού, δηλαδή στην μετάβαση από χαμηλή σε υψηλή λογική κατάσταση. Στο πρώτο στάδιο συγχρονισμού, το εισερχόμενο ασύγχρονο σήμα από τον διακόπτη (sw\_in) αποθηκεύεται στο εσωτερικό καταχωρητή sync\_0. Αυτή η διαδικασία έχει σκοπό την αποφυγή του φαινομένου της μετασταθερότητας (metastability), το οποίο μπορεί να εμφανιστεί όταν ένα σήμα εισάγεται ασύγχρονα σε σύγχρονο σύστημα. Στο δεύτερο στάδιο, η τιμή του sync\_0 μεταφέρεται στο επόμενο καταχωρητή sync\_1. Με τη διαδικασία αυτή, το

σήμα του διακόπτη περνά από ένα διπλό στάδιο συγχρονισμού, με αποτέλεσμα να είναι πλέον αξιόπιστο και απαλλαγμένο από το φαινόμενο της μετασταθερότητας, έτοιμο προς περαιτέρω επεξεργασία.

Ακολουθεί έλεγχος για το αν η τιμή του καθαρισμένου σήματος εξόδου (sw\_out) είναι ήδη ίδια με αυτή του συγχρονισμένου σήματος (sync\_1). Αν οι τιμές είναι ίσες, αυτό σημαίνει ότι είτε δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια αλλαγή, είτε ότι το νέο σήμα έχει ήδη σταθεροποιηθεί, οπότε δεν απαιτείται καμία περαιτέρω ενέργεια. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μετρητής επαναφέρεται στο μηδέν, καθώς δεν υπάρχει μεταβολή προς αποδοχή.

Αν υπάρχει διαφορά μεταξύ του sw\_out και του sync\_1, τότε αυτό υποδεικνύει την ύπαρξη μιας πιθανής αλλαγής κατάστασης, η οποία απαιτεί επιβεβαίωση και αξιολόγηση. Ο μετρητής αυξάνεται κατά μία μονάδα, καταγράφοντας έτσι πόσους κύκλους χρονισμού έχει διατηρηθεί η ενδεχόμενη αλλαγή μέχρι εκείνη τη στιγμή.

Γίνεται έλεγχος αν ο μετρητής έχει φτάσει ή υπερβεί το καθορισμένο όριο debounce\_limit, που αντιστοιχεί σε 50 εκατομμύρια κύκλους (ένα χρονικό διάστημα ίσο με 1 δευτερόλεπτο). Η παραμονή στο όριο αυτό διασφαλίζει ότι το νέο σήμα είναι σταθερό και δεν αποτελεί αποτέλεσμα ηλεκτρικού θορύβου (bouncing). Εφόσον το όριο επιτευχθεί, το καθαρισμένο σήμα εξόδου (sw\_out) λαμβάνει την τιμή του συγχρονισμένου σήματος (sync\_1), αποδεχόμενο επίσημα την αλλαγή ως έγκυρη και σταθερή. Μετά την αποδοχή της αλλαγής, ο μετρητής μηδενίζεται και είναι ξανά έτοιμος για να εντοπίσει και να επιβεβαιώσει οποιαδήποτε μελλοντική μεταβολή κατάστασης.

#### IV. Πλήρης λειτουργία ελεγκτή

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η υλοποίηση του ανώτατου επιπέδου (top level), το οποίο συνθέτει τις δύο προαναφερθείσες έννοιες, ενσωματώνοντας παράλληλα νέα στοιχεία, όπως μία μηχανή καταστάσεων (state machine), με σκοπό την ανάπτυξη του τελικού ελεγκτή φωτεινής σηματοδότησης.

##### A. Γενική περιγραφή οντότητας

Στην βάση της ορίζεται μία οντότητα με τέσσερις εισόδους: clock, reset, emergency switch και pedestrian switch, καθώς και δύο εξόδους, ένα διανυσματικό σήμα 3-bit και ένα 2-bit. Για τις συμπληρωματικές λειτουργίες του ελεγκτή μπορεί να οριστούν περισσότεροι εισόδοι / εξόδοι.

- Το σήμα clock προορίζεται για σύνδεση με το εσωτερικό ρολόι της πλακέτας ανάπτυξης (συχνότητα 50 MHz).
- Το σήμα reset χρησιμοποιείται για την επαναφορά του συστήματος.
- Ο διακόπτης emergency switch ενεργοποιεί μία κατάσταση έκτακτης ανάγκης κατά την οποία όλα τα φανάρια αναβοσβήνουν, παρακάμπτοντας τη φυσιολογική λειτουργία.

- Το pedestrian switch ενεργοποιείται από πεζούς και μειώνει τον χρόνο που το πράσινο φανάρι παραμένει ενεργό για τα οχήματα στο μισό.
- Το διανυσματικό σήμα 3-bit καθορίζει τις διαφορετικές καταστάσεις του φωτεινού σηματοδότη για οχήματα (πράσινο, κίτρινο, κόκκινο), ενώ το διανυσματικό σήμα 2-bit ορίζει την κατάσταση του σηματοδότη πεζών (επιτρεπτό ή μη επιτρεπτό πέρασμα).

##### B. Αρχιτεκτονική οντότητας

Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει components όπως έναν διαιρέτη συχνότητας (clock divider) και ένα κύκλωμα απόσβεσης αναπηδήσεων (debouncer), των οποίων η λειτουργία έχει αναλυθεί προηγουμένως. Για τη χρήση αυτών των components, ορίζονται κατάλληλα σήματα εισόδου και εξόδου, καθώς και επιπλέον ενδιάμεσα σήματα απαραίτητα για τη συνολική λειτουργία του ελεγκτή φωτεινών σηματοδοτών. Πιο συγκεκριμένα ορίζεται ένας απαριθμημένος τύπος δεδομένων (enumeration) για τις πιθανές καταστάσεις του φωτεινού σηματοδότη: πράσινο (S\_GREEN), κίτρινο (S\_YELLOW) και κόκκινο (S\_RED). Στην συνέχεια δημιουργείται ένα σήμα state τύπου state\_type, που αρχικοποιείται με την κατάσταση S\_GREEN και τέλος δηλώνεται ένας ακέραιος μετρητής (counter), με αρχική τιμή μηδέν, ο οποίος χρησιμοποιείται για την καταμέτρηση του χρόνου παραμονής σε κάθε κατάσταση.

Μέσω σταθερών ορίζονται οι χρόνοι διάρκειας για κάθε κατάσταση:

- Πράσινο: 11 δευτερόλεπτα
- Κίτρινο: 7 δευτερόλεπτα
- Κόκκινο: 6 δευτερόλεπτα

**Βασικά βήματα υλοποίησης:** Αρχικά δημιουργείται μία υλοποίηση (instance) του κυκλώματος διαίρεσης συχνότητας (clock divider) και η έξοδος του συνδέεται με το σήμα clk\_divided ώστε από εδώ και έπειτα να δουλεύουν τα πάντα με το διαιρεμένο ρολόι των 1Hz και συνάμα όλοι οι χρόνοι να αντιστοιχούν σε δευτερόλεπτα. Ακολουθεί η βασική διεργασία (process) που αποτελεί την καρδιά του συστήματος.

##### C. Κανονική λειτουργία:

Στην κανονική λειτουργία του ο ελεγκτής πρέπει να ρυθμίζει επιτυχώς τους σηματοδότες σταθερής διάρκειας μιας διασταύρωσης. Αυτό υλοποιείται με μια μηχανή καταστάσεων (state machine). Σε κάθε ανερχόμενη ακμή του διαιρεμένου ρολογιού (εκτός αν υπάρξει reset), ο μετρητής αυξάνεται. Μόλις ο μετρητής φτάσει στην προκαθορισμένη τιμή της τρέχουσας κατάστασης (πχ 11 δευτερόλεπτα για το πράσινο), η μηχανή μεταβαίνει στην επόμενη κατάσταση, ακολουθώντας τον κύκλο πράσινο → κίτρινο → κόκκινο → ξανά πράσινο. Όταν γίνεται κόκκινο ενεργοποιείται ο πράσινος σηματοδότης των πεζών, ειδικά παραμένει κόκκινος. Η μηχανή αυτή είναι τύπου Moore, καθώς η έξοδος της εξαρτάται αποκλειστικά από την τρέχουσα κατάσταση και όχι από εισόδους. Στην Figure

1 παρουσιάζεται η μηχανή Moore, επιβεβαιώνοντας τα εξής:

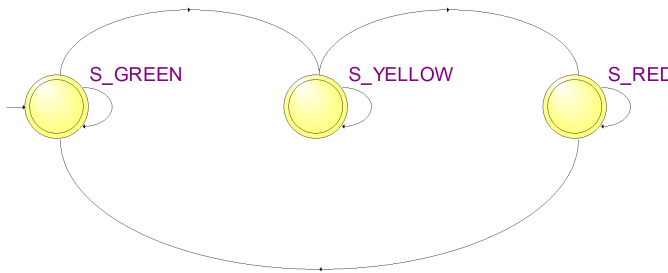


Figure 1. FSM Visual representation

Οι μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων στη συγκεκριμένη μηχανή Moore πραγματοποιούνται κυκλικά. Η αρχική κατάσταση είναι η S\_GREEN, στην οποία το σύστημα παραμένει για 11 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, η μηχανή μεταβαίνει στην κατάσταση S\_YELLOW, υποδεικνύοντας αλλαγή της εξόδου σε κίτρινο φως. Έπειτα, ακολουθεί η κατάσταση S\_RED, ολοκληρώνοντας τον κύκλο χρωμάτων. Μετά την κατάσταση S\_RED, η μηχανή επιστρέφει στην αρχική κατάσταση S\_GREEN, επαναλαμβάνοντας τον κύκλο. Οι μικροί βρόχοι (self-loops) που βρίσκονται σε κάθε κατάσταση υποδεικνύουν ότι η μηχανή παραμένει στην τρέχουσα κατάσταση μέχρι να ικανοποιηθούν οι συνθήκες μετάβασης ή να ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος παραμονής. Αυτό διασφαλίζει τη σταθερότητα και αποτρέπει τις πρόσμενες ή πρόωρες αλλαγές κατάστασης.

#### D. Προσομοίωση

Η προσομοίωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον ModelSim, με σκοπό την επαλήθευση της λειτουργίας του ελεγκτή φαναριών βάσει της σχεδίασης της πεπερασμένης μηχανής καταστάσεων (FSM). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, η συχνότητα του clock divider αυξήθηκε τεχνητά από 1 Hz σε 1000 Hz, ώστε να επιταχυνθεί η αλληλουχία καταστάσεων και να καταστεί δυνατή η παρατήρηση πλήρους κύκλου λειτουργίας σε λογικό χρονικό διάστημα.



Figure 2. Αποτέλεσμα προσομοίωσης

Στο waveform της Figure 2 αποτυπώνεται ο πυρήνας της προσομοίωσης, δηλαδή η εσωτερική λογική της FSM που ρυθμίζει τις εξόδους του φωτεινού σηματοδότη οχημάτων (veh\_light) και πεζών (ped\_light). Οι καταστάσεις emergency, reset και ped\_switch, παρότι περιλαμβάνονται στον σχεδιασμό για πλήρη λειτουργικότητα σε φυσικό υλικό (FPGA), δεν ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια αυτής της προσομοίωσης και συνεπώς δεν επηρεάζουν την εξεταζόμενη συμπεριφορά. Παρατηρείται η κυκλική εναλλαγή των

καταστάσεων της FSM, όπως αυτές ορίστηκαν στον σχεδιασμό, με τις εξόδους veh\_light και ped\_light να ακολουθούν τις προβλεπόμενες χρωματικές ακολουθίες (π.χ. 100 για κόκκινο, 010 για πορτοκαλί, 001 για πράσινο). Η αλληλουχία των σημάτων πιστοποιεί την ορθότητα του χρονισμού και της μετάβασης καταστάσεων, διασφαλίζοντας ότι η FSM συμπεριφέρεται όπως αναμένεται. Η προσομοίωση επαληθεύει τη βασική λογική του κυκλώματος και επιβεβαιώνει τη σταθερότητα της FSM, επιτρέποντας την ασφαλή συνέχιση σε υλοποίηση και δοκιμή στο υλικό.

### V. Επιπλέον λειτουργίες ελεγκτή

#### A. Λειτουργία έκτακτης ανάγκης

Ο ελεγκτής διαθέτει μια ειδική κατάσταση έκτακτης ανάγκης στην οποία οι σηματοδότες αντί να έχουν την λειτουργία που περιγράφηκε προηγουμένως έχουν μια καινούργια σύμφωνα με την οποία αναβοσβήνουν όλοι οι σηματοδότες. Για να ενεργοποιηθεί αυτή η λειτουργία πρέπει να "σηκωθεί" ο ειδικός διακόπτης για αυτή την περίπτωση και παραμένει σε αυτή την κατάσταση μέχρι να κατέβει.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης λειτουργίας είναι να ενημερώνει τα οχήματα και τους πεζούς σχετικά με καταστάσεις στον δρόμο που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, όπως για παράδειγμα η ύπαρξη κάποιου ατυχήματος.

Για να υλοποιηθεί αυτή η λειτουργία, υπάρχει ένα σήμα που περιγράφει την ενεργοποίηση της κατάστασης έκτακτης ανάγκης, όπου όταν ενεργοποιηθεί το σύστημα δεν "μπαίνει" στην μηχανή καταστάσεων αλλά ενεργοποιεί μια άλλη λειτουργία αναβοσβήσματος (blinking). Σε αυτή την λειτουργία, για κάθε θετική άνοδο του παλμού είτε ανάβουν είτε σβήνουν όλα τα χρώματα των σηματοδοτών.

#### B. Κουμπί πεζών

Στους σηματοδότες πεζών υπάρχει ένα ειδικό κουμπί, το οποίο μπορεί να πιάσει ένας πεζός ώστε να μειωθεί ο χρόνος αναμονής του. Συγκεκριμένα, ο χρόνος αναμονής για τους πεζούς μειώνεται κατά το ήμισυ του χρόνου που αντιστοιχεί στο πράσινο των οχημάτων. Στην ουσία πρόκειται για την ενεργοποίηση ενός σήματος όπου ελέγχει άμεσα τον χρονισμό του πράσινου σηματοδότη των οχημάτων.

#### C. Έξοδος σε 7-segment displays

Το σύστημα διαθέτει τρεις 7-segment οθόνες για την εμφάνιση του υπολειπόμενου χρόνου (σε δευτερόλεπτα) κάθε φάσης του φωτεινού σηματοδότη οχημάτων. Οι έξοδοι o\_seg\_CG, o\_seg\_CY και o\_seg\_CR αντιστοιχούν στις πράσινες, πορτοκαλί και κόκκινες καταστάσεις αντίστοιχα, και οδηγούνται από εσωτερικούς μετρητές (CG-Counter, CYCounter, CRCCounter) που ενημερώνονται με 1 Hz χρονισμό. Η μετατροπή των δεκαδικών τιμών (0-9) σε επταψήφιο κώδικα πραγματοποιείται μέσω της μονάδας bcd\_to\_7segment, η οποία υλοποιείται ως συνδυαστικός

αποκωδικοποιητής με χρήση case δήλωσης. Για κάθε είσοδο ακέραιας τιμής, ενεργοποιούνται τα κατάλληλα segments της οθόνης (σε active-low λογική), ώστε να απεικονιστεί το αντίστοιχο ψηφίο. Αυτή η απεικόνιση προσφέρει άμεση και ευανάγνωστη ένδειξη της χρονικής εξέλιξης κάθε κατάστασης, βελτιώνοντας τη χρηστικότητα του συστήματος τόσο για τον τελικό χρήστη όσο και κατά το στάδιο δοκιμών και αποσφαλμάτωσης (debugging).

#### *D. Λειτουργία "police siren"*

Η λειτουργία police\_siren αποτελεί μια ειδική λειτουργία προσομοίωσης κυκλοφοριακής προτεραιότητας, κατά την οποία το σύστημα αγνοεί την κανονική λογική FSM και ενεργοποιεί έναν κυκλικό εναλλασσόμενο φωτισμό στα φανάρια, προσομοιώνοντας την παρέμβαση οχημάτων προτεραιότητας (π.χ. περιπολικά, ασθενοφόρα). Πιο συγκεκριμένα, όταν η είσοδος police\_siren είναι ενεργή, η μεταβλητή police\_pattern υποβάλλεται σε κυκλική αριστερή μετατόπιση (rotate left) κάθε κύκλο του χρονισμού, δημιουργώντας ένα παλλόμενο μοτίβο στις εξόδους veh\_light που διαδοχικά ανάβουν ένα φανάρι τη φορά (π.χ. από "100" σε "010", σε "001" και επανάληψη). Ταυτόχρονα, τα φανάρια πεζών απενεργοποιούνται (ped\_light = "00"), ώστε να εξασφαλίζεται πλήρης προτεραιότητα στα διερχόμενα οχήματα ειδικών αποστολών. Για την υλοποίηση κυκλικού φωτεινού μοτίβου τύπου "police lights" χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω πράξη μετατόπισης:

```
police_pattern <= police_pattern(1 downto 0) &
police_pattern(2);
```

Η εντολή αυτή επιτυγχάνει μία κυκλική αριστερή μετατόπιση του 3-bit σήματος police\_pattern. Συγκεκριμένα, τα δύο λιγότερο σημαντικά bits διατηρούνται στη θέση τους ενώ το πιο σημαντικό bit (police\_pattern(2)) μεταφέρεται στη λιγότερο σημαντική θέση, επιτρέποντας τη συνεχή επανάληψη του μοτίβου. Το αποτέλεσμα είναι ένα επαναλαμβανόμενο κυκλικό φαινόμενο στα LEDs, το οποίο εξομοιώνει την κίνηση φωτισμού περιπολικού οχήματος.

#### *E. Ακουστική ενημέρωση μέσω buzzer*

Η σχεδίαση περιλαμβάνει μία μονάδα ελέγχου buzzer που ενεργοποιείται κατά τη φάση του κόκκινου σηματοδότη για τα οχήματα (S\_RED) και λειτουργεί ως ηχητική προειδοποίηση για τους πεζούς και τους οδηγούς. Ο σκοπός της είναι να υποδηλώνει την επικείμενη αλλαγή κατάστασης σηματοδότη και να ενισχύσει την ασφάλεια. Ο έλεγχος της εξόδου buzzer υλοποιείται από την ξεχωριστή οντότητα buzzer\_controller, η οποία λαμβάνει ως είσοδο το χρονιστικό σήμα 1 Hz (clk\_1hz), το σήμα enable και την τιμή count-down, που αναπαριστά τα υπολειπόμενα δευτερόλεπτα της κόκκινης φάσης (CRCOUNTER). Ανάλογα με την τιμή του countdown, η έξοδος buzzer\_out μεταβαίνει περιοδικά, παράγοντας ένα παλμικό μοτίβο διαφορετικής συχνότητας. Στο συγκεκριμένο υποσύστημα, χρησιμοποιείται ένας

μετρητής ο οποίος αυξάνεται γραμμικά από το 0 έως το 32. Από το εύρος των τιμών αυτού του μετρητή επιλέγονται διαδοχικές τιμές σε αυστηρά αύξουσα σειρά, οι οποίες καθορίζουν δυναμικά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των παλμών ενός παραγόμενου σήματος ρολογιού.

Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός χρονισμού με μεταβαλλόμενη συχνότητα: αρχικά το σήμα εναλλάσσεται γρήγορα, ενώ σταδιακά επιβραδύνεται καθώς οι επιλεγμένες τιμές αυξάνονται. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την υλοποίηση ενός «επιβραδυνόμενου ρολογιού» (decelerating clock), χρήσιμου για εφαρμογές όπως ακουστικές ή οπτικές ειδοποιήσεις με ρυθμικά μεταβαλλόμενο ρυθμό.

Η διαφοροποίηση στη συχνότητα των παλμών δημιουργεί μια διακριτή ακουστική κλιμάκωση, επιτρέποντας σε πεζούς και οδηγούς να αναγνωρίσουν την προσέγγιση αλλαγής του σηματοδότη ακόμα και χωρίς οπτική επαφή με τις ενδείξεις. Η λειτουργία είναι πάντα ενεργοποιημένη (enable = '1' στο top level) και συγχρονίζεται με τη λειτουργία FSM, ενσωματώνοντας έτσι ένα χρήσιμο χρονικό feedback που ενισχύει τη χρηστικότητα και την προσβασιμότητα του συστήματος.

#### References

- [1] Engelmann, Frederick C. (1996) A History of the Austrian Migration to Canada, Carleton University Press, ISBN 978-0-88629-283-6, p. 184
- [2] McLean, James W. (1966) "The Phony Ogre of Automation", Montreal Gazette, February 26, 1966
- [3] "Josef Kates Found Ways to Unsnarl Traffic and Solve Business Problems With Computers". James R. Hagerly, Wall Street Journal
- [4] "Traffic Signal Design Terminology". [www.traffic-signal-design.com](http://www.traffic-signal-design.com).
- [5] "Traffic advisory leaflets from 1989 to 2009". GOV.UK.
- [6] "Traffic Signal Design Terminology". [www.traffic-signal-design.com](http://www.traffic-signal-design.com). Retrieved 2023-08-24.
- [7] Digital Design (VHDL): An Embedded Systems Approach Using VHDL, September 14, 2007, Peter J. Ashenden, pages 557 - 569.
- [8] FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx Spartan-3 Version, September 21, 2011, Pong P. Chu