

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΛΗΨΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ, ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΚΑΙ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΑΓΩΝΙΣΤΙΚΑ
ΟΧΗΜΑΤΑ»



Του φοιτητή
Κατσίκη Δημητρίου
Αρ. Μητρώου: 2020067

Επιβλέπων
Κιοσκερίδης Ν. Ιορδάνης
Βαθμίδα Καθηγητής

Ημερομηνία 30-05-2026

Τίτλος Δ.Ε. Ανάπτυξη ενσωματωμένου συστήματος λήψης δεδομένων, απεικόνισης και ελέγχου υποσυστημάτων για αγωνιστικά οχήματα

Κωδικός Δ.Ε. 25124

Ονοματεπώνυμο φοιτητή Κατσίκης Δημήτριος

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Κιοσκερίδης Ν. Ιορδάνης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 19-02-2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 30-05-2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Κατσίκη Δημητρίου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιοδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στον πατέρα μου»

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας προέκυψε από το ενεργό ενδιαφέρον μου για την τεχνολογία της αυτοκίνησης και τον μηχανοκίνητο αθλητισμό. Κίνητρο για την υλοποίηση αποτέλεσε η πρόκληση της ενσωμάτωσης πολλαπλών τεχνολογιών, όπως η λήψη δεδομένων GPS και η ανάγνωση αισθητήρα οξυγόνου, σε μία ενιαία πλατφόρμα, επιλύοντας το πρόβλημα των πολλαπλών και δαπανηρών ανεξάρτητων οργάνων που συναντάται συχνά στα αγωνιστικά οχήματα. Παράλληλα, η πολυπλοκότητα των δικτύων του αυτοκινήτου, η διαχείριση απαιτητικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως τα CAN bus και K-line, και γενικά η ενσωμάτωση όλων των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα αυτοκίνητα, αποτέλεσαν ένα ισχυρό έναυσμα για μάθηση.

Η εκπόνηση ενός τόσο σύνθετου έργου, το οποίο συνδυάζει τον σχεδιασμό ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (PCB), την ανάπτυξη του απαιτητικού λογισμικού και τη μηχανολογική ολοκλήρωση, αποτέλεσε μια μεγάλη πρόκληση. Το σημαντικότερο όφελος που αποκόμισα ήταν ότι ένωσα τη θεωρία με την πράξη. Αντιμετωπίζοντας πραγματικά προβλήματα στη σύνδεση υλικού και λογισμικού, απέκτησα μια ολοκληρωμένη και πρακτική εικόνα για τον ρόλο του μηχανικού. Αυτή η εμπειρία ήταν το ιδανικό κλείσιμο για τις σπουδές μου, δίνοντάς μου πολύτιμα εφόδια για τα επόμενα βήματά μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει τον πλήρη σχεδιασμό, την κατασκευή και την αξιολόγηση ενός προηγμένου ενσωματωμένου συστήματος λήψης δεδομένων, απεικόνισης και ελέγχου υποσυστημάτων για αγωνιστικά οχήματα. Σκοπός του έργου είναι η αντικατάσταση του συμβατικού πίνακα οργάνων με μια προηγμένη ψηφιακή οθόνη. Οι βασικές του λειτουργίες περιλαμβάνουν την προβολή κρίσιμων παραμέτρων του κινητήρα (στροφές, θερμοκρασίες, πίεση πολλαπλής, αναλογία αέρα-καυσίμου και ταχύτητα μέσω GPS), καθώς και προηγμένες αγωνιστικές δυνατότητες, όπως η ανίχνευση σχέσης κιβωτίου ταχυτήτων, η οπτική ειδοποίηση αλλαγής ταχύτητας και ο ηλεκτρονικός έλεγχος πίεσης υπερπλήρωσης μέσω αλγορίθμου κλειστού βρόχου PID.

Η κατασκευή βασίζεται σε μια ειδικά σχεδιασμένη πλακέτα (PCB) που χρησιμοποιεί δύο μικροελεγκτές για τον σωστό καταμερισμό των εργασιών. Ο κύριος μικροελεγκτής ESP32-S3 αναλαμβάνει τα γραφικά της οθόνης και τις επικοινωνίες, ενώ ο βοηθητικός μικροελεγκτής STM32F401RE συλλέγει αδιάκοπα τα δεδομένα των αισθητήρων. Η τροφοδοσία σχεδιάστηκε σε διαδοχικά στάδια καθώς το ηλεκτρικό περιβάλλον ενός οχήματος είναι εξαιρετικά ασταθές. Αρχικά, ένα κύκλωμα έξυπνης διόδου προστατεύει το σύστημα από λάθος πολικότητα, έπειτα ένα κύκλωμα buck-boost εξομαλύνει τις αυξομειώσεις της τάσης μπαταρίας σταθεροποιώντας την τάση στα 12V και τέλος, μετατροπείς παράγουν τις χαμηλότερες τάσεις των 5V και 3.3V που απαιτούνται για την ασφαλή λειτουργία των ψηφιακών κυκλωμάτων.

Σε επίπεδο λογισμικού, ο κύριος ελεγκτής λειτουργεί σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου (FreeRTOS). Αντλεί δεδομένα απευθείας από την εργοστασιακή μονάδα του κινητήρα (ECU) μέσω της γραμμής K-line, ενώ παράλληλα διαβάζει τις μετρήσεις του ευρυζωνικού αισθητήρα οξυγόνου για την αναλογία αέρα-καυσίμου μέσω του διαύλου CAN. Η γραφική διεπαφή σχεδιάστηκε με τη βιβλιοθήκη LVGL, η οποία οδηγεί την οθόνη TFT μέσω του παράλληλου διαύλου RGB565 για την ταχεία μεταφορά των δεδομένων εικόνας και τον ακριβή χρονισμό των σημάτων συγχρονισμού.

Το σύστημα ολοκληρώθηκε σε τρισδιάστατα εκτυπωμένο περίβλημα από υλικό ABS και αξιολογήθηκε επιτυχώς σε πραγματικό αγωνιστικό όχημα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιβεβαίωσαν την απόλυτη αξιοπιστία του υλικού και την αδιάλειπτη απόκριση των λειτουργιών του σε πραγματικό χρόνο.

«Development of an Embedded System for Data Acquisition, Visualization, and Subsystem Control in Racing Vehicles»

«Katsikis Dimitrios»

Abstract

This diploma thesis presents the comprehensive design, construction, and evaluation of an advanced embedded system for data acquisition, visualization, and subsystem control, tailored for racing vehicles. The project aims to replace the conventional instrument cluster with a modern digital display. Its core functions include displaying critical engine parameters (RPM, temperatures, manifold pressure, air-fuel ratio, and GPS-based speed), as well as advanced racing features such as gear detection, visual shift-light notifications, and electronic boost pressure control via a closed-loop PID algorithm.

The hardware is based on a custom-designed printed circuit board (PCB) that utilizes two microcontrollers for efficient task distribution. The primary ESP32-S3 microcontroller handles the screen graphics and communications, while the auxiliary STM32F401RE microcontroller continuously collects sensor data. The power supply was designed in sequential stages, given the highly unstable electrical environment of a vehicle. Initially, a smart diode circuit protects the system from reverse polarity, then, a buck-boost circuit smooths battery voltage fluctuations, stabilizing the output at 12V. Finally, converters generate the lower 5V and 3.3V voltages required for the safe operation of the digital circuits.

In terms of software, the main controller operates within a real-time environment (FreeRTOS). It extracts data directly from the factory Engine Control Unit (ECU) via the K-line, while simultaneously reading wideband oxygen sensor measurements for the air-fuel ratio over the CAN bus. The graphical user interface was developed using the LVGL library, which drives the TFT display via the RGB565 parallel bus for high-speed image data transfer and precise synchronization of timing signals.

The system was mechanically integrated into a 3D-printed ABS enclosure and successfully evaluated in a real racing vehicle. The test results confirmed the absolute reliability of the hardware and the uninterrupted real-time response of its functions.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην πραγματοποίησή της και στάθηκαν δίπλα μου κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κιοσκερίδη Ν. Ιορδάνη, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις χρήσιμες παρατηρήσεις του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου, για τη συνεχή στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια. Η ηθική τους υποστήριξη υπήρξε καθοριστική τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και κατά την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	viii
Κατάλογος Εικόνων	xi
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Συνομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο και πλαίσιο της εργασίας.....	1
1.2 Κίνητρα Ανάπτυξης του Συστήματος	1
1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας.....	1
1.4 Συνοπτική περιγραφή του συστήματος.....	2
1.5 Μεθοδολογία ανάπτυξης.....	2
1.6 Δομή της εργασίας	2
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Ενσωματωμένα συστήματα σε εφαρμογές οχημάτων.....	3
2.3 Μικροελεγκτές ESP32-S3 και STM32.....	3
2.4 Λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου και FreeRTOS	4
2.5 UART και σειριακή επικοινωνία.....	5
2.6 K-line, ISO 9141 και DS2 πρωτόκολλο	6
2.7 CAN bus και TWAI	7
2.8 GPS, NMEA και UBX (Αρχές Λειτουργίας και Πρωτόκολλα).....	9
2.9 Αναλογικές και ψηφιακές είσοδοι.....	10
2.10 Γραφική απεικόνιση, LVGL και RGB565	11
2.11 Wideband Controller και αισθητήρας οξυγόνου BOSCH LSU 4.9	12
2.12 Boost solenoid, PWM και PID έλεγχος.....	13
2.13 Μη Πτητική Μνήμη και Διαχείριση Δεδομένων (Non-Volatile Storage - NVS)	14
2.14 Επίλογος.....	15
Κεφάλαιο 3ο: Προδιαγραφές και συνολική αρχιτεκτονική συστήματος	16
3.1 Εισαγωγή.....	16

3.2	Λειτουργικές απαιτήσεις	16
3.3	Μη λειτουργικές απαιτήσεις.....	17
3.4	Συνολική αρχιτεκτονική hardware/software	17
3.5	Ροή δεδομένων	18
3.6	Κατανομή ρόλων ESP32 και STM32.....	19
3.7	Χρονισμοί και περιοδικότητα.....	19
3.8	Επίλογος	21
Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση υλικού, custom PCB και μηχανολογική ολοκλήρωση		22
4.1	Εισαγωγή.....	22
4.2	Κύρια υποσυστήματα της πλακέτας.....	22
4.3	Τροφοδοσία και προστασίες.....	22
4.3.1	Εισαγωγή.....	22
4.3.2	Είσοδος κύριας τροφοδοσίας	23
4.3.3	Προστασία ανάστροφης πολικότητας	24
4.3.4	Προστασία από αιχμές τάσης.....	24
4.3.5	Σταθεροποίηση γραμμής 12V (buck-boost).....	25
4.3.6	Γραμμή τροφοδοσίας 5V.....	27
4.3.7	Γραμμή τροφοδοσίας 3.3V.....	28
4.3.8	Οπίσθιος φωτισμός οθόνης	29
4.4	Κύριος ελεγκτής ESP32-S3.....	30
4.5	Δευτερεύων μικροελεγκτής STM32: αισθητήρες, GPS, πλήκτρα	34
4.6	Υποσύστημα οθόνης RGB LCD	38
4.7	K-line interface.....	39
4.8	CAN interface.....	41
4.9	Έξοδοι ελέγχου.....	42
4.10	Κριτήρια PCB layout.....	44
4.11	Μηχανολογική ολοκλήρωση συσκευής	49
4.11.1	Γεωμετρία και διαστάσεις	49
4.11.2	Στήριξη PCB και οθόνης.....	50
4.11.3	Πρόσβαση σε εξωτερικές διασυνδέσεις	51
4.11.4	Διαδικασία κατασκευής.....	52
4.12	Επίλογος	52
Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση λογισμικού ESP32-S3 και STM32		53
5.1	Εισαγωγή.....	53
5.2	Περιβάλλον ανάπτυξης	53

5.3	Δομή λογισμικού ESP32-S3.....	53
5.4	Ακολουθία εκκίνησης ESP32.....	54
5.5	Εργασίες επικοινωνίας και shared data	54
5.6	K-line task	55
5.7	STM32 UART link.....	57
5.8	CAN wideband receiver	57
5.9	Δομή λογισμικού STM32.....	59
5.10	GPS, inputs και buttons στον STM32	60
5.11	Επίλογος	60
Κεφάλαιο 6ο: Γραφική διεπαφή, ρυθμίσεις και αλγόριθμοι λειτουργίας.....		61
6.1	Εισαγωγή.....	61
6.2	Γραφικό περιβάλλον LVGL και SquareLine Studio	61
6.3	Οθόνες του συστήματος	61
6.4	Βελτιστοποίηση ενημέρωσης UI.....	64
6.5	Πλοήγηση και χειρισμός πλήκτρων	66
6.6	Έλεγχος υπερπλήρωσης (Boost Control) και αλγόριθμοι λειτουργίας	66
6.7	Ανίχνευση σχέσης κιβωτίου	71
6.8	Odometer και shift-light	72
6.9	Αποθήκευση ρυθμίσεων (NVS Persistence)	73
6.10	Επίλογος	73
Κεφάλαιο 7ο: Δοκιμές, αποτελέσματα και αξιολόγηση.....		74
7.1	Εισαγωγή.....	74
7.2	Δοκιμές τροφοδοσίας και PCB.....	74
7.3	Δοκιμές γραφικής διεπαφής	74
7.4	Δοκιμές επικοινωνίας K-line	75
7.5	Δοκιμές UART STM32–ESP32	76
7.6	Δοκιμές Wideband Controller	76
7.7	Δοκιμές GPS και αισθητήρων	77
7.8	Δοκιμές Boost Control	77
7.9	Αξιολόγηση ως προς τις αρχικές απαιτήσεις.....	78
7.10	Περιορισμοί.....	79
7.11	Επίλογος	79
Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις.....		80
8.1	Σύνοψη εργασίας.....	80
8.2	Κύρια συμπεράσματα.....	80

8.3 Προτάσεις βελτίωσης	81
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α :Διαγράμματα Ροής ESP32-S3	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Διαγράμματα Ροής Λογισμικού STM32F401RE	89
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Σχηματικό Διάγραμμα Τυπωμένης Πλακέτας (PCB Schematic)	97

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1. Αισθητήρας οξυγόνου Bosch LSU 4.9 [18]	13
Εικόνα 4-1. Πίσω όψη πλακέτας.....	48
Εικόνα 4-2. Εμπρόσθια όψη πλακέτας.....	48
Εικόνα 4-3. Ολοκληρωμένη μηχανολογικά συσκευή	49
Εικόνα 4-4. Αναπτυγμένη απεικόνιση εξαρτημάτων συσκευής (μπροστά όψη)	50
Εικόνα 4-5. Αναπτυγμένη απεικόνιση εξαρτημάτων συσκευής (πίσω όψη)	51
Εικόνα 4-6. Κάλυμμα συσκευής και πρόσβαση σε εξωτερικές διασυνδέσεις	52
Εικόνα 6-1. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνη 16 1	62
Εικόνα 6-2. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνη 2	62
Εικόνα 6-3. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνης 3	63
Εικόνα 6-4. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνης 4	63
Εικόνα 6-5. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνης 5	63
Εικόνα 7-1. Εγκατάσταση αισθητήρα οξυγόνου στο αγωνιστικό όχημα.....	76
Εικόνα 7-2. Λειτουργία συσκευής εγκατεστημένη σε αγωνιστικό όχημα	78

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Τυπική δομή πακέτου δεδομένων του ασύγχρονου σειριακού πρωτοκόλλου UART [41] ..	6
Σχήμα 2-2. Δομή επικοινωνίας K-LINE [48].....	7
Σχήμα 2-3. Διάγραμμα επικοινωνίας CAN Bus μεταξύ ηλεκτρονικών μονάδων ενός οχήματος [1].....	7
Σχήμα 2-4. Δομή πλαισίου δεδομένων CAN με τα βασικά πεδία μετάδοσης [1].....	9
Σχήμα 2-5. Συνδεσμολογία ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας ελέγχου πίεσης [50]	14
Σχήμα 4-1. Διακυμάνσεις στη γραμμή τροφοδοσίας της μπαταρίας οχήματος [51]	23
Σχήμα 4-2. Απαιτήσεις τάσης για το στάδιο μετατροπής ισχύος σε αυτοκινητιστικές εφαρμογές [51]	23
Σχήμα 4-3. Προσέγγιση μετατροπής DC/DC από την τάση της μπαταρίας [51].....	23
Σχήμα 4-4. Κύκλωμα προστασίας ανάστροφης πολικότητας	24
Σχήμα 4-5. Κύκλωμα προστασίας από αιχμές τάσης.....	25
Σχήμα 4-6. Κύκλωμα σταθεροποίησης γραμμής 12V (buck-boost)	27
Σχήμα 4-7. Κύκλωμα μετατροπής 12V σε 5V	28
Σχήμα 4-8. Κύκλωμα μετατροπής 5V σε 3.3V	28
Σχήμα 4-9. Κύκλωμα τροφοδοσίας οπίσθιου φωτισμού οθόνης	30
Σχήμα 4-10. Συνδεσμολογία και κυκλώματα Μικροελεγκτή ESP32.....	33
Σχήμα 4-11.Κύκλωμα αισθητήρα πίεσης εισαγωγής (MAP).....	35

Σχήμα 4-12. Κύκλωμα ψηφιακών εισόδων με οπτοζεύκτες	36
Σχήμα 4-13. Συνδεσμολογία και κυκλώματα Μικροελεγκτή STM32	37
Σχήμα 4-14. Συνδεσμολογία οθόνης με FPC connector	39
Σχήμα 4-15. Κύκλωμα για τη διασύνδεση με το πρωτόκολλο K-LINE	41
Σχήμα 4-16. Κύκλωμα για τη διασύνδεση με το πρωτόκολλο CAN bus.....	42
Σχήμα 4-17. Κύκλωμα οδήγησης MOSFET εξόδων ελέγχου.....	43
Σχήμα 4-18. Κύκλωμα αλυσίδας LED WS2812B	44
Σχήμα 4-19. Πρώτο Επίπεδο χαλκού πλακέτας	46
Σχήμα 4-20. Δεύτερο επίπεδο χαλκού πλακέτας.....	46
Σχήμα 4-21. Τρίτο επίπεδο χαλκού πλακέτας.....	47
Σχήμα 4-22. Τέταρτο επίπεδο χαλκού πλακέτας.....	47
Σχήμα 5-1. Διάγραμμα Εξαρτημάτων Συστήματος (System Component Diagram) και καταναμημένη αρχιτεκτονική Dual-MCU.....	54
Σχήμα 5-2. Διάγραμμα Αλληλουχίας Επικοινωνίας (Task Communication Sequence Diagram) και ασφαλής διαχείριση κοινόχρηστης μνήμης.....	55
Σχήμα 5-3. Διάγραμμα ροής άντλησης δεδομένων κινητήρα και λειτουργίας του ιδιοταγούς πρωτοκόλλου BMW DS2 μέσω της γραμμής K-line.....	57
Σχήμα 5-4. Διάγραμμα ροής λήψης και υπολογισμού της αναλογίας αέρα-καυσίμου (AFR) μέσω του διαύλου επικοινωνίας CAN.....	59
Σχήμα 6-1. Λογική περιοδικής ανανέωσης της γραφικής διεπαφής χρήστη και αλγόριθμος ελέγχου καταστάσεων "Dirty-Check".....	65
Σχήμα 6-2. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου υπερπλήρωσης (Boost Control Flowchart) και εναλλαγής καταστάσεων βρόχου	69
Σχήμα 6-3. Διάγραμμα ροής του ελεγκτή PID για τον υπολογισμό του σφάλματος και την παραγωγή του σήματος PWM (PID Controller Flow)	70
Σχήμα 6-4. Αλγόριθμος κινηματικής εξίσωσης για την αυτόματη ανίχνευση και προβολή της τρέχουσας σχέσης κιβωτίου ταχυτήτων (Gear Detection).....	72
Σχήμα A.1. Διάγραμμα πλοήγησης και διάταξης του κεντρικού μενού ρυθμίσεων (Οθόνη 3 - Settings)	87
Σχήμα A.2. Οθόνη παραμετροποίησης και επεξεργασίας πινάκων του συστήματος ελέγχου υπερπλήρωσης (Οθόνη 4 - Boost Map Editor).....	87
Σχήμα A.3. Οθόνη διαμόρφωσης παραμέτρων οχήματος και σχέσεων μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων (Οθόνη 5 - Vehicle Config).....	88
Σχήμα B.1. Διάγραμμα ροής αρχικοποίησης συστήματος δευτερεύοντος μικροελεγκτή (System Initialisation)	89
Σχήμα B.2. Διάγραμμα κύριου βρόχου λειτουργίας (Main Loop Flowchart) του STM32	90
Σχήμα B.3. Διάγραμμα ροής αρχικοποίησης και διαμόρφωσης δέκτη GPS (GPS Initialisation Flowchart)	91
Σχήμα B.4. Διάγραμμα επεξεργασίας δεδομένων GPS και αποκωδικοποίησης πρωτοκόλλου NMEA92	
Σχήμα B.5. Διάγραμμα λήψης και προεπεξεργασίας αναλογικών μετρήσεων αισθητήρων (Sensor Acquisition).....	93
Σχήμα B.6. Διάγραμμα μηχανής καταστάσεων αποθορυβοποίησης πλήκτρων (Debounce State Machine Flowchart)	94

Σχήμα Β.7. Διάγραμμα μετάδοσης πακέτου δεδομένων (Data Packet Transmission) προς τον ESP32-S3	95
Σχήμα Β.8. Διάγραμμα λήψης και αποκωδικοποίησης εντολών ελέγχου από τον ESP32-S3.....	96
Σχήμα C.1. Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος της πλακέτας	97

Συντομογραφίες

Δ.Ε.: Διπλωματική Εργασία

ΔΙΠΑΕ: Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

Π.Ε.: Πτυχιακή Εργασία

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene): Βιομηχανικό πλαστικό υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης

ACK (Acknowledge): Πακέτο επιβεβαίωσης λήψης επικοινωνίας

ADC (Analog-to-Digital Converter): Αναλογικο-Ψηφιακός Μετατροπέας

AFR (Air-Fuel Ratio): Αναλογία αέρα-καυσίμου

ART (Adaptive Real-Time memory accelerator): Επιταχυντής μνήμης πραγματικού χρόνου

ASCII (American Standard Code for Information Interchange): Πρότυπο κωδικοποίησης χαρακτήρων

CAN (Controller Area Network): Δίαυλος επικοινωνίας δικτύου οχημάτων

CPU (Central Processing Unit): Κεντρικός Επεξεργαστής

CSV (Comma-Separated Values): Μορφή αρχείου/πακέτου κειμένου με τιμές διαχωρισμένες με κόμμα

DMA (Direct Memory Access): Ελεγκτής Άμεσης Πρόσβασης στη Μνήμη

DS2 (Diagnostic System 2): Ιδιοταγές διαγνωστικό πρωτόκολλο επικοινωνίας της BMW

DSP (Digital Signal Processing): Επεξεργασία ψηφιακών σημάτων

ECU (Engine Control Unit): Μονάδα Ελέγχου Κινητήρα / Εργοστασιακός εγκέφαλος

EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory): Ηλεκτρικά διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο για ανάγνωση

EMI (Electromagnetic Interference): Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές / ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος

ESR (Equivalent Series Resistance): Ισοδύναμη Σειριακή Αντίσταση (για πυκνωτές)

FPC (Flexible Printed Circuit): Εύκαμπτο τυπωμένο κύκλωμα / καλωδιοταινία

FPU (Floating Point Unit): Μονάδα κινητής υποδιαστολής

GNSS (Global Navigation Satellite Systems): Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης

GPIO (General-Purpose Input/Output): Ακροδέκτες γενικής χρήσης

GPS (Global Positioning System): Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης / Πλοήγησης

GUI (Graphical User Interface): Γραφική διεπαφή χρήστη

HTCC (High Temperature Co-fired Ceramic): Κεραμικό συν-ψημένο σε υψηλή θερμοκρασία (μέθοδος κατασκευής αισθητήρα λάμδα)

I2C (Inter-Integrated Circuit): Σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας

IMU (Inertial Measurement Unit): Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο)

ISO (International Organization for Standardization): Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης

ISR (Interrupt Service Routine): Ρουτίνα εξυπηρέτησης διακοπής

JTAG (Joint Test Action Group): Διεπαφή αποσφαλμάτωσης και προγραμματισμού

LDO (Low-Dropout regulator): Γραμμικός σταθεροποιητής τάσης

LVGL (Light and Versatile Graphics Library): Βιβλιοθήκη γραφικών ανοιχτού κώδικα

MAP (Manifold Absolute Pressure): Απόλυτη πίεση πολλαπλής εισαγωγής

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor): Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου

MPU (Memory Protection Unit): Μονάδα προστασίας μνήμης

NMEA (National Marine Electronics Association): Πρότυπο επικοινωνίας δεδομένων δορυφορικής πλοήγησης

NVM (Non-Volatile Memory): Μη Πτητική Μνήμη

NVS (Non-Volatile Storage): Σύστημα αποθήκευσης σε μη πτητική μνήμη

OBD2 (On-Board Diagnostics 2): Δεύτερη γενιά συστήματος ενσωματωμένης διάγνωσης

PCB (Printed Circuit Board): Τυπωμένη Πλακέτα Κυκλώματος

PID (Proportional-Integral-Derivative): Ελεγκτής / Αλγόριθμος Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Παραγωγικός

PIE: Ειδικές επεκτάσεις συνόλου εντολών επεξεργαστή

PSRAM (Pseudostatic Random Access Memory): Γρήγορη εξωτερική μνήμη

PWM (Pulse Width Modulation): Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού

RAM (Random Access Memory): Μνήμη τυχαίας προσπέλασης

RGB (Red, Green, Blue): Χρωματικό πρότυπο (Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε)

RPM (Revolutions Per Minute): Στροφές κινητήρα ανά λεπτό

RTOS (Real-Time Operating System): Λειτουργικό Σύστημα Πραγματικού Χρόνου

SNR (Signal-to-Noise Ratio): Ισχύς σήματος / Λόγος σήματος προς θόρυβο

SoC (System-on-Chip): Σύστημα σε μικροκύκλωμα

SPI (Serial Peripheral Interface): Σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας περιφερειακών

SRAM (Static Random Access Memory): Στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης

SWD (Serial Wire Debug): Σειριακή διεπαφή αποσφαλμάτωσης

TFT LCD (Thin-Film-Transistor Liquid-Crystal Display): Έγχρωμη οθόνη υγρών κρυστάλλων

TPS (Throttle Position Sensor): Αισθητήρας θέσης πεταλούδας γκαζιού / Ποσοστό πατήματος πεντάλ

TTF (Time-To-First-Fix): Χρόνος μέχρι την πρώτη επιτυχή εύρεση θέσης (για το GPS)

TVS (Transient Voltage Suppressor): Δίοδος προστασίας από στιγμιαίες υπερτάσεις

TWAI (Two-Wire Automotive Interface): Ελεγκτής επικοινωνίας CAN

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter): Ασύγχρονος σειριακός πομποδέκτης

UBX: Ιδιοταγές δυαδικό πρωτόκολλο επικοινωνίας της u-blox

UI (User Interface): Διεπαφή χρήστη

USB (Universal Serial Bus): Ενιαίος σειριακός διάυλος

UVLO (Under Voltage Lockout): Μηχανισμός προστασίας από χαμηλή τάση

Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και πλαίσιο της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο της σχεδίασης και ανάπτυξης προηγμένων ηλεκτρονικών συστημάτων για εφαρμογές στον μηχανοκίνητο αθλητισμό. Στα σύγχρονα αγωνιστικά οχήματα, η παρακολούθηση πολλαπλών αισθητήρων σε συνδυασμό με την ικανότητα δυναμικού ελέγχου υποσυστημάτων είναι απολύτως απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και την ασφάλεια κατά την οδήγηση. Ωστόσο, η αξιόπιστη απεικόνιση αυτών των σημαντικών δεδομένων αποτελεί συχνά πρόβλημα, καθώς παραδοσιακά απαιτείται η εγκατάσταση πολλών, ακριβών και ανεξάρτητων οργάνων.

Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης μιας ενιαίας πλατφόρμας που να ενσωματώνει ταυτόχρονα πολλαπλές τεχνολογίες. Το αντικείμενο της εργασίας επικεντρώνεται ακριβώς στην κάλυψη αυτής της επιτακτικής ανάγκης, υλοποιώντας ένα σύστημα για τη λήψη δεδομένων (data acquisition) σε πραγματικό χρόνο, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα άμεσης απεικόνισης κρίσιμων παραμέτρων στον οδηγό του αγωνιστικού οχήματος.

1.2 Κίνητρα Ανάπτυξης του Συστήματος

Το βασικό κίνητρο για την ανάπτυξη του συστήματος είναι οι υψηλές απαιτήσεις που προκύπτουν σε αγωνιστικές συνθήκες, όπου η ταχύτητα λήψης αποφάσεων από τον οδηγό αλλά και η χρήση δεδομένων για τη βελτιστοποίηση του οχήματος είναι κρίσιμη. Ένα τέτοιο ενσωματωμένο σύστημα καθίσταται αναγκαίο καθώς επιτρέπει τη γρήγορη ανάγνωση κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας, όπως οι στροφές του κινητήρα (RPM), οι θερμοκρασίες λειτουργίας (π.χ. ψυκτικού, λαδιού), η αναλογία αέρα/καυσίμου (AFR), η πίεση εισερχόμενου αέρα στην πολλαπλή εισαγωγή (MAP) και η πραγματική ταχύτητα του οχήματος. Παράλληλα, το σύστημα επεκτείνει τη χρησιμότητά του παρέχοντας προηγμένες αγωνιστικές λειτουργίες, όπως η ανίχνευση και απεικόνιση της σχέσης κιβωτίου ταχυτήτων, η οπτική ειδοποίηση μέσω προγραμματιζόμενου shift-light για την αλλαγή σχέσης, καθώς και η δυνατότητα ρύθμισης και παρακολούθησης της πίεσης του υπερσυμπιεστή (boost control).

1.3 Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας, τέθηκαν οι παρακάτω συγκεκριμένοι στόχοι:

- Σχεδίαση custom PCB για την ηλεκτρονική ενοποίηση όλων των υποσυστημάτων σε μία πλακέτα.
- Ανάπτυξη λογισμικού (firmware) για τον κύριο ελεγκτή ESP32-S3.
- Ανάπτυξη λογισμικού (firmware) για τον μικροελεγκτή STM32F401RE, ως δευτερεύοντα μικροελεγκτή περιφερειακών.
- Υλοποίηση επικοινωνίας με την εργοστασιακή μονάδα ελέγχου (ECU) μέσω K-line (DS2 protocol) και CAN bus πρωτοκόλλων για την λήψη δεδομένων του κινητήρα.
- Ενσωμάτωση του αυτόνομου Wideband Controller (rusEFI) στο PCB και λήψη δεδομένων AFR μέσω διαύλου CAN.
- Λήψη δεδομένων GPS, αισθητήρων (π.χ. MAP) και ψηφιακών εισόδων μέσω του δευτερεύοντος μικροελεγκτή STM32.

- Ανάπτυξη ενός γρήγορου και σύγχρονου γραφικού περιβάλλοντος με τη χρήση της βιβλιοθήκης LVGL.
- Υλοποίηση μενού ρυθμίσεων, χαρτών ελέγχου boost (PID και open-loop) και διασφάλιση της αποθήκευσής τους σε μνήμη NVS.
- Πλήρης δοκιμή, ενοποίηση και αξιολόγηση λειτουργίας του συνολικού συστήματος.

1.4 Συνοπτική περιγραφή του συστήματος

Η αρχιτεκτονική του υλοποιημένου συστήματος ακολουθεί μια δομή δύο μικροελεγκτών (Master-Slave). Κεντρικό ρόλο διαδραματίζει ο ESP32-S3 (dashboard controller), ο οποίος οδηγεί την οθόνη αφής RGB LCD 800×480 προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εμπειρία διεπαφής χρήστη (LVGL UI), ενώ παράλληλα διαχειρίζεται το κύκλωμα ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (boost solenoid) μέσω PWM. Ο μικροελεγκτής STM32F401RE λειτουργεί ως co-processor (front-end αισθητήρων), διαβάζοντας δεδομένα από αναλογικούς/ψηφιακούς αισθητήρες, το GPS και τα πλήκτρα του χειριστή. Επιπρόσθετα, η επικοινωνία με τον εγκέφαλο του οχήματος (ECU) επιτυγχάνεται μέσω πρωτοκόλλων K-line και CAN bus, ενώ οι αναγνώσεις του αισθητήρα λάμδα συλλέγονται από αυτόνομο wideband controller μέσω του διαύλου CAN.

1.5 Μεθοδολογία ανάπτυξης

Για την ολοκλήρωση του έργου ακολουθήθηκε μια σταδιακή και δομημένη μεθοδολογία. Ξεκινώντας με την ανάλυση απαιτήσεων του συστήματος, προσδιορίστηκαν οι λειτουργικές προδιαγραφές. Ακολούθησε η σχεδίαση hardware, η οποία συμπεριέλαβε την επιλογή των εξαρτημάτων και το σχεδιασμό της πλακέτας. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε η ανάπτυξη του firmware ανά υποσύστημα (STM32 και ESP32). Έπειτα, ακολούθησε η διαδικασία της ενοποίησης (integration) όλων των συστημάτων και η δημιουργία του γραφικού περιβάλλοντος (UI). Τέλος, διεξήχθησαν εκτενείς δοκιμές επικοινωνίας μεταξύ των πρωτοκόλλων (UART, CAN, K-line) καθώς και δοκιμές λειτουργιών για την επαλήθευση και αξιολόγηση της συνολικής απόδοσης.

1.6 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται με μια λογική αλληλουχία κεφαλαίων. Μετά από αυτή την Εισαγωγή, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο (μικροελεγκτές, RTOS, πρωτόκολλα επικοινωνίας). Το Κεφάλαιο 3 καταγράφει τις προδιαγραφές και τη συνολική αρχιτεκτονική του συστήματος. Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στη σχεδίαση του υλικού (hardware), της custom PCB και τη μηχανολογική ολοκλήρωση. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η υλοποίηση του λογισμικού (firmware) για τους ελεγκτές ESP32-S3 και STM32. Το Κεφάλαιο 6 παρουσιάζει τη δημιουργία της γραφικής διεπαφής (LVGL UI), τις ρυθμίσεις και τους αλγόριθμους λειτουργίας (π.χ. boost control, gear detection). Το Κεφάλαιο 7 καλύπτει τις δοκιμές, τα αποτελέσματα και την τελική αξιολόγηση του συστήματος, ενώ στο Κεφάλαιο 8 εξάγονται τα συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παραθέτει το απαραίτητο θεωρητικό και τεχνολογικό υπόβαθρο για την ολοκληρωμένη κατανόηση των αρχών λειτουργίας και της αρχιτεκτονικής του ενσωματωμένου συστήματος που αναπτύχθηκε. Αρχικά αναλύεται η δομή και η εξέλιξη των δικτυωμένων ενσωματωμένων συστημάτων ελέγχου στο σύγχρονο περιβάλλον οχημάτων. Στη συνέχεια, εξετάζεται η αρχιτεκτονική των μικροελεγκτών και ο κρίσιμος ρόλος των Λειτουργικών Συστημάτων Πραγματικού Χρόνου (RTOS). Επιπλέον, το κεφάλαιο εμβαθύνει στο φυσικό και λογικό επίπεδο των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων επικοινωνίας UART, K-Line, CAN bus, καθώς και στα πρότυπα δορυφορικής πλοήγησης και λήψης δεδομένων θέσης. Τέλος, αναλύονται οι θεωρητικές αρχές των αναλογικών και ψηφιακών εισόδων, της οδήγησης οθονών παράλληλου πρωτοκόλλου RGB, της διαχείρισης αισθητήρων αναλογίας μείγματος ευρέος φάσματος, της θεωρίας ελέγχου κλειστού βρόχου (PID) καθώς και των μηχανισμών μόνιμης αποθήκευσης και εξισορρόπησης φθοράς των μη πτητικών μνημών (NVS).

2.2 Ενσωματωμένα συστήματα σε εφαρμογές οχημάτων

Η σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία έχει μεταβεί από τα αμιγώς μηχανικά συστήματα σε σύνθετα Δικτυωμένα Ενσωματωμένα Συστήματα Ελέγχου (Networked Embedded Control Systems). Κεντρικό δομικό στοιχείο αποτελεί η Μονάδα Ελέγχου Κινητήρα (ECU), η οποία συλλέγει δεδομένα από αισθητήρες, εκτελεί πολύπλοκους αλγορίθμους και οδηγεί ενεργοποιητές (Actuators). Ιστορικά η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των πρώτων ηλεκτρονικών μονάδων γινόταν μέσω συνδέσεων σημείου-προς-σημείο (point-to-point), όπου η διασύνδεση κάθε ανεξάρτητης συσκευής ή η μεταφορά κάθε ξεχωριστού σήματος απαιτούσε αποκλειστική, αυτόνομη καλωδίωση, γεγονός που αύξανε δραματικά το βάρος και την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης[1],[5].

Η υιοθέτηση των σειριακών διαύλων επικοινωνίας επέτρεψε την αποδοτική δικτύωση των επιμέρους υποσυστημάτων, την πρακτική εφαρμογή καταμεμημένου ελέγχου και τη δραστική διευκόλυνση των διαδικασιών διάγνωσης βλαβών[1],[5]. Στο εξειδικευμένο περιβάλλον του μηχανοκίνητου αθλητισμού, η προβολή κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας και η δυναμική βελτιστοποίηση της απόδοσης του οχήματος σε πραγματικό χρόνο καθίστανται ζωτικής σημασίας[4].

Καθώς οι εργοστασιακές μονάδες ενδείξεων συχνά υπολείπονται σε δυνατότητες παραμετροποίησης και αδυνατούν να προβάλουν εξειδικευμένες αγωνιστικές παραμέτρους, αναπτύσσονται προσαρμοσμένες λύσεις ψηφιακών πινάκων οργάνων (software-defined instrument clusters). Οι λύσεις αυτές αντικαθιστούν πλήρως τα συμβατικά όργανα, ενσωματώνοντας δεδομένα προερχόμενα από την ECU, ανεξάρτητους αισθητήρες και μονάδες δορυφορικής πλοήγησης (GNSS) σε ένα κεντρικό ενσωματωμένο σύστημα προβολής (dashboard display)[42].

2.3 Μικροελεγκτές ESP32-S3 και STM32

Στα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα, η χρήση ετερογενών αρχιτεκτονικών επεξεργασίας επιτρέπει τον βέλτιστο καταμερισμό του υπολογιστικού φόρτου και την εξειδίκευση των εργασιών. Δύο από τις πλέον διαδεδομένες αρχιτεκτονικές μικροελεγκτών που καλύπτουν συμπληρωματικές ανάγκες είναι η οικογένεια ESP32-S3 και η σειρά STM32.

Το System-on-Chip (SoC) ESP32-S3 της Espressif αποτελεί έναν προηγμένο μικροελεγκτή, εξοπλισμένο με διπύρηνο επεξεργαστή αρχιτεκτονικής Xtensa 32-bit LX7, ικανό να λειτουργεί σε συχνότητες έως 240 MHz[15]. Η εσωτερική του αρχιτεκτονική περιλαμβάνει αγωγό εντολών 5 σταδίων (five-stage pipeline), μονάδα κινητής υποδιαστολής (FPU) απλής ακρίβειας και ειδικές επεκτάσεις συνόλου εντολών (PIE) για την αποδοτική εκτέλεση αλγορίθμων επεξεργασίας ψηφιακών σημάτων (DSP)[15]. Σε επίπεδο μνήμης, ενσωματώνει 512 KB SRAM και υποστηρίζει την προσθήκη γρήγορης εξωτερικής μνήμης PSRAM (π.χ. μεγέθους 8 MB) μέσω πρωτοκόλλου Octal SPI[15]. Η ύπαρξη εκτεταμένης μνήμης RAM, σε συνδυασμό με την εσωτερική κρυφή μνήμη (cache) δεδομένων και εντολών, αποτελεί θεμελιώδη απαίτηση για τη διαχείριση τεχνικών διπλής ενδιάμεσης μνήμης (double buffering), οι οποίες είναι απαραίτητες για την ομαλή απεικόνιση γραφικών σε οθόνες υψηλής ανάλυσης.

Από την άλλη πλευρά, η οικογένεια μικροελεγκτών STM32, και ειδικότερα μοντέλα όπως ο STM32F401RE της STMicroelectronics, βασίζεται στην αρχιτεκτονική πυρήνα ARM Cortex-M4 32-bit RISC και λειτουργεί σε συχνότητες της τάξης των 84 MHz[31]. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής ενσωματώνει μονάδα κινητής υποδιαστολής (FPU) και μονάδα προστασίας μνήμης (MPU)[31]. Ένα βασικό πλεονέκτημα της εν λόγω αρχιτεκτονικής είναι ο επιταχυντής μνήμης ART (Adaptive Real-Time memory accelerator), ο οποίος επιτρέπει την εκτέλεση εντολών απευθείας από τη μνήμη Flash με μηδενικούς κύκλους αναμονής. Χάρη στην απόλυτα προβλέψιμη χρονική τους απόκριση και το πλούσιο σύστημα περιφερειακών, οι μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής Cortex-M4 ενδείκνυνται για τη δημιουργία κόμβων συλλογής δεδομένων (data acquisition). Αναλαμβάνουν την ταχεία και αξιόπιστη ανάγνωση αναλογικών αισθητήρων μέσω μετατροπέων ADC (12-bit) και διαχειρίζονται προηγμένους χρονιστές (timers) για την ακριβή μέτρηση σημάτων, εξασφαλίζοντας τον αυστηρό χρονισμό που απαιτείται σε σύγχρονα συστήματα οχημάτων[31].

2.4 Λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου και FreeRTOS

Ο σχεδιασμός ενσωματωμένων συστημάτων ελέγχου διαφέρει από τα τυπικά υπολογιστικά συστήματα λόγω της απαίτησης ικανοποίησης αυστηρών χρονικών περιορισμών (deadlines). Τα συστήματα κατηγοριοποιούνται σε "αυστηρού" (hard) και "χαλαρού" (soft) πραγματικού χρόνου[7]. Στα αυστηρά συστήματα, η αποτυχία εκτέλεσης μιας διεργασίας εντός του προκαθορισμένου χρόνου ισοδυναμεί με απόλυτη αποτυχία ολόκληρου του συστήματος (π.χ. ενεργοποίηση αερόσακου)[7]. Στα χαλαρά συστήματα η υπέρβαση της προθεσμίας απλώς μειώνει την ποιότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων, χωρίς καταστροφικές συνέπειες[7]. Το FreeRTOS είναι ένα λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου βελτιστοποιημένο για μικροελεγκτές, το οποίο χρησιμοποιεί χρονοπρογραμματισμό προτίμησης σταθερής προτεραιότητας (Fixed Priority Pre-emptive Scheduling)[7]. Σε αυτό το μοντέλο, ο πυρήνας (kernel) του FreeRTOS εγγυάται ότι η διεργασία με την υψηλότερη προτεραιότητα που βρίσκεται σε κατάσταση ετοιμότητας (Ready state) θα είναι πάντα αυτή που θα εκτελείται (Running state), προκαταλαμβάνοντας (pre-empting) άμεσα την τρέχουσα διεργασία εάν είναι αναγκαίο[7]. Μια διεργασία στο FreeRTOS μπορεί να βρίσκεται σε τέσσερις καταστάσεις: Running (εκτελείται), Ready (έτοιμη για εκτέλεση αλλά σε αναμονή CPU), Blocked (αποκλεισμένη σε αναμονή κάποιου χρονικού ή εξωτερικού συμβάντος, π.χ. διακοπή) και Suspended (σε αναστολή). Για τη διαχείριση πόρων και την αποφυγή συγκρούσεων χρησιμοποιούνται μηχανισμοί όπως οι Ουρές (Queues) για ανταλλαγή δεδομένων, οι Σηματοφορείς για συγχρονισμό διεργασιών με διακοπές (ISRs), και τα Mutexes, τα οποία εξασφαλίζουν αποκλειστική πρόσβαση σε κοινόχρηστους πόρους (π.χ. I2C/SPI)[7].

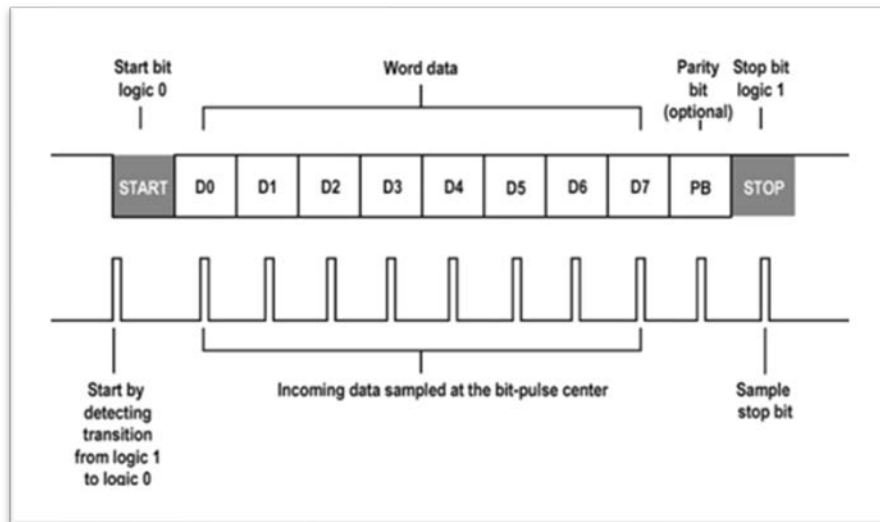
2.5 UART και σειριακή επικοινωνία

Το πρωτόκολλο UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) αποτελεί έναν από τους πιο θεμελιώδεις και διαδεδομένους τρόπους ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας στα ψηφιακά και ενσωματωμένα συστήματα. Σε αντίθεση με τις σύγχρονες (synchronous) επικοινωνίες, στο πρότυπο UART απουσιάζει το κοινό σήμα χρονισμού (clock signal) μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Για τον λόγο αυτό, προκειμένου να καταστεί δυνατή η σωστή αποκωδικοποίηση των δεδομένων, οι δύο συσκευές πρέπει να έχουν αυστηρά προσυμφωνημένο ρυθμό μετάδοσης (baud rate) όπως για παράδειγμα 9600 bps ή 115200 bps, ο οποίος παράγεται από μια εσωτερική γεννήτρια ρυθμού (baud rate generator)[41].

Η δομή του υλικού ενός ελεγκτή UART περιλαμβάνει τον πομπό (transmitter), τον δέκτη (receiver), τη γεννήτρια ρυθμού baud και ένα κύκλωμα ελέγχου[41]. Κατά τη μετάδοση, ο πομπός μετατρέπει τα παράλληλα δεδομένα του μικροελεγκτή σε σειριακή μορφή, ενώ ο δέκτης εκτελεί την αντίστροφη διαδικασία. Η μεταφορά των πληροφοριών στη γραμμή οργανώνεται σε διακριτά πακέτα, τα λεγόμενα πλαίσια δεδομένων (data frames). Κάθε πλαίσιο περιέχει τέσσερα βασικά στοιχεία, τα οποία εξασφαλίζουν τον συγχρονισμό και την ακεραιότητα της πληροφορίας[41]:

- **Bit Εκκίνησης (Start bit):** Στην κατάσταση αδράνειας (idle state), η γραμμή μεταφοράς διατηρείται συνεχώς σε υψηλή λογική στάθμη (High). Το bit εκκίνησης σηματοδοτεί την έναρξη του πλαισίου, αναγκάζοντας τη γραμμή να μεταβεί σε λογικό 0 (Low)[41]. Αυτή η μετάβαση ειδοποιεί τον δέκτη να ξεκινήσει τη δειγματοληψία των εισερχόμενων παλμών.
- **Bits Δεδομένων (Data bits):** Αμέσως μετά ακολουθεί το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων (payload). Το μέγεθος των δεδομένων είναι προγραμματιζόμενο και κυμαίνεται συνήθως από 5 έως 9 bits (συνηθέστερα 8 bits), ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε επικοινωνίας[41].
- **Bit Ισοτιμίας (Parity bit):** Πρόκειται για ένα προαιρετικό bit που τοποθετείται μετά τα δεδομένα και χρησιμοποιείται ως ένας απλός μηχανισμός ανίχνευσης σφαλμάτων. Μπορεί να διαμορφωθεί ως Άρτια (Even) ή Περιττή (Odd) ισοτιμία, επιτρέποντας στον δέκτη να ελέγξει αν το πακέτο αλλοιώθηκε κατά τη μετάδοση[41].
- **Bit(s) Λήξης (Stop bit):** Το πλαίσιο ολοκληρώνεται υποχρεωτικά με την επιστροφή της γραμμής σε υψηλή λογική στάθμη (λογικό 1). Το stop bit έχει συνήθως μήκος 1 bit, αλλά μπορεί να διαμορφωθεί και ως 1.5 ή 2 bits, σηματοδοτώντας το οριστικό τέλος της μετάδοσης του τρέχοντος χαρακτήρα[41].

Βασικό πλεονέκτημα του πρωτοκόλλου UART αποτελεί η απλότητα υλοποίησής του και η εξοικονόμηση υλικών πόρων στον μικροελεγκτή, καθώς απαιτεί αποκλειστικά δύο ακροδέκτες (έναν για εκπομπή TX και έναν για λήψη RX) προκειμένου να επιτευχθεί πλήρως αμφίδρομη (full-duplex) επικοινωνία[41].



Σχήμα 2-1. Τυπική δομή πακέτου δεδομένων του ασύγχρονου σειριακού πρωτοκόλλου UART [41]

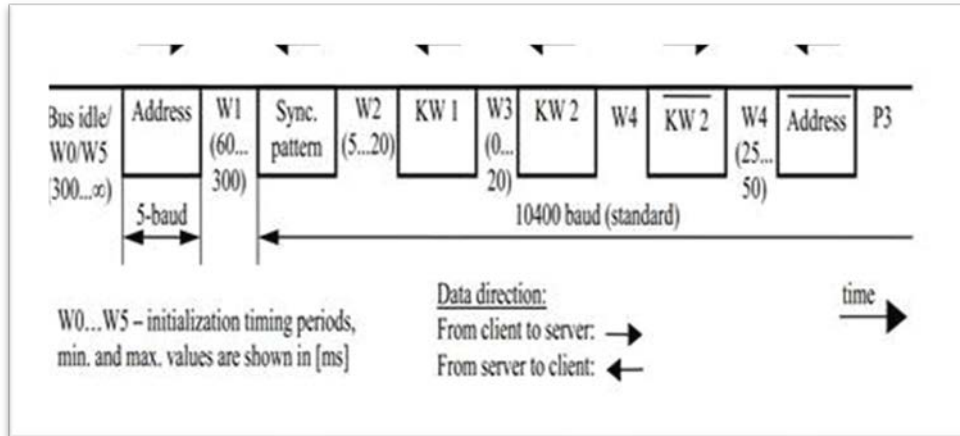
2.6 K-line, ISO 9141 και DS2 πρωτόκολλο

Το πρότυπο K-line αποτελεί μια καθιερωμένη σειριακή διεπαφή επικοινωνίας και οχηματικής διάγνωσης, η οποία τυποποιήθηκε αρχικά μέσω του προτύπου ISO 9141. Λειτουργεί ως ένας αμφίδρομος (bidirectional) δίαυλος μονού αγωγού (single-wire bus), με επίπεδα τάσης αναφοράς να εξαρτώνται άμεσα από την τάση της μπαταρίας του οχήματος (V_{bat} τυπικού εύρους 12V έως 14.4V)[48]. Σε λογικό επίπεδο, το σύστημα βασίζεται σε ασύμμετρη οδήγηση: η λογική κατάσταση «0» (Dominant) αντιστοιχεί σε τάση χαμηλότερη του 20% της V_{bat} , ενώ η λογική κατάσταση «1» (Recessive) αντιστοιχεί σε τάση υψηλότερη του 80% της V_{bat} [48]. Για τη γεφύρωση των λογικών επιπέδων χαμηλής τάσης (TTL) ενός μικροελεγκτή με τα υψηλά επίπεδα τάσης του οχήματος, απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων πομποδεκτών (transceivers), όπως το ολοκληρωμένο L9637D. Τέτοιου είδους ολοκληρωμένα ενσωματώνουν απαραίτητες λειτουργίες προστασίας από υπερτάσεις (π.χ. έως 36V), βραχυκυκλώματα και θερμική υπερφόρτωση[17].

Ένα κρίσιμο θεωρητικό χαρακτηριστικό της τοπολογίας του μονού αγωγού είναι ότι κάθε byte που εκπέμπεται από τον ελεγκτή (TX), οδηγείται αναπόφευκτα πίσω στη θύρα λήψης (RX) ως ηλεκτρική ανάκλαση (echo)[40]. Συνεπώς, η επιτυχής επικοινωνία προϋποθέτει την ανάπτυξη κατάλληλων ρουτινών λογισμικού για το φιλτράρισμα αυτών των ανακλάσεων[40]. Το πρωτόκολλο BMW DS2 (Diagnostic System 2) αποτελεί ένα ιδιοταγές (proprietary) πρωτόκολλο επικοινωνίας, το οποίο βασίζεται στο φυσικό επίπεδο του K-line και χρησιμοποιείται ευρέως σε προγενέστερες γενιές μονάδων ελέγχου κινητήρα (ECU). Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται ασύγχρονα με σταθερό ρυθμό 9600 baud, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση πλαισίου 8E1 (8 data bits, Even parity, 1 stop bit)[40]. Η δομή του διαγνωστικού πακέτου ακολουθεί αυστηρή ιεραρχία, περιλαμβάνοντας το αναγνωριστικό της συσκευής-στόχου (device ID), το συνολικό μήκος του μηνύματος, το ωφέλιμο φορτίο δεδομένων (payload) και, τέλος, έναν μηχανισμό αθροίσματος ελέγχου XOR (XOR checksum) για την επαλήθευση της ακεραιότητας των ληφθέντων δεδομένων[40].

Παρά τον σχετικά χαμηλό ρυθμό μετάδοσης των 9600 baud, η θεωρητική ανάλυση του πρωτοκόλλου καταδεικνύει ότι, μέσω ενός βελτιστοποιημένου κύκλου διαδοχικών αιτημάτων (polling), το ωφέλιμο εύρος ζώνης (bandwidth) είναι επαρκές για την ανάγνωση των κρίσιμων δυναμικών παραμέτρων του

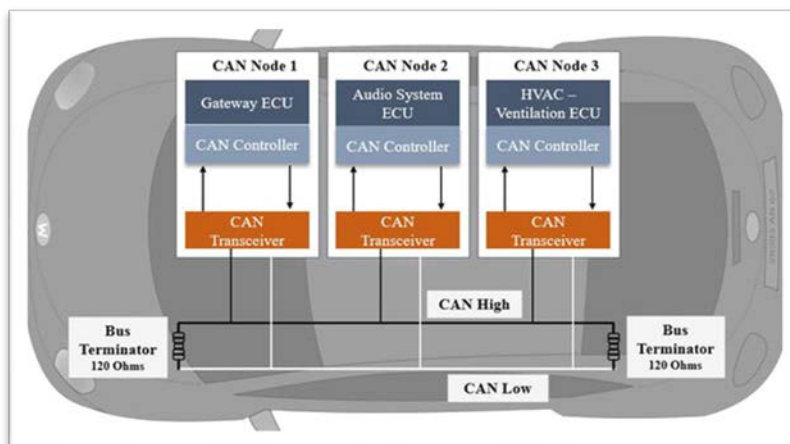
κινητήρα (στροφές, θέσεις ενεργοποιητών, θερμοκρασίες). Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την πλήρη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας επαρκώς γρήγορη ανανέωση των ενδείξεων χωρίς αισθητή καθυστέρηση στην απόκριση. Η θεωρητική μελέτη και η τελική επιλογή του συγκεκριμένου ιδιοταγούς πρωτοκόλλου κατέστη απαραίτητη για την παρούσα διπλωματική εργασία, δεδομένου ότι αποτελούσε το αποκλειστικό υποστηριζόμενο πρότυπο επικοινωνίας της εργοστασιακής μονάδας ελέγχου (ECU) του οχήματος το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως πλατφόρμα εγκατάστασης και δοκιμών του συστήματος.



Σχήμα 2-2. Δομή επικοινωνίας K-LINE [48]

2.7 CAN bus και TWAI

Το πρωτόκολλο CAN bus (Controller Area Network) αποτελεί έναν πολυπλεκόμενο (multiplexed) δίαυλο επικοινωνίας στον οποίο μπορούν να συνδεθούν παράλληλα πολλαπλές συσκευές (όπως ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου, αισθητήρες και ενεργοποιητές). Το θεμελιώδες πλεονέκτημά του είναι ότι χρησιμοποιεί ένα δίκτυο αποκλειστικά δύο καλωδίων, αντικαθιστώντας τις παραδοσιακές και πολύπλοκες καλωδιώσεις σημείου-προς-σημείο (point-to-point). Αυτή η αρχιτεκτονική επιτυγχάνει τεράστια εξοικονόμηση πόρων, καθώς μειώνει δραστικά τον όγκο, το βάρος και την πολυπλοκότητα της καλωδίωσης μέσα στο όχημα[45].



Σχήμα 2-3. Διάγραμμα επικοινωνίας CAN Bus μεταξύ ηλεκτρονικών μονάδων ενός οχήματος [1]

Το πρωτόκολλο χρησιμοποιεί ένα διαφορικό σύστημα μετάδοσης (differential signaling) για τη μεταφορά δεδομένων μέσω δύο αγωγών, των CAN High (CAN_H) και CAN Low (CAN_L)[1],[5]. Η βασική αρχή λειτουργίας του σήματος στηρίζεται στη διαφορά τάσης μεταξύ των δύο αγωγών ($V_{diff} = V_{CAN_H} - V_{CAN_L}$), γεγονός που επιτρέπει την αναγνώριση των λογικών καταστάσεων ανεξάρτητα από την απόλυτη τάση ως προς τη γείωση.

Επίπεδα Τάσης και Λογικές Καταστάσεις Στο φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου, οι λογικές καταστάσεις καθορίζονται από τις μεταβολές γύρω από μια τάση ηρεμίας[32]:

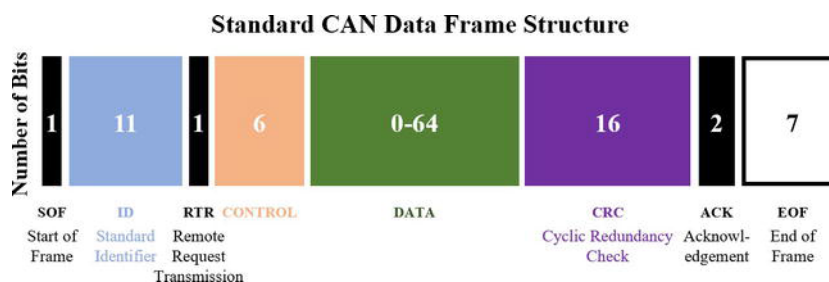
- **Κατάσταση Ηρεμίας (Recessive - Λογικό 1):** Όταν δεν μεταδίδονται δεδομένα, και οι δύο αγωγοί (CAN_H και CAN_L) βρίσκονται σε μια κοινή τάση ηρεμίας 2.5V. Σε αυτή την κατάσταση, η διαφορική τάση (V_{diff}) είναι 0V, δηλαδή στην κατάσταση ηρεμίας του διαύλου, η οποία αντιστοιχεί στο λογικό "1"[32].
- **Ενεργός Κατάσταση (Dominant - Λογικό 0):** Κατά τη μετάδοση δεδομένων (Dominant κατάσταση), ο πομποδέκτης μεταβάλλει τις τάσεις στους δύο αγωγούς κατά 2.5V προς αντίθετες κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, η τάση στον αγωγό CAN_H αυξάνεται στα 3.5V, ενώ η τάση στον αγωγό CAN_L μειώνεται στα 1.5V. Αυτή η μεταβολή δημιουργεί μια διαφορική τάση 2V ($3.5 - 1.5 = 2V$), η οποία αναγνωρίζεται από τους δέκτες ως το κυρίαρχο bit, δηλαδή λογικό "0"[32].

Πλεονεκτήματα Διαφορικού Σήματος και Ανοσία στο Θόρυβο: Η χρήση του διαφορικού σήματος προσφέρει εξαιρετική ανοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI), οι οποίες είναι έντονες στο περιβάλλον ενός οχήματος. Η προστασία αυτή επιτυγχάνεται μέσω δύο μηχανισμών:

1. **Ακύρωση Θορύβου Κοινού Τρόπου (Common Mode Rejection):** Εάν ένας εξωτερικός θόρυβος επηρεάσει το καλώδιο, θα προκαλέσει την ίδια ακριβώς μεταβολή τάσης και στους δύο αγωγούς ταυτόχρονα. Επειδή ο δέκτης λαμβάνει υπόψη μόνο τη *διαφορά* μεταξύ CAN_H και CAN_L, ο θόρυβος αυτός αυτοακυρώνεται και η διαφορική τάση των 0V ή 2V παραμένει σταθερή, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα της πληροφορίας[4].
2. **Μείωση Εκπομπών:** Οι αντίθετες μεταβολές τάσης στους δύο αγωγούς δημιουργούν μαγνητικά πεδία που αλληλοαναιρούνται, ελαχιστοποιώντας την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπει ο δίαυλος προς τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά συστήματα του οχήματος.

Για τη βέλτιστη απόδοση, ο δίαυλος απαιτεί τερματικές αντιστάσεις 120 Ω στα άκρα του, ώστε να αποφεύγονται οι αντανάκλασεις του σήματος και να διασφαλίζεται η γρήγορη επιστροφή των αγωγών στην τάση ηρεμίας των 2.5V[1],[32]. Για την περαιτέρω ενίσχυση αυτής της προστασίας, οι αγωγοί του CAN είναι πάντα συνεστραμμένο ζεύγος (twisted pair), ενώ σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο χρησιμοποιούνται ειδικά πηνία (common mode chokes) που παρουσιάζουν υψηλή σύνθετη αντίσταση στα σήματα θορύβου, επιτρέποντας μόνο στο διαφορικό σήμα των δεδομένων να διέλθει ανεπηρέαστο[4].

Δομή Μηνύματος (Πακέτου) και Ρόλος του CAN ID: Ένα τυπικό μήνυμα CAN απαρτίζεται από 8 βασικά μέρη: SOF (έναρξη), CAN ID, RTR, Control (μέγεθος δεδομένων), Data (ωφέλιμα δεδομένα 0-8 bytes), CRC (έλεγχος σφαλμάτων), ACK (επιβεβαίωση) και EOF (τέλος). Το πιο κρίσιμο στοιχείο είναι το αναγνωριστικό CAN ID (11 ή 29 bit). Επειδή το CAN είναι δίκτυο εκπομπής (broadcast) προς όλους τους κόμβους, το ID δεν δηλώνει τον παραλήπτη, αλλά την πηγή και την προτεραιότητα του μηνύματος. Σε περίπτωση ταυτόχρονης εκπομπής, το μήνυμα με τη μικρότερη αριθμητική τιμή ID κερδίζει τον δίαυλο (υψηλότερη προτεραιότητα), διασφαλίζοντας ότι τα πιο κρίσιμα δεδομένα του οχήματος δεν θα καθυστερήσουν ποτέ[1].



Σχήμα 2-4. Δομή πλαισίου δεδομένων CAN με τα βασικά πεδία μετάδοσης [1]

Ελεγκτής TWAI (Two-Wire Automotive Interface): Το TWAI είναι η εμπορική ονομασία που χρησιμοποιεί η κατασκευάστρια εταιρεία Espressif (για τους μικροελεγκτές της, όπως το ESP32) προκειμένου να περιγράψει τον ενσωματωμένο ελεγκτή επικοινωνίας CAN[15]. Στην πράξη, πρόκειται για έναν τυπικό ελεγκτή CAN, ο οποίος είναι πλήρως συμβατός με το βασικό πρότυπο CAN 2.0[15]. Λειτουργεί ακριβώς όπως οι κλασικοί ελεγκτές CAN, προσφέροντας την ίδια υψηλή αξιοπιστία και τους ίδιους μηχανισμούς διαχείρισης σφαλμάτων που απαιτούνται στα δίκτυα των οχημάτων.

2.8 GPS, NMEA και UBX (Αρχές Λειτουργίας και Προτόκολλα)

Η λήψη γεωγραφικής θέσης και ταχύτητας βασίζεται στην τεχνολογία των Παγκόσμιων Δορυφορικών Συστημάτων Πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems - GNSS). Ο όρος GNSS αποτελεί την «ομπρέλα» που περιλαμβάνει διάφορους αστερισμούς δορυφόρων, όπως το αμερικανικό GPS, το ρωσικό GLONASS, το ευρωπαϊκό Galileo και το κινεζικό BeiDou[22].

Αρχή Λειτουργίας και Σήματα: Η βασική αρχή λειτουργίας του συστήματος στηρίζεται στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του επίγειου δέκτη και ενός αριθμού δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά. Οι δορυφόροι εκπέμπουν συνεχώς σήματα που περιέχουν την ακριβή θέση τους και την ώρα εκπομπής. Ο δέκτης μετρά την καθυστέρηση άφιξης του σήματος και, γνωρίζοντας την ταχύτητα του φωτός, υπολογίζει την απόστασή του από κάθε δορυφόρο.

Για τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης θέσης (γεωγραφικό πλάτος, μήκος, υψόμετρο) και τον συγχρονισμό του ρολογιού του δέκτη, απαιτείται η λήψη σήματος από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους. Η ακρίβεια της μέτρησης εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ορατών δορυφόρων, την ισχύ του σήματος (SNR) και τη χρήση συστημάτων ενίσχυσης όπως το SBAS (WAAS, EGNOS), το οποίο διορθώνει σφάλματα που προκαλούνται από την ιονοσφαιρική καθυστέρηση[22].

Καταστάσεις Εκκίνησης και ο ρόλος του Αλμανάκ: Ένας κρίσιμος δείκτης απόδοσης είναι ο χρόνος μέχρι την πρώτη επιτυχή εύρεση θέσης (**Time-To-First-Fix - TTFF**). Η ταχύτητα αυτής της διαδικασίας εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα που έχει ο δέκτης στην προσωρινή του μνήμη[22]:

1. **Cold Start:** Ο δέκτης δεν έχει πρόσφατα δεδομένα θέσης ούτε διαθέτει το αλμανάκ (almanac). Το αλμανάκ αποτελεί ένα αρχείο δεδομένων που μεταδίδεται από τους δορυφόρους και περιέχει τις κατά προσέγγιση τροχιές (θέσεις) και την κατάσταση λειτουργίας όλων των δορυφόρων του αστερισμού. Χωρίς αυτό, ο δέκτης πρέπει να σαρώσει όλο το φάσμα για να εντοπίσει σήματα, διαδικασία που διαρκεί τυπικά 30 δευτερόλεπτα[22].
2. **Warm Start:** Ο δέκτης διαθέτει έγκυρο αλμανάκ αποθηκευμένο στη μνήμη του, το οποίο του επιτρέπει να γνωρίζει ποιους δορυφόρους είναι ορατοί, αλλά χρειάζεται νέα δεδομένα εφημερίδας (ephemeris) για τον ακριβή προσδιορισμό τους[22].

3. **Hot Start:** Ο δέκτης διαθέτει όλα τα απαραίτητα δεδομένα (αλμανάκ, εφημερίδα και ώρα) στη μνήμη backup, επιτυγχάνοντας Fix σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο[22].

Πρωτόκολλα Επικοινωνίας (NMEA και UBX): Μετά την επεξεργασία των δορυφορικών σημάτων, ο δέκτης εξάγει τα δεδομένα μέσω UART, χρησιμοποιώντας τυποποιημένα ή ιδιοταγή πρωτόκολλα[22].

- **NMEA 0183:** Είναι ένα πρότυπο ASCII που αποτελείται από «προτάσεις» (sentences). Οι σημαντικότερες για το σύστημα είναι η **RMC** (θέση και ταχύτητα), η **GGA** (ποιότητα Fix και υψόμετρο), η **VTG** (ταχύτητα εδάφους) και η **GSV** (πληροφορίες για τους ορατούς δορυφόρους και την ισχύ SNR)[4][22].
- **UBX Protocol:** Πρόκειται για ένα ιδιοταγές δυαδικό (binary) πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται από κατασκευαστές όπως η u-blox. Είναι σαφώς πιο αποδοτικό και συμπαγές σε σχέση με το ASCII πρότυπο NMEA. Σε θεωρητικό επίπεδο, τέτοιου είδους πρωτόκολλα αξιοποιούνται από τους μικροελεγκτές κατά τη φάση αρχικοποίησης για τη δυναμική διαμόρφωση (configuration) του δέκτη, επιτρέποντας τη ρύθμιση παραμέτρων όπως ο ρυθμός ανανέωσης των μετρήσεων (π.χ. 10 Hz) και το φίλτράρισμα των επιθυμητών μηνυμάτων[4],[22].

2.9 Αναλογικές και ψηφιακές είσοδοι

Η λήψη δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον ενός οχήματος απαιτεί τη διασύνδεση του υπολογιστικού συστήματος με διάφορους τύπους αισθητήρων και διακοπών. Οι είσοδοι αυτές χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τις αναλογικές και τις ψηφιακές.

Αναλογικοί Αισθητήρες και η διαδικασία ADC: Οι αναλογικοί αισθητήρες είναι συσκευές που μετρούν ένα φυσικό μέγεθος (όπως η πίεση ή η θερμοκρασία) και παράγουν ένα συνεχές ηλεκτρικό σήμα, συνήθως με τη μορφή μεταβαλλόμενης τάσης εξόδου η οποία σχετίζεται άμεσα με τη μέτρηση. Σε αντίθεση με έναν διακόπτη που είναι απλώς «ανοικτός» ή «κλειστός», ένας αναλογικός αισθητήρας μπορεί να δώσει οποιαδήποτε τιμή τάσης μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος λειτουργίας (συνήθως από 0% έως 100% της τάσης τροφοδοσίας του)[9].

Ένα χαρακτηριστικό θεωρητικό παράδειγμα αποτελούν οι αναλογικοί αισθητήρες απόλυτης πίεσης πολλαπλής εισαγωγής (MAP - Manifold Absolute Pressure). Πρόκειται συνήθως για πιεζοαντιστατικούς μετατροπείς (piezoresistive transducers) οι οποίοι ενσωματώνουν εσωτερικό κύκλωμα ενίσχυσης σήματος. Οι αισθητήρες αυτοί μετρούν αποκλειστικά την ασκούμενη πίεση (π.χ. σε kPa) και παράγουν μια αναλογική τάση εξόδου που αυξάνεται γραμμικά με αυτή, κινούμενη σε ένα προκαθορισμένο εύρος (π.χ. από 0.2V έως 4.8V ανάλογα με τις προδιαγραφές του εκάστοτε κατασκευαστή)[21].

Επειδή οι μικροελεγκτές είναι ψηφιακές συσκευές και επεξεργάζονται αποκλειστικά διακριτές αριθμητικές τιμές, η συνεχής αυτή τάση πρέπει να μετατραπεί σε ψηφιακή πληροφορία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός Αναλογικο-Ψηφιακού Μετατροπέα (Analog-to-Digital Converter - ADC). Για παράδειγμα, ένας μετατροπέας ανάλυσης 12-bit «τεμαχίζει» το εύρος της τάσης σε 4096 διακριτά βήματα (τιμές από 0 έως 4095)[9].

Σε περιπτώσεις όπου το εύρος εξόδου του αισθητήρα (ή του συστήματος, όπως τα 12V-14.4V μιας μπαταρίας) υπερβαίνει τη μέγιστη επιτρεπτή τάση εισόδου των ακροδεκτών του μικροελεγκτή (π.χ. τα 3.3V), απαιτείται η προσαρμογή του σήματος. Η προσαρμογή αυτή υλοποιείται συνήθως μέσω διαιρετών τάσης με αντιστάσεις, ώστε η τάση να περιοριστεί με ασφάλεια στο μετρήσιμο εύρος. Στη

συνέχεια, ο μικροελεγκτής αναλαμβάνει τη διαρκή ανάγνωση αυτών των σημάτων, μετατρέποντας αλγοριθμικά τις ψηφιακές τιμές του ADC πίσω σε πραγματικά φυσικά μεγέθη μέσω γραμμικών εξισώσεων, τα οποία είναι έτοιμα προς απεικόνιση ή περαιτέρω επεξεργασία.

Ψηφιακές Είσοδοι: Οι ψηφιακές εισοδοί αναγνωρίζουν μόνο δύο διακριτές καταστάσεις: την ύπαρξη ή την απουσία τάσης (ON/OFF), που αντιστοιχούν στις λογικές τιμές "1" ή "0" (HIGH ή LOW). Αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανάγνωση μηχανικών διακοπών, ψηφιακών αισθητήρων ή πλήκτρων πλοήγησης.

Για την απλοποίηση του υλικού (hardware) κατά την ανάγνωση αυτών των εισόδων, οι σύγχρονοι μικροελεγκτές διαθέτουν προγραμματιζόμενες εσωτερικές αντιστάσεις ανύψωσης (internal pull-up resistors)[31]. Με αυτόν τον τρόπο, ο ακροδέκτης διατηρείται μόνιμα σε λογικό "1" (HIGH), μέχρι ο χρήστης να πατήσει το πλήκτρο. Κατά την πίεση, το κύκλωμα κλείνει προς τη γείωση και το σήμα μεταβάλλεται σε λογικό "0" (LOW), ειδοποιώντας άμεσα το λογισμικό για την ενέργεια[31].

2.10 Γραφική απεικόνιση, LVGL και RGB565

Στα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα, η οπτική επικοινωνία με τον χρήστη επιτυγχάνεται συχνά μέσω έγχρωμων οθονών TFT LCD. Για την ταχεία και αποδοτική μεταφορά των γραφικών δεδομένων από τον μικροελεγκτή προς την οθόνη, χρησιμοποιούνται ευρέως παράλληλες διεπαφές. Μία από τις πλέον διαδεδομένες μορφές ψηφιακής μετάδοσης σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους είναι το πρωτόκολλο χρώματος RGB565.

Αρχή Λειτουργίας και Δομή του RGB565: Το RGB565 αποτελεί ένα πρότυπο κωδικοποίησης χρώματος το οποίο χρησιμοποιεί 16 bit (2 bytes) για την αναπαράσταση κάθε εικονοστοιχείου (pixel), σε αντίθεση με την πλήρη παλέτα των 24 bit (RGB888). Ο διαχωρισμός της πληροφορίας στα 16 bit υλοποιείται ως εξής[26]:

- **Κόκκινο (Red):** Χρησιμοποιούνται 5 bit, προσφέροντας 32 διαβαθμίσεις φωτεινότητας.
- **Πράσινο (Green):** Χρησιμοποιούνται 6 bit, προσφέροντας 64 διαβαθμίσεις. Επιλέγεται μεγαλύτερη ανάλυση στο πράσινο χρώμα διότι το ανθρώπινο μάτι είναι από τη φύση του πιο ευαίσθητο στο συγκεκριμένο φάσμα.
- **Μπλε (Blue):** Χρησιμοποιούνται 5 bit, προσφέροντας 32 διαβαθμίσεις.

Συνολικά, αυτός ο συνδυασμός ($32 \times 64 \times 32$) επιτρέπει την ταυτόχρονη απεικόνιση 65.536 διαφορετικών χρωμάτων (65K colors), γεγονός που παρέχει επαρκές βάθος χρώματος και εξαιρετική ποιότητα εικόνας[26].

Παράλληλη Διασύνδεση Υλικού (Hardware Interface): Σε επίπεδο φυσικού επιπέδου, η ροή των δεδομένων προς έναν ελεγκτή παράλληλης οθόνης συντονίζεται αυστηρά από τέσσερα κρίσιμα σήματα ελέγχου[26]:

- **PCLK (Pixel Clock):** Το βασικό ρολόι συγχρονισμού. Σε κάθε παλμό αυτού του ρολογιού, ένα νέο εικονοστοιχείο (16-bit) μεταφέρεται από τον ελεγκτή στην οθόνη.
- **HSYNC (Horizontal Sync):** Το σήμα οριζόντιου συγχρονισμού, το οποίο ενημερώνει τον ελεγκτή της οθόνης ότι ολοκληρώθηκε η μεταφορά μιας γραμμής (row) και πρέπει να μεταβεί στην αρχή της επόμενης.
- **VSYNC (Vertical Sync):** Το σήμα κάθετου συγχρονισμού, το οποίο σηματοδοτεί ότι ολοκληρώθηκε η σχεδίαση όλης της εικόνας (frame) και ο δείκτης πρέπει να επιστρέψει στην κορυφή της οθόνης.

- **DE (Data Enable):** Το σήμα ενεργοποίησης, το οποίο επιβεβαιώνει ότι τα δεδομένα που βρίσκονται στον δίαυλο τη δεδομένη στιγμή είναι έγκυρα και πρέπει να απεικονιστούν, αγνοώντας τις καταστάσεις ηρεμίας κατά τη διάρκεια των χρονικών κενών ("porches") των σημάτων HSYNC και VSYNC.

Διαχείριση Μνήμης και Βιβλιοθήκες Γραφικών: Παράλληλα με το υλικό, η χρήση του RGB565 μειώνει ακριβώς στο μισό τις απαιτήσεις σε μνήμη RAM και εύρος ζώνης (bandwidth) σε σχέση με το RGB888. Το απαιτούμενο μέγεθος μνήμης για ένα πλήρες καρτέ υπολογίζεται θεωρητικά ως $\text{Πλάτος} * \text{Ύψος} * 2\text{bytes}$. Αυτή η εξοικονόμηση καθιστά εφικτή την ανάπτυξη προηγμένων γραφικών διεπαφών χρήστη (GUI) μέσω ισχυρών λογισμικών ανοιχτού κώδικα, όπως η βιβλιοθήκη LVGL (Light and Versatile Graphics Library)[38]. Τέτοια συστήματα επιτρέπουν την εφαρμογή τεχνικών όπως η «διπλή ενδιάμεση μνήμη» (double buffering). Με την τεχνική αυτή, ο επεξεργαστής σχεδιάζει το επόμενο καρτέ σε μια κρυφή περιοχή της μνήμης, ενώ ταυτόχρονα προβάλλεται ο ενεργός πίνακας στην οθόνη[38]. Για τη βελτιστοποίηση του ρυθμού ανανέωσης και την αποτροπή υπερφόρτωσης του διαύλου μνήμης, αξιοποιείται συμπληρωματικά η τεχνική της ενδιάμεσης μνήμης αναπήδησης (Bounce Buffer)[15]. Το σύστημα δεσμεύει έναν μικρό, ταχύτατο ενδιάμεσο χώρο στην εσωτερική μνήμη. Μέσω του Ελεγκτή Άμεσης Πρόσβασης στη Μνήμη (DMA), τα δεδομένα μεταφέρονται τμηματικά από την κύρια μνήμη προς την οθόνη στο παρασκήνιο, χωρίς να απασχολείται ο κεντρικός επεξεργαστής (CPU)[15]. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η επίτευξη ομαλής κίνησης, απαλλαγμένης από το φαινόμενο της παραμόρφωσης και του «σκισίματος» της εικόνας (screen tearing).

2.11 Wideband Controller και αισθητήρας οξυγόνου BOSCH LSU 4.9

Η ακριβής μέτρηση του μείγματος αέρα-καυσίμου είναι ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη λειτουργία και τον έλεγχο των εκπομπών του κινητήρα. Σε αυτό το πλαίσιο, θεμελιώδη ρόλο διαδραματίζει το στοιχειομετρικό μείγμα (stoichiometric ratio). Πρόκειται για την τέλεια αναλογία (perfect matching) μάζας καυσίμου και οξυγόνου, κατά την οποία υπάρχει ακριβώς η απαιτούμενη ποσότητα οξυγόνου για την πλήρη καύση όλου του καυσίμου, χωρίς να περισσεύει αέρας ή άκαυστο καύσιμο. Σε αυτή την ιδανική κατάσταση, ο συντελεστής περίσσειας αέρα (λάμδα) ορίζεται ως μονάδα ($\lambda=1$)[44], ενώ για τους κοινούς βενζινοκινητήρες η αντίστοιχη στοιχειομετρική αναλογία (Air-Fuel Ratio - AFR) ισούται σταθερά με 14.7.

Οι συμβατικοί αισθητήρες οξυγόνου (narrowband), οι οποίοι βασίζονται στην εξίσωση Nernst, παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι το σήμα εξόδου τους φτάνει ταχύτατα σε κορεσμό (saturation) σε τιμές εκτός ενός πολύ στενού εύρους (περίπου 0.95 έως 1.05)[44]. Για την υπέρβαση αυτού του περιορισμού, ιδίως σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης που απαιτούν ακριβή μέτρηση σε πλούσια ή πολύ φτωχά μείγματα, χρησιμοποιούνται αμπερομετρικοί ευρυζωνικοί (wideband) αισθητήρες[44]. Χαρακτηριστικό βιομηχανικό πρότυπο αποτελεί ο αισθητήρας BOSCH LSU 4.9, ο οποίος επιτρέπει τη συνεχή και γραμμική μέτρηση της αναλογίας σε ένα τεράστιο εύρος, από $\lambda=0.65$ έως και τα επίπεδα του καθαρού ατμοσφαιρικού αέρα[18].

Η τεχνολογία διπλού κελιού (Dual Cell) του BOSCH LSU 4.9: Ο αισθητήρας LSU 4.9 αποτελεί έναν σύγχρονο επίπεδο (planar) αισθητήρα ζιρκονίας (ZrO_2)[18]. Η κατασκευή του βασίζεται στη μέθοδο της υψηλής θερμοκρασίας συν-ψημένης κεραμικής (HTCC), γεγονός που του προσδίδει μικρή θερμική μάζα, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και ταχύτερο χρόνο προθέρμανσης σε σχέση με παλαιότερους αισθητήρες[44].

Σε επίπεδο λειτουργίας, πρόκειται για έναν αισθητήρα διπλού κελιού (dual cell), ο οποίος απαρτίζεται από ένα κελί άντλησης (pumping cell) και ένα κελί αναφοράς/μέτρησης (Nernst/sensing cell)[44].

Μέσω ενός κυκλώματος ελέγχου ανατροφοδότησης (feedback controller), το σύστημα αντλεί ηλεκτροχημικά ιόντα οξυγόνου προς (σε φτωχά μείγματα) ή από (σε πλούσια μείγματα) το κελί μέτρησης, προσπαθώντας διαρκώς να διατηρήσει το δυναμικό Nernst σταθερό στο στοιχειομετρικό σημείο ($\lambda=1$)[44]. Το ρεύμα που απαιτείται για αυτή την άντληση (pumping current) είναι γραμμικά ανάλογο της συγκέντρωσης του οξυγόνου στα καυσαέρια, παρέχοντας έτσι το ακριβές σήμα μέτρησης[44].

Λόγω της ανάγκης για αυστηρή θερμοκρασιακή σταθερότητα, ο αισθητήρας διαθέτει ενσωματωμένο θερμαντήρα (heater), ο οποίος πρέπει να ελέγχεται διαρκώς ώστε η θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού να παραμένει στους $\sim 780^{\circ}\text{C}$. Εξαιτίας αυτής της ηλεκτροχημικής και θερμικής πολυπλοκότητας, ο αισθητήρας δεν είναι δυνατόν να διαβαστεί ως μια απλή αναλογική τάση από έναν μικροελεγκτή. Απαιτείται απαραίτητως η χρήση ενός εξειδικευμένου ελεγκτή (Wideband Controller), ο οποίος αναλαμβάνει αποκλειστικά τον έλεγχο θέρμανσης και την αμπερομετρική ανάγνωση, ψηφιοποιώντας τα δεδομένα για να τα μεταδώσει στη συνέχεια μέσω ψηφιακών διαύλων (π.χ. CAN bus) στην κύρια μονάδα ελέγχου[18].



Εικόνα 2-1. Αισθητήρας οξυγόνου Bosch LSU 4.9 [18]

2.12 Boost solenoid, PWM και PID έλεγχος

Η ρύθμιση της πίεσης υπερπλήρωσης (boost pressure) σε υπερτροφοδοτούμενους κινητήρες επιτυγχάνεται ηλεκτρομηχανικά μέσω του ελέγχου μιας αναλογικής ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας (boost solenoid / wastegate actuator). Επειδή οι μικροελεγκτές παράγουν ψηφιακά σήματα (διακριτές καταστάσεις 0 ή 1), η οδήγηση τέτοιων αναλογικών επαγωγικών φορτίων βασίζεται στην τεχνική της Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμού (Pulse Width Modulation - PWM)[6].

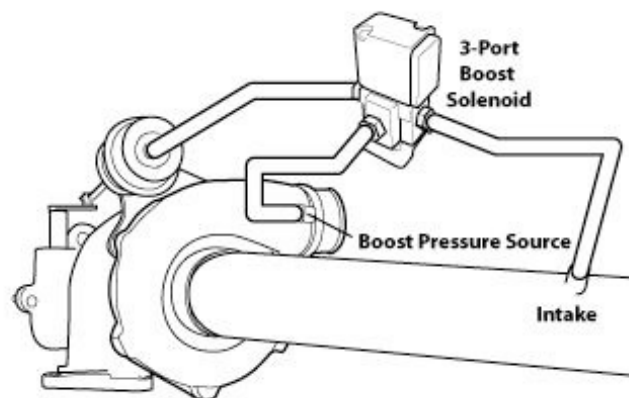
Το σήμα PWM είναι ένα ψηφιακό τετραγωνικό σήμα σταθερής συχνότητας, του οποίου μεταβάλλεται δυναμικά ο κύκλος εργασίας (duty cycle). Ο κύκλος εργασίας εκφράζει το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο το σήμα βρίσκεται σε υψηλή στάθμη (ON) έναντι της συνολικής του περιόδου. Μεταβάλλοντας το duty cycle (π.χ. από 0% έως 100%), το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει τη μέση τάση που εφαρμόζεται στο πηνίο της βαλβίδας, ελέγχοντας συνεπώς με απόλυτη ακρίβεια το ποσοστό ανοίγματός της[6].

Για τον καθορισμό του ιδανικού κύκλου εργασίας (duty cycle) εφαρμόζονται δύο θεμελιώδεις θεωρίες ελέγχου:

- **Έλεγχος Ανοιχτού Βρόχου (Open-Loop):** Η μονάδα ελέγχου εξάγει ένα προκαθορισμένο ποσοστό λειτουργίας βασισμένη σε πολυδιάστατους χάρτες, οι οποίοι συσχετίζουν συνήθως

τις στροφές του κινητήρα και το φορτίο. Σε αυτή τη λειτουργία εμπρόσθιας τροφοδότησης (feedforward), το σύστημα δρα προβλεπτικά, χωρίς να ελέγχει εάν η τελική πίεση που παράχθηκε είναι όντως η επιθυμητή[6],[47].

- **Έλεγχος Κλειστού Βρόχου (Closed-Loop) και Αλγόριθμος PID:** Για τη διασφάλιση της απόλυτης ακρίβειας, το σύστημα χρησιμοποιεί έναν ελεγκτή PID (Proportional-Integral-Derivative). Ο ελεγκτής συγκρίνει διαρκώς τη στοχευόμενη πίεση εισαγωγής (reference value / setpoint) με την πραγματική μετρούμενη πίεση (feedback) από τον αισθητήρα, υπολογίζοντας το στιγμιαίο σφάλμα (error). Ο αλγόριθμος προσαρμόζει δυναμικά το ποσοστό ανοίγματος της wastegate για να ελαχιστοποιήσει αυτό το σφάλμα σε πραγματικό χρόνο, συνθέτοντας τρεις μαθηματικούς όρους: τον Αναλογικό (P) που αντιδρά άμεσα στο τρέχον σφάλμα, τον Ολοκληρωτικό (I) που εξαλείφει τις μόνιμες αποκλίσεις του παρελθόντος, και τον Παραγωγικό (D) που προβλέπει τη μελλοντική τάση, αποτρέποντας την επικίνδυνη στιγμιαία υπερύψωση της πίεσης (overshoot)[6],[47].



Σχίμα 2-5. Συνδεσμολογία ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας ελέγχου πίεσης [50]

2.13 Μη Πτητική Μνήμη και Διαχείριση Δεδομένων (Non-Volatile Storage - NVS)

Στα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα οχημάτων, η απρόσκοπτη λειτουργία προϋποθέτει τη διατήρηση κρίσιμων δεδομένων και παραμέτρων χρήστη, ανεξάρτητα από την παρουσία ή απουσία τροφοδοσίας ρεύματος (power cycles). Η αποθήκευση αυτής της πληροφορίας υλοποιείται σε τεχνολογίες Μη Πτητικής Μνήμης (Non-Volatile Memory - NVM), όπως η EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) και η σύγχρονη μνήμη Flash.

Για τη σωστή και ασφαλή αποθήκευση δεδομένων στη μνήμη Flash, οι σύγχρονοι μικροελεγκτές αποφεύγουν την εγγραφή πληροφοριών απευθείας σε συγκεκριμένες φυσικές τοποθεσίες της μνήμης. Αντίθετα, χρησιμοποιούν ειδικά λογισμικά που ονομάζονται Συστήματα Μη Πτητικής Αποθήκευσης (Non-Volatile Storage - NVS)[4]. Τα συστήματα NVS λειτουργούν πρακτικά σαν ένα οργανωμένο «λεξικό». Οργανώνουν τις πληροφορίες σε ευρύτερες κατηγορίες (namespaces) και τις αποθηκεύουν συνδέοντας ένα «κλειδί» με μια «τιμή» (key-value pairs).

Έτσι, το λογισμικό δεν χρειάζεται να γνωρίζει σε ποια ακριβώς διεύθυνση της μνήμης βρίσκεται ένα δεδομένο, αλλά αρκεί να το αναζητήσει χρησιμοποιώντας απλώς το όνομά του (το κλειδί).

Αυτή η προσέγγιση είναι θεμελιώδης σε εφαρμογές λήψης δεδομένων και ελέγχου υποσυστημάτων οχημάτων, καθώς επιτρέπει τη μόνιμη αποθήκευση δομημένων δεδομένων, όπως οι πολυδιάστατοι χάρτες λειτουργίας (maps), οι αλγοριθμικές σταθερές (π.χ. συντελεστές ελεγκτών PID) και τα συσσωρευτικά δεδομένα (όπως οι τιμές ενός οδόμετρου), επιτρέποντας στο σύστημα να ανακτήσει την πλήρη διαμόρφωσή του ακαριαία κατά την επόμενη εκκίνηση.

Ένα κρίσιμο θεωρητικό ζήτημα που προκύπτει από τη χρήση μνημών Flash είναι το φαινόμενο της καταπόνησης του υλικού (wear out). Σε αντίθεση με τη μνήμη RAM, τα κελιά της μνήμης Flash αντέχουν έναν αυστηρά περιορισμένο αριθμό κύκλων διαγραφής/εγγραφής (τυπικά της τάξης των 10^4 έως 10^5 κύκλων)[15],[31]. Για την αντιμετώπιση αυτού του περιορισμού, τα συστήματα NVS ενσωματώνουν αλγορίθμους εξισορρόπησης φθοράς (wear leveling), οι οποίοι κατανομούν τις εγγραφές ομοιόμορφα σε ολόκληρη τη φυσική επιφάνεια του αποθηκευτικού μέσου.

Παράλληλα, σε επίπεδο σχεδιασμού λογισμικού, επιβάλλεται η εφαρμογή στρατηγικών προσωρινής αποθήκευσης (caching) όπου οι μεταβαλλόμενες μεταβλητές ενημερώνονται διαρκώς στη μνήμη RAM και η εγγραφή τους στη μη πτητική μνήμη γίνεται μόνο κατά την επιβεβαιωμένη ολοκλήρωση μιας διαδικασίας (π.χ. πίεση πλήκτρου εξόδου/επιστροφής από μενού) ή όταν πληρούνται συγκεκριμένα αριθμητικά κατώφλια, μεγιστοποιώντας έτσι τον κύκλο ζωής του ολοκληρωμένου κυκλώματος.

2.14 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για την πλήρη κατανόηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, εξετάστηκε ο κρίσιμος ρόλος των μικροελεγκτών και των ενσωματωμένων συστημάτων στον σύγχρονο μηχανοκίνητο αθλητισμό και αναλύθηκαν οι αρχές λειτουργίας των Λειτουργικών Συστημάτων Πραγματικού Χρόνου (RTOS). Στη συνέχεια, μελετήθηκε εκτενώς η φυσική και λογική δομή των τηλεματικών πρωτοκόλλων επικοινωνίας (UART, K-line, CAN), καθώς και τα πρότυπα δορυφορικής πλοήγησης (GNSS).

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν οι αρχές διασύνδεσης με αναλογικούς και ψηφιακούς αισθητήρες, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνολογία των ευρυζωνικών αισθητήρων οξυγόνου (wideband), στις μεθόδους γραφικής απεικόνισης με χρήση ενδιάμεσης μνήμης και στη διαχείριση δεδομένων μέσω μη πτητικής μνήμης (NVS). Τέλος, προσεγγίστηκαν θεωρητικά οι ηλεκτρομηχανικές τεχνικές ελέγχου μέσω διαμόρφωσης πλάτους παλμού (PWM) και του αλγορίθμου κλειστού βρόχου PID. Στο επόμενο κεφάλαιο, το εκτενές αυτό θεωρητικό πλαίσιο πρόκειται να αξιοποιηθεί για τον αυστηρό καθορισμό των προδιαγραφών και τον σχεδιασμό της συνολικής υλισμικής και λογισμικής αρχιτεκτονικής του συστήματος.

Κεφάλαιο 3ο: Προδιαγραφές και συνολική αρχιτεκτονική συστήματος

3.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην εκτενή ανάλυση των προδιαγραφών και της συνολικής αρχιτεκτονικής του προτεινόμενου ψηφιακού πίνακα οργάνων. Η ανάπτυξη ενός συστήματος τηλεμετρίας και ελέγχου για ένα όχημα αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, καθώς απαιτεί την ταυτόχρονη διαχείριση πολλαπλών ετερογενών πηγών δεδομένων (όπως ο διάυλος CAN, η σειριακή επικοινωνία K-line και το GPS) σε συνθήκες πραγματικού χρόνου (real-time).

Στις ενότητες που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά οι λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις που καθόρισαν τις σχεδιαστικές επιλογές. Αναλύεται η κατανομημένη αρχιτεκτονική Master-Slave (Dual-MCU) που υιοθετήθηκε για τον διαχωρισμό του υπολογιστικού φόρτου, η δομή της ροής δεδομένων στο σύστημα, καθώς και η ενσωμάτωση του Λειτουργικού Συστήματος Πραγματικού Χρόνου (FreeRTOS). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους χρονισμούς, την ιεράρχηση των διεργασιών (tasks) και την περιοδικότητα των επιμέρους υποσυστημάτων, στοιχεία απολύτως κρίσιμα για την επίτευξη αδιάλειπτης απόκρισης χωρίς καθυστερήσεις.

3.2 Λειτουργικές απαιτήσεις

Οι λειτουργικές απαιτήσεις περιγράφουν τις δυνατότητες και τις υπηρεσίες που πρέπει να παρέχει το σύστημα στον τελικό χρήστη προκειμένου να θεωρείται πλήρες και λειτουργικό. Συγκεκριμένα, το σύστημα πρέπει να καλύπτει τις εξής ανάγκες:

- **Προβολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο:** Απεικόνιση κρίσιμων παραμέτρων του κινητήρα (όπως στροφές ανά λεπτό, θερμοκρασία ψυκτικού, γωνία πεταλούδας γκαζιού) και εξωτερικών δεδομένων όπως η ταχύτητα του οχήματος (μέσω δέκτη GPS) και η ποιότητα του μείγματος αέρα-καυσίμου (Air-Fuel Ratio - AFR). Η απεικόνιση γίνεται μέσω μιας έγχρωμης γραφικής διεπαφής σε οθόνη TFT LCD ανάλυσης 800x480[26].
- **Λήψη δεδομένων από πολλαπλές πηγές:**
 - Άντληση δεδομένων από την εργοστασιακή μονάδα ελέγχου (ECU) της BMW μέσω της K-line (ιδιοταγές πρωτόκολλο BMW DS2)[40].
 - Λήψη μετρήσεων από εξωτερικό ελεγκτή ευρυζωνικού αισθητήρα λάμδα (rusEFI) μέσω του διαύλου CAN (CAN ID 0x190) με ταχύτητα 500 kbit/s[39].
 - Ανάγνωση ανεξάρτητων αναλογικών αισθητήρων, όπως ο αισθητήρας πίεσης (MAP sensor)[21].
- **Διαχείριση συστήματος ελέγχου πίεσης (Boost Control):** Οδήγηση μιας ηλεκτροβαλβίδας (boost solenoid) μέσω σήματος PWM κυμαινόμενης συχνότητας (10-50 Hz) για τον ακριβή έλεγχο της πίεσης υπερπλήρωσης. Ο χρήστης πρέπει να μπορεί να διαμορφώνει χάρτες ανοικτού βρόχου (open-loop) διάστασης 21x15 κελιών, καθώς και παραμέτρους κλειστού βρόχου PID, απευθείας από το μενού της οθόνης.
- **Αλληλεπίδραση και Προφίλ Οχήματος:** Πλοήγηση στα μενού μέσω τεσσάρων εξωτερικών ψηφιακών πλήκτρων (Up, Down, Enter, Back). Εισαγωγή και διαχείριση των ρυθμίσεων του

οχήματος (Vehicle config), όπως η περίμετρος του ελαστικού, η τελική σχέση μετάδοσης και οι επιμέρους σχέσεις του κιβωτίου, για τον υπολογισμό της τρέχουσας ταχύτητας (gear detection).

- **Πρόσθετες λειτουργίες:** Υπολογισμός συνολικής διανυθείσας απόστασης (Οδόμετρο) και οπτικός έλεγχος των στροφών αλλαγής ταχύτητας (shift-light) μέσω μιας σειράς 8 «έξυπνων» ψηφιακών LED τύπου WS2812B[35].

3.3 Μη λειτουργικές απαιτήσεις

Οι μη λειτουργικές απαιτήσεις καθορίζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, τους περιορισμούς και τις προδιαγραφές απόδοσης της υλοποίησης:

- **Απόδοση, χρονικοί περιορισμοί και ταχύτητα απόκρισης:** Στα συστήματα πραγματικού χρόνου, η αξία της πληροφορίας μειώνεται δραματικά αν αυτή παραδοθεί εκπρόθεσμα (hard/soft real-time constraints)[7]. Ο ρυθμός ανανέωσης της οθόνης πρέπει να είναι σταθερός στα 10 Hz (κάθε 100 ms) για να εξασφαλίζει ομαλή οπτική εμπειρία (χωρίς φαινόμενα tearing) και άμεση αντίδραση στις μεταβολές των αισθητήρων. Η ανάγνωση του GPS πρέπει επίσης να γίνεται περιοδικά στα 10 Hz[22].
- **Αξιοπιστία και ασφάλεια (Fail-safe):** Το σύστημα ελέγχου πίεσης (boost) πρέπει να διαθέτει μηχανισμούς προστασίας για την αποτροπή ζημιάς στον κινητήρα σε περίπτωση υπέρβασης ορίων (overboost)[47].
- **Εξοικονόμηση πόρων και βελτιστοποίηση μνήμης:** Λόγω των περιορισμών της ενσωματωμένης μνήμης RAM των μικροελεγκτών, η σχεδίαση πρέπει να κάνει βέλτιστη χρήση της εξωτερικής μνήμης PSRAM. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πρωτόκολλο χρώματος RGB565 αντί του RGB888, επιτυγχάνοντας μείωση των απαιτήσεων μνήμης γραφικών (framebuffer) κατά 50% και ταυτόχρονη εξοικονόμηση 8 ακροδεκτών (GPIOs)[26],[38].
- **Μόνιμη αποθήκευση (Non-Volatile Storage):** Όλες οι ρυθμίσεις του χρήστη, οι χάρτες υπερπλήρωσης, η διαμόρφωση του οχήματος και τα δεδομένα του οδομέτρου πρέπει να διατηρούνται στη μη πτητική μνήμη (NVS) ώστε να μην απαιτείται εκ νέου ρύθμιση σε κάθε επανεκκίνηση (cold start) του κινητήρα.

3.4 Συνολική αρχιτεκτονική hardware/software

Η πολυπλοκότητα των παραπάνω απαιτήσεων οδήγησε στην απόρριψη της κλασικής προσέγγισης χρήσης ενός μόνο μικροελεγκτή. Η συνεχής μεταφορά δεδομένων γραφικών στην οθόνη μπορεί να προκαλέσει συνεχείς καθυστερήσεις και στέρηση πόρων (starvation) στον επεξεργαστή, οδηγώντας σε απώλεια κρίσιμων σημάτων των αισθητήρων. Για τον λόγο αυτό, η υλοποίηση βασίζεται σε μια κατανομημένη αρχιτεκτονική **Master-Slave (Dual-MCU)**:

- **Κύριος Ελεγκτής (Master - ESP32-S3-N16R8):** Το ESP32-S3 αποτελεί τον κεντρικό πυρήνα ελέγχου. Πρόκειται για ένα System on a Chip (SoC) εξοπλισμένο με ισχυρό διτύρηνο επεξεργαστή Xtensa 32-bit LX7, χρονοσμένο στα 240 MHz[15]. Διαθέτει 16 MB ενσωματωμένης μνήμης Flash και 8 MB μνήμης Octal PSRAM[15]. Ο κεντρικός αυτός ελεγκτής τρέχει το Λειτουργικό Σύστημα Πραγματικού Χρόνου **FreeRTOS**. Αναλαμβάνει τη βαριά υπολογιστική επεξεργασία: διαχειρίζεται το γραφικό περιβάλλον μέσω της βιβλιοθήκης LVGL 9.2.2[38], επικοινωνεί με την ECU μέσω της θύρας UART/K-line, κάνει ανάγνωση

μηνυμάτων του CAN bus (ενσωματώνοντας ελεγκτή TWAI/CAN 2.0B) και οδηγεί το σήμα PWM για το boost control (μέσω του περιφερειακού LEDC)[15].

- **Δευτερεύων μικροελεγκτής (Slave - STM32F401RE):** Λειτουργεί ως σύστημα συλλογής δεδομένων (sensor/IO front-end) και προεπεξεργασίας. Βασίζεται στον πυρήνα ARM Cortex-M4 (με Floating Point Unit) στα 84 MHz[31]. Εκτελεί απλούστερο κώδικα χωρίς RTOS. Αναλαμβάνει λειτουργίες που απαιτούν αυστηρό hardware timing: διαβάζει τις προτάσεις NMEA από το GPS (μέσω USART6), κάνει δειγματοληψία των αναλογικών σημάτων μέσω του εσωτερικού μετατροπέα ADC 12-bit (για τον MAP sensor, την τάση της μπαταρίας και των δυο αναλογικών εισόδων)[31], εκτελεί το αλγοριθμικό debouncing των ψηφιακών πλήκτρων και οδηγεί την ψηφιακή έξοδο low side και τη γραμμή δεδομένων των LED WS2812B[35].

3.5 Ροή δεδομένων

Ο διαχωρισμός των εργασιών ανάμεσα στους δύο μικροελεγκτές απαιτεί μια πολύ ξεκάθαρη και οργανωμένη διαδρομή για τα δεδομένα. Η πληροφορία κυκλοφορεί ασταμάτητα μέσα στο σύστημα, χωρισμένη σε τρεις βασικούς διαύλους επικοινωνίας:

1. **Δίαυλος Αισθητήρων (Από τον STM32 στον ESP32):** Ο συνεπεξεργαστής STM32 μαζεύει συνεχώς τις μετρήσεις από το GPS και τους διάφορους αισθητήρες του οχήματος (αναλογικούς και ψηφιακούς). Για να τα στείλει εύκολα και γρήγορα στον κεντρικό ελεγκτή, τα «πακετάρει» όλα μαζί σε ένα ενιαίο μήνυμα κειμένου (μορφή CSV), δημιουργώντας μια λίστα με 14 διαφορετικές τιμές. Αυτό το πακέτο αποστέλλεται μέσα από μια αποκλειστική και γρήγορη σειριακή σύνδεση (UART στα 115200 baud). Μόλις ο ESP32 παραλάβει το μήνυμα, το διαβάζει και ανανεώνει άμεσα τις τιμές στην εσωτερική του μνήμη.
2. **Δίαυλος Εντολών (Από τον ESP32 στον STM32):** Η επικοινωνία δεν είναι μονόδρομη. Ο κεντρικός ελεγκτής (ESP32) παίρνει αποφάσεις με βάση τις ρυθμίσεις του οδηγού. Για παράδειγμα, ελέγχει αν οι στροφές του κινητήρα έφτασαν στο σημείο που πρέπει να ανάψουν τα ενδεικτικά LED αλλαγής ταχύτητας (shift-light) ή αν έχει επιλεγθεί από το μενού η ενεργοποίηση της εξωτερικής ψηφιακής εξόδου low-side output για να ενεργοποιηθεί κάποιο εξωτερικό κύκλωμα. Αμέσως, δημιουργεί ένα μικρό πακέτο με δύο απλές εντολές (digital_out και rpm_shiftlight) και το στέλνει στον STM32, ο οποίος λειτουργεί ανάλογα ανάβοντας τα LED ή ελέγχοντας την έξοδο.
3. **Δίαυλος δεδομένων (Δεδομένα Κινητήρα και Μείγματος):** Παράλληλα με τους αισθητήρες, ο κεντρικός μικροελεγκτής (ESP32) αντλεί συνεχώς πληροφορίες από δύο βασικά συστήματα του οχήματος:
 - i. **Από τον εγκέφαλο του αυτοκινήτου (ECU):** Διαβάζει τις βασικές παραμέτρους λειτουργίας, όπως είναι οι στροφές και η θερμοκρασία του κινητήρα, μέσω της εργοστασιακής θύρας διάγνωσης (K-line) και του πομποδέκτη L9637D[17].
 - ii. **Από τον ελεγκτή του αισθητήρα λάμδα (rusEFI):** Διαβάζει την ακριβή αναλογία του μείγματος αέρα-καυσίμου "ακούγοντας" τον ψηφιακό δίαυλο CAN (ID 0x190)[39].

Επειδή αυτά τα δεδομένα έρχονται από διαφορετικές πηγές και με διαφορετικές ταχύτητες, το λειτουργικό σύστημα (FreeRTOS) αναλαμβάνει να τα συγκεντρώσει με ασφάλεια, να τα βάλει σε τάξη και τελικά να τα εμφανίσει όλα μαζί απόλυτα συγχρονισμένα στο καντράν του οδηγού.

3.6 Κατανομή ρόλων ESP32 και STM32

Η επιλογή να μοιραστούν οι εργασίες σε δύο επεξεργαστές δίνει λύση σε αρκετά σχεδιαστικά αδιέξοδα. Από τη μία πλευρά, ο κεντρικός ελεγκτής ESP32-S3 είναι ιδανικός για να σηκώσει το υπολογιστικό βάρος των γραφικών. Αξιοποιώντας την εξωτερική μνήμη PSRAM με τεχνικές όπως το Bounce και το Double Buffering, προσφέρει μια απόλυτα ομαλή οπτική εμπειρία, αποτρέποντας το ενοχλητικό «σκίσιμο» (screen tearing) της εικόνας. Ωστόσο, η διαρκής ανανέωση της οθόνης μέσα από το λειτουργικό FreeRTOS είναι μια αρκετά βαριά διεργασία που δεσμεύει πολύτιμο χρόνο. Για να μην υπερφορτωθεί το σύστημα, ο ESP32 απαλλάσσεται πλήρως από «ρουτινιάρικες» αλλά χρονοβόρες εργασίες επικοινωνίας με το υλικό, όπως το να διαβάζει και να μεταφράζει ασταμάτητα τα εκατοντάδες bytes του δέκτη GPS. Εδώ ακριβώς αναλαμβάνει δράση ο δευτερεύων μικροελεγκτής STM32F4. Διαθέτοντας απόλυτα σταθερό χρονισμό στις λειτουργίες του, διαχειρίζεται άψογα πρωτόκολλα που απαιτούν συγχρονισμό ακριβείας, όπως είναι η επικοινωνία με τα ενδεικτικά LED WS2812B. Ταυτόχρονα, αναλαμβάνει την αδιάκοπη ανάγνωση των αναλογικών αισθητήρων και τη μετατροπή των ακατέργαστων μετρήσεων του μετατροπέα (ADC) απευθείας στις σωστές φυσικές μονάδες μέτρησης (όπως για παράδειγμα σε kPa για τον αισθητήρα πίεσης MAP ή σε Volts για την τάση της μπαταρίας).

3.7 Χρονισμοί και περιοδικότητα

Σε κάθε σύστημα πραγματικού χρόνου, ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) αποτελεί την καρδιά της λειτουργίας. Το σύστημα υιοθετεί τον αλγόριθμο «χρονοπρογραμματισμού προτίμησης σταθερής προτεραιότητας» (fixed priority preemptive scheduling) του FreeRTOS[3],[7], όπου η διεργασία με την υψηλότερη προτεραιότητα που είναι έτοιμη, προκαταλαμβάνει αμέσως τις υποδεέστερες. Το σύστημα οργανώνεται σε διακριτές διεργασίες με απόλυτα ελεγχόμενη συχνότητα:

- **Ανανέωση Γραφικών (UI Refresh - ui_refresh_timer_cb):** Εκτελείται ως χρονορουτίνα (software timer callback) ακριβώς κάθε **100 ms** (10 Hz). Αυτή η ρουτίνα αποτελεί το μοναδικό σημείο του κώδικα που επιτρέπεται να αλληλεπιδρά με τα γραφικά στοιχεία (widgets) του LVGL, διασφαλίζοντας την αποφυγή συγκρούσεων (thread safety) κατά τη σχεδίαση.
- **Λήψη Δεδομένων K-Line (kline_task):** Η συγκεκριμένη διεργασία αναλαμβάνει την επικοινωνία με τον εγκέφαλο του αυτοκινήτου (ECU). Χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη συνεχή λήψη δεδομένων του κινητήρα, όπως είναι οι στροφές και οι διάφορες θερμοκρασίες του κινητήρα. Πρακτικά, το λογισμικό ρωτάει ασταμάτητα (polling) την ECU κάθε 20 ms. Χάρη σε αυτόν τον γρήγορο ρυθμό, καταφέρνει να συγκεντρώσει και να ανανεώσει πλήρως ολόκληρο το πακέτο των μετρήσεων μέσα σε περίπου 100 ms, διατηρώντας την πληροφορία στην οθόνη πάντα άμεση.
- **Λήψη Δεδομένων από STM32 (stm_link_task):** Σε αυτή τη διεργασία, ο STM32 έχει ρυθμίσει τον δέκτη GPS να εξάγει μετρήσεις ταχύτητας και στίγματος με σταθερό ρυθμό 10 Hz. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον ρυθμό ως κεντρικό "ρολόι" του συστήματος, ο STM32 αποστέλλει τα πακέτα δεδομένων των αισθητήρων στον ESP32 ακριβώς κάθε 100 ms.
- **Διάβασμα CAN Bus (wb_can_rx):** Η συγκεκριμένη διεργασία διαχειρίζεται έξυπνα την επικοινωνία με τον εξωτερικό ελεγκτή (rusEFI). Το ενσωματωμένο κύκλωμα TWAI του ESP32 ρυθμίζεται σε κανονική λειτουργία (normal mode), ώστε να είναι δυνατή η αποστολή πακέτων επιβεβαίωσης (ACK) προς τον ελεγκτή και να διατηρείται ζωντανή και χωρίς σφάλματα η επικοινωνία. Η διεργασία μπλοκάρει (παραμένει σε αναμονή) στοχεύοντας αποκλειστικά στην αντίχρευση του πακέτου με αναγνωριστικό 0x190. Μόλις λάβει το πακέτο, δεν το προβάλλει

τυφλά, αλλά ελέγχει πρώτα την εγκυρότητά του (για παράδειγμα, αν ο αισθητήρας λάμδα βρίσκεται ακόμα σε φάση προθέρμανσης), πριν προχωρήσει στην αποκωδικοποίηση της αναλογίας. Διαθέτει, ωστόσο, ένα αυστηρό χρονικό περιθώριο ασφαλείας (timeout) 5 δευτερολέπτων, ώστε αν ο διάλογος σιγήσει ή χαθεί η φυσική σύνδεση με τον ελεγκτή, το σύστημα να ξεμπλοκάρει αυτόματα και να αναφέρει εγκαίρως το σφάλμα.

- **Έλεγχος Υπερπλήρωσης (Boost PWM):** Η οδήγηση της ηλεκτροβαλβίδας (boost solenoid) αποτελεί ίσως την πιο κρίσιμη λειτουργία του συστήματος, γι' αυτό και ο έλεγχός της δεν επαφίεται σε απλές χρονοκαθυστερήσεις του λογισμικού, αλλά αξιοποιεί το εξειδικευμένο περιφερειακό παραγωγής παλμών (LEDC) του ESP32[15]. Ο υπολογισμός του ποσοστού λειτουργίας (duty cycle) εκτελείται αδιάκοπα στο παρασκήνιο, είτε με βάση τον δυναμικό χάρτη ανοιχτού βρόχου (open-loop) διάστασης 21x15 κελιών, είτε μέσω του αλγορίθμου κλειστού βρόχου PID. Στη συνέχεια, η υπολογισμένη τιμή εγγράφεται απευθείας στους καταχωρητές υλικού (hardware timers). Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει αφενός εξαιρετικά υψηλή ανάλυση ελέγχου 13-bit για τον απόλυτης ακρίβειας χειρισμό της βαλβίδας, και αφετέρου μια απολύτως σταθερή συχνότητα (επιλέξιμη από 10 έως 50 Hz). Το παραγόμενο σήμα παραμένει εντελώς ανεξάρτητο από τον τρέχοντα υπολογιστικό φόρτο της οθόνης, διασφαλίζοντας την ασφαλή και απρόσκοπτη λειτουργία του κινητήρα.

Ρυθμός Μεταβολής Τιμών (Fast vs. Slow Data) Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι, παρόλο που η κεντρική ανανέωση της οθόνης και η δειγματοληψία των διαύλων γίνονται 10 φορές το δευτερόλεπτο (ανά 100 ms), οι ίδιες οι φυσικές τιμές δεν μεταβάλλονται όλες με αυτή την ταχύτητα. Τα δεδομένα διαχωρίζονται σαφώς σε δύο κατηγορίες:

1. **Τιμές γρήγορης μεταβολής (ανά 100 ms):** Πρόκειται για δυναμικές παραμέτρους του οχήματος που απαιτούν αστραπιαία ενημέρωση ώστε ο οδηγός να έχει άμεση αίσθηση του ελέγχου. Σε αυτές ανήκουν οι στροφές του κινητήρα (RPM), η πίεση της πολλαπλής (MAP), η θέση της πεταλούδας του γκαζιού (TPS), η ταχύτητα του οχήματος (GPS Speed) και η αναλογία μείγματος (AFR). Αυτές οι τιμές μεταβάλλονται διαρκώς σε κάθε κύκλο των 100 ms, με το σύστημα να εγγυάται ότι η οπτική τους απεικόνιση (π.χ. στη μπάρα στροφών ή στο shift-light) θα είναι άμεση και χωρίς καμία αντιληπτή καθυστέρηση.
2. **Τιμές αργής μεταβολής:** Αντίθετα, υπάρχουν παράμετροι που διέπονται από μεγάλη φυσική ή θερμική αδράνεια. Τιμές όπως η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού (Coolant Temp), η θερμοκρασία λαδιού (Oil Temp) και, σε μικρότερο βαθμό, η τάση της μπαταρίας (Battery Voltage), χρειάζονται από αρκετά δευτερόλεπτα έως και λεπτά για να καταγράψουν μεταβολή της τάξης της μίας μονάδας. Αντίθετα, υπάρχουν παράμετροι που μεταβάλλονται πολύ αργά, όπως η συνολική διανυθείσα απόσταση (οδόμετρο) ή οι θερμοκρασίες. Για να διατηρηθεί ο κώδικας απλός, το λογισμικό συνεχίζει να διαβάσει αυτές τις τιμές κάθε 100 ms. Ωστόσο, για να μην αποσπάται η προσοχή του οδηγού από νούμερα που τρεμοπαίζουν διαρκώς με ανούσια δεκαδικά (οπτικός θόρυβος), η απεικόνισή τους στην οθόνη παραμένει σταθερή. Επιπλέον, ειδικά για το οδόμετρο, η μόνιμη αποθήκευση της τιμής του στη μνήμη του συστήματος γίνεται μόνο κάθε 1 χιλιόμετρο, προκειμένου να προστατευθεί η μνήμη από φθορές συνεχών εγγραφών.

3.8 Επίλογος

Μέσα από την ανάλυση αυτού του κεφαλαίου, αναδείχθηκε η κρισιμότητα των σωστών αρχιτεκτονικών επιλογών για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου συστήματος πραγματικού χρόνου. Το κλειδί της λειτουργικότητας της κατασκευής βρίσκεται ξεκάθαρα στην υιοθέτηση της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής (Dual-MCU). Συνδυάζοντας την υπολογιστική ισχύ του ESP32-S3 ο οποίος φορτώνεται το βάρος της γραφικής διεπαφής και της επικοινωνίας με τα πρωτόκολλα του οχήματος, με την απόλυτη χρονική συνέπεια του STM32F4 που λειτουργεί ως ακούραστος συλλέκτης δεδομένων, το σύστημα πετυχαίνει την ιδανική εξισορρόπηση φόρτου.

Καταλυτικό ρόλο σε αυτή την αρμονική συνεργασία παίζει το λειτουργικό σύστημα FreeRTOS. Διαχειρίζεται την αυστηρά οριοθετημένη ροή πληροφοριών και εγγυάται ότι τα δεδομένα είτε πρόκειται για παραμέτρους γρήγορης μεταβολής όπως η πίεση του turbo, είτε για πιο αργές όπως η θερμοκρασία του κινητήρα φτάνουν στο οπτικό πεδίο του οδηγού συγχρονισμένα και με απόλυτη ομαλότητα. Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη σχεδιαστική προσέγγιση δεν περιορίζεται απλώς στην ικανοποίηση των τρεχουσών αναγκών οπτικοποίησης δεδομένων και ελέγχου. Χάρη στην πρόβλεψη για μηχανισμούς ασφαλείας (fail-safe) και την ενσωμάτωση εφεδρικών εισόδων και εξόδων (όπως το low-side output), έχει δημιουργηθεί μια εξαιρετικά στιβαρή και ευέλικτη πλατφόρμα, απολύτως έτοιμη να υποδεχθεί μελλοντικές αναβαθμίσεις και επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 4ο: Σχεδίαση υλικού, custom PCB και μηχανολογική ολοκλήρωση

4.1 Εισαγωγή

Η αξιοπιστία ενός ψηφιακού πίνακα οργάνων οχημάτων δεν κρίνεται μόνο από την πολυπλοκότητα του λογισμικού του, αλλά πρωτίστως από τη στιβαρότητα του υλικού (hardware) πάνω στο οποίο αυτό εκτελείται. Το περιβάλλον ενός αυτοκινήτου (και ιδιαίτερα ενός αγωνιστικού) είναι εξαιρετικά εχθρικό για τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά, καθώς χαρακτηρίζεται από ακραίες διακυμάνσεις τάσης, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο (EMI), κραδασμούς και υψηλές θερμοκρασίες. Το παρόν κεφάλαιο αναλύει λεπτομερώς τη σχεδίαση της ειδικής τυπωμένης πλακέτας (custom PCB) που αναπτύχθηκε, περιγράφοντας τα επιμέρους υποσυστήματα, τα προηγμένα κυκλώματα τροφοδοσίας και προστασίας, την επιλογή των μικροελεγκτών, καθώς και τη μηχανολογική μελέτη του περιβλήματος για την ασφαλή τοποθέτηση της συσκευής στο όχημα.

4.2 Κύρια υποσυστήματα της πλακέτας

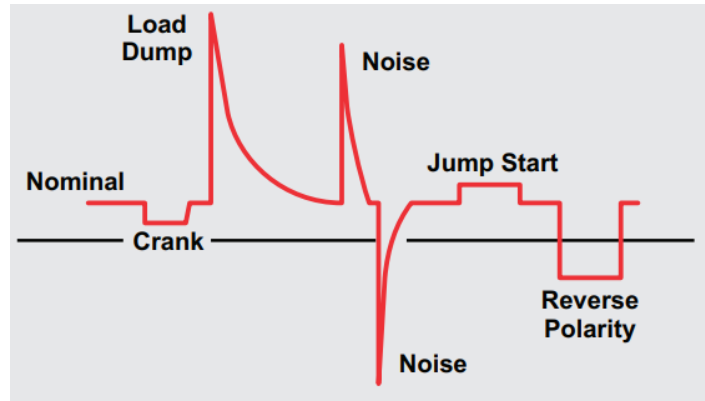
Το υλικό του συστήματος ακολουθεί μια αρχιτεκτονική πολλαπλών επιπέδων (Master-Slave), διαχωρίζοντας τον υπολογιστικό φόρτο. Η πλακέτα φιλοξενεί δύο διακριτούς μικροελεγκτές (τον ESP32-S3 ως κύριο ελεγκτή γραφικών/επικοινωνιών και τον STM32F401RE ως συνεπεξεργαστή). Γύρω από αυτούς, η πλακέτα αρθρώνεται σε πέντε βασικά υποσυστήματα:

1. Το υποσύστημα έξυπνης τροφοδοσίας και διαχείρισης ενέργειας.
2. Το υποσύστημα της παράλληλης οθόνης γραφικών και ελέγχου οπίσθιου φωτισμού.
3. Τους πομποδέκτες βιομηχανικών επικοινωνιών (CAN bus και K-Line).
4. Το αναλογικό και ψηφιακό «Front-end» εισόδων (αισθητήρες, GPS, πλήκτρα).
5. Το κύκλωμα ισχύος (Drivers) για την οδήγηση εξωτερικών φορτίων, όπως η ηλεκτροβαλβίδα της υπερπλήρωσης.

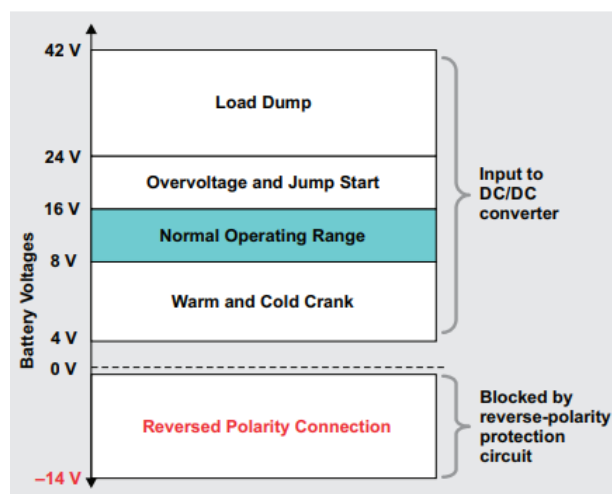
4.3 Τροφοδοσία και προστασίες

4.3.1 Εισαγωγή

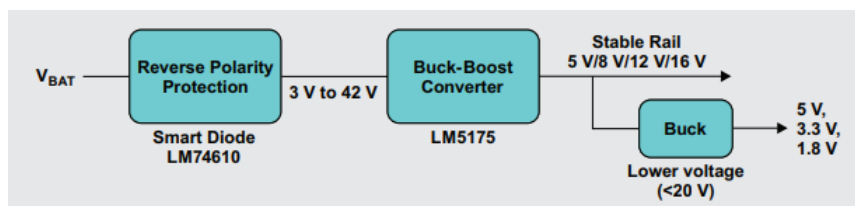
Η τροφοδοσία της πλακέτας έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη λειτουργία σε περιβάλλον οχήματος, όπου η ονομαστική τάση των 12 V δεν είναι σταθερή. Λόγω των διαταραχών που συμβαίνουν στη γραμμή των 12 V ενός οχήματος κατά την εκκίνηση του κινητήρα, τη μεταβολή υψηλών φορτίων ή σε συνθήκες ηλεκτρικού θορύβου, η τάση της μπαταρίας μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές βυθίσεις, υπερτάσεις και αιχμές[43][51]. Για τον λόγο αυτό, το κύκλωμα τροφοδοσίας της πλακέτας δεν βασίζεται απευθείας στη γραμμή της μπαταρίας, αλλά περιλαμβάνει βαθμίδα προστασίας εισόδου, μετατροπέα dc/dc buck-boost για σταθεροποίηση της γραμμής των 12 V, μετατροπέα dc/dc buck για γραμμή τάσης 5 V και γραμμικό σταθεροποιητή για την παραγωγή της τάσης 3.3 V.



Σχήμα 4-1. Διακυμάνσεις στη γραμμή τροφοδοσίας της μπαταρίας οχήματος [51]



Σχήμα 4-2. Απαιτήσεις τάσης για το στάδιο μετατροπής ισχύος σε αυτοκινητιστικές εφαρμογές [51]



Σχήμα 4-3. Προσέγγιση μετατροπής DC/DC από την τάση της μπαταρίας [51]

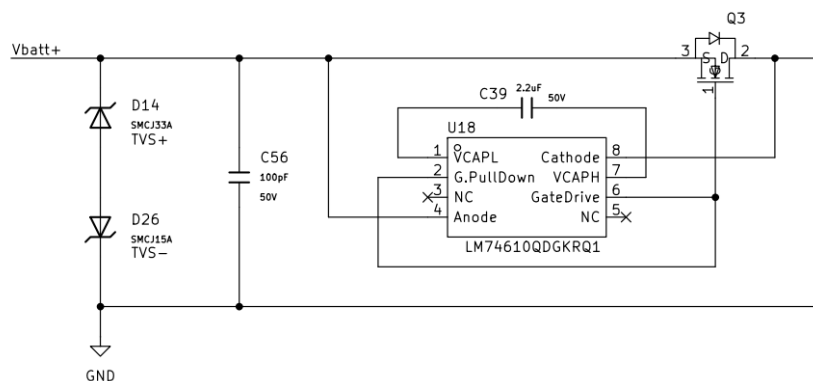
4.3.2 Είσοδος κύριας τροφοδοσίας

Η κύρια τροφοδοσία εισάγεται από τον κεντρικό κονέκτορα της πλακέτας Nano MQS 20pin (J2), μέσω των γραμμών V_{batt+} και GND όπου χρησιμοποιήθηκαν δύο ακροδέκτες για τη θετική παροχή και αντίστοιχα δύο για τη γείωση. Με τη χρήση περισσότερων του ενός ακροδεκτών για την ίδια γραμμή μειώνεται η αντίσταση επαφής και βελτιώνεται η ικανότητα μεταφοράς ρεύματος κρατώντας χαμηλά τη θερμοκρασία τους καθώς η κάθε επαφή αντέχει 1.6 A μέγιστο ρεύμα, στοιχείο σημαντικό καθώς η

πλακέτα δεν τροφοδοτεί μόνο λογικά κυκλώματα αλλά και φορτία μεγαλύτερης ισχύος, όπως ο οπίσθιος φωτισμός της οθόνης και οι έξοδοι ελέγχου και η χρήση ενός μόνο ακροδέκτη δεν θα ήταν αρκετή.

4.3.3 Προστασία ανάστροφης πολικότητας

Αρχικά στην είσοδο της τροφοδοσίας υπάρχει στάδιο προστασίας από ανάστροφη πολικότητα. Η προστασία αυτή υλοποιείται με τον ελεγκτή LM74610-Q1 (U18)[20] σε συνδυασμό με το εξωτερικό N-channel MOSFET SQD40N06-14L (Q3)[29], σχηματίζοντας κύκλωμα τύπου ιδανικής διόδου. Η λύση αυτή λειτουργεί σαν μια απλή διάοδο σε επίπεδο συστήματος, αλλά με πολύ μικρότερες απώλειες καθώς η αγωγή γίνεται μέσω MOSFET χαμηλής αντίστασης, επιτυγχάνοντας να μην υπάρχει η αντίστοιχη πτώση τάσης και θερμική απώλεια[20],[43]. Κατά την κανονική πολικότητα, αρχικά άγει η εσωτερική διάοδος του MOSFET, δημιουργώντας την απαιτούμενη τάση για την εκκίνηση του LM74610. Ο ελεγκτής φορτίζει τον εξωτερικό πυκνωτή που συνδέεται στους ακροδέκτες VCAPH και VCAPL, ο οποίος λειτουργεί ως πυκνωτής του εσωτερικού charge pump. Η αποθηκευμένη τάση στον Vcap χρησιμοποιείται για την οδήγηση της πύλης του MOSFET, ώστε αυτό να περάσει σε πλήρη αγωγή και να μειωθεί η πτώση τάσης στην είσοδο. Επειδή ο ελεγκτής δεν συνδέεται στη γείωση, ο πυκνωτής Vcap αποτελεί ουσιαστικά την τοπική πηγή ενέργειας για την οδήγηση της πύλης. Η τάση στα άκρα του πυκνωτή Vcap δεν είναι σταθερή, αλλά κυμαίνεται μεταξύ δύο ορίων λειτουργίας, 6.3 V στο άνω όριο φόρτισης και 5,15 V στο κάτω όριο[20]. Όταν ο πυκνωτής φορτιστεί έως τα 6.3 V, ο ελεγκτής οδηγεί την πύλη του MOSFET και αυτό τίθεται σε αγωγή. Κατά τη λειτουργία του MOSFET η τάση του πυκνωτή μειώνεται σταδιακά καθώς τροφοδοτεί το κύκλωμα οδήγησης της πύλης. Όταν η τάση στα άκρα του φτάσει το κάτω όριο, το MOSFET απενεργοποιείται στιγμιαία και ο πυκνωτής επαναφορτίζεται μέσω της τάσης που εμφανίζεται στη body diode του MOSFET, ώστε να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος λειτουργίας. Στον κύκλο λειτουργίας η αγωγή μέσω της διόδου του mosfet είναι περίπου 2% ενώ στο υπόλοιπο 98% το MOSFET παραμένει σε αγωγή[20]. Στην πλακέτα της εργασίας, η έξοδος αυτού του σταδίου ονομάζεται Vbatt_protected και αποτελεί την προστατευμένη γραμμή από την οποία τροφοδοτούνται τα επόμενα στάδια ισχύος.



Σχήμα 4-4. Κύκλωμα προστασίας ανάστροφης πολικότητας

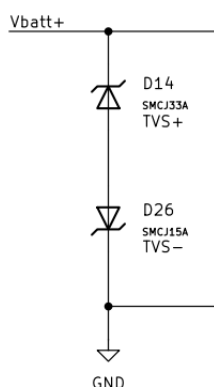
4.3.4 Προστασία από αιχμές τάσης

Παράλληλα με τη γραμμή εισόδου έχουν τοποθετηθεί στοιχεία προστασίας από στιγμιαίες υπερτάσεις. Στο σχηματικό φαίνονται οι TVS διάοδοι SMCJ33A (D14) και SMCJ15A (D26), οι οποίες τοποθετούνται κοντά στην περιοχή εισόδου της τροφοδοσίας. Ο ρόλος τους είναι η απορρόφηση γρήγορων αιχμών τάσης και η προστασία των μετατροπέων DC/DC από παλμούς που μπορούν να

εμφανιστούν στη γραμμή μπαταρίας. Η ύπαρξη τέτοιας προστασίας είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλον οχήματος, όπου επαγωγικά φορτία, ρελέ, solenoids και η καλωδίωση μπορούν να δημιουργήσουν αιχμές τάσης[43]. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα TVS στοιχεία περιορίζουν στιγμιαίες υπερτάσεις, αλλά δεν αντικαθιστούν την ασφάλεια τροφοδοσίας.

Οι δύο TVS δεν έχουν την ίδια ονομαστική τάση, επειδή εξυπηρετούν διαφορετικό είδος παλμών. Η SMCJ33A χρησιμοποιείται για τον περιορισμό θετικών αιχμών τάσης, όπως αυτές που μπορούν να εμφανιστούν σε καταστάσεις τύπου load dump[43]. Για τον λόγο αυτό έχει υψηλότερη τάση αποκοπής, ώστε να μην άγει κατά την κανονική λειτουργία ή σε αυξημένες τάσεις της γραμμής μπαταρίας. Αντίθετα, η SMCJ15A χρησιμοποιείται για τον περιορισμό αρνητικών αιχμών σε καταστάσεις θορύβου, όπου απαιτείται χαμηλότερη τάση αποκοπής ώστε να περιοριστεί η αρνητική τάση στην είσοδο του κυκλώματος[43].

Και οι δύο διόδοι ανήκουν στη σειρά SMCJ, η οποία έχει ικανότητα απορρόφησης παλμού 1500 W, δηλαδή 1,5 kW, για κυματομορφή 10/1000 μ s[28]. Για τη SMCJ15A, η τάση αποκοπής (reverse standoff) είναι 15 V, η τάση διάσπασης (Breakdown) είναι 16,7–18,5 V, η μέγιστη τάση σύσφιξης (clamping) είναι 24,4 V και το μέγιστο παλμικό ρεύμα είναι 61,5 A[28]. Για τη SMCJ33A, η τάση αποκοπής είναι 33 V, η τάση διάσπασης είναι 36,7–40,6 V, η μέγιστη τάση σύσφιξης είναι 53,3 V και το μέγιστο παλμικό ρεύμα είναι 28,2 A[28].



Σχήμα 4-5. Κύκλωμα προστασίας από αιχμές τάσης

4.3.5 Σταθεροποίηση γραμμής 12V (buck-boost)

Η προστατευμένη γραμμή Vbatt_protected οδηγείται στον κύριο μετατροπέα LM5175PWP (U2), ο οποίος υλοποιεί σύγχρονη τετραδιακοπτική τοπολογία buck-boost. Ο LM5175 είναι κατάλληλος για εφαρμογές όπου η τάση εισόδου μπορεί να είναι είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη από την επιθυμητή τάση εξόδου, καθώς μπορεί να λειτουργήσει τόσο σε κατάσταση υποβιβασμού όσο και σε κατάσταση ανύψωσης τάσης. Το εύρος εισόδου του LM5175 είναι από 3,5 V έως 42 V και διαθέτει προστασίες όπως UVLO, soft-start, current limiting, overvoltage protection και thermal shutdown[19]. Αυτά τα χαρακτηριστικά τον καθιστούν κατάλληλο για τροφοδοσία από γραμμή μπαταρίας οχήματος, και να καλύψει τις αστάθειες της γραμμής της μπαταρίας του οχήματος που έχουν προαναφερθεί.

Ο LM5175 συνεργάζεται με τέσσερα εξωτερικά MOSFET ισχύος, τα Q1, Q4, Q5 και Q6, καθώς και με το πηνίο L7 = 5,6 μ H. Η δομή αυτή σχηματίζει το τετραδιακοπτικό στάδιο buck-boost, το οποίο παράγει τη σταθεροποιημένη γραμμή 12 V της πλακέτας. Ο συγκεκριμένος ελεγκτής μπορεί να λειτουργήσει

Κεφάλαιο 4

είτε ως υποβιβαστής είτε ως ανυψωτής τάσης, ανάλογα με τη σχέση της τάσης εισόδου με την επιθυμητή τάση εξόδου, γεγονός που τον καθιστά κατάλληλο για τροφοδοσία από γραμμή μπαταρίας οχήματος.

Η τάση εξόδου καθορίζεται από τον διαιρέτη ανάδρασης $R_{fbt1} = 280 \text{ k}\Omega$ και $R_{fbb1} = 20 \text{ k}\Omega$. Με βάση την τάση αναφοράς του ακροδέκτη FB, η οποία είναι $0,8 \text{ V}$ [19], η τάση εξόδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{OUT} = V_{FB} \left(1 + \frac{R_{fbt1}}{R_{fbb1}} \right) \quad (4.1)$$

Επομένως:

$$V_{OUT} = 0,8 \left(1 + \frac{280 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} \right) = 0,8(1 + 14) = 0,8 * 15 = 12 \text{ V} \quad (4.2)$$

Επιπλέον, στο σχέδιο συμπεριλήφθηκε αντίσταση μέτρησης ρεύματος $R_6 = 20 \text{ m}\Omega$, μέσω της οποίας ο ελεγκτής παρακολουθεί το ρεύμα του μετατροπέα. Η αντίσταση αυτή χρησιμοποιείται από το κύκλωμα average current limiting του LM5175, το οποίο συγκρίνει την πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης με εσωτερικό όριο 50 mV [19]. Όταν η πτώση τάσης ξεπεράσει αυτή την τιμή, ενεργοποιείται ο βρόχος Constant Current, ο οποίος μειώνει τη ρύθμιση της εξόδου μέσω του soft-start ώστε να περιοριστεί το ρεύμα. Το επιθυμητό όριο ρεύματος τέθηκε στα $2,5 \text{ A}$ και η τιμή της αντίστασης υπολογίστηκε με τον τύπο:

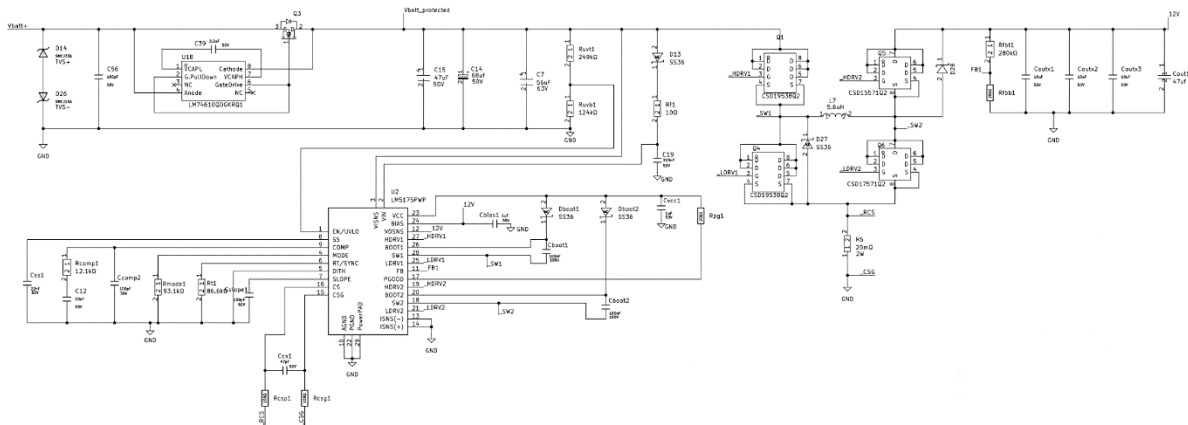
$$R_{sense} = \frac{50 \text{ mV}}{2,5 \text{ A}} = 0,02 \Omega = 20 \text{ m}\Omega \quad (4.3)$$

Συνεπώς, η επιλογή της $R_6 = 20 \text{ m}\Omega$ θέτει το μέσο όριο ρεύματος του συγκεκριμένου σταδίου περίπου στα $2,5 \text{ A}$. Στο όριο αυτό, η ισχύς που καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση μέτρησης είναι:

$$P_{R6} = I^2 * R = (2,5 \text{ A})^2 * 0,020 \Omega = 0,125 \text{ W} \quad (4.4)$$

Η αντίσταση που επιλέχθηκε για την R_6 έχει ονομαστική ισχύ 2 W , τιμή σημαντικά μεγαλύτερη από τη θεωρητική απώλεια των $0,125 \text{ W}$ στο όριο ρεύματος. Η επιλογή αυτή προσφέρει μεγάλο θερμοκτικό περιθώριο λειτουργίας.

Παράλληλα, ο LM5175 διαθέτει και κύκλωμα cycle-by-cycle current limit [19], το οποίο δρα ταχύτερα σε συνθήκες υπερέντασης ή βραχυκυκλώματος. Στην είσοδο και στην έξοδο του σταδίου υπάρχουν ηλεκτρολυτικοί και κεραμικοί πυκνωτές, όπως οι C15, C14, Coutx1, Coutx3 και Cout1, για μείωση της κυμάτωσης και παροχή στιγμιαίας ενέργειας σε μεταβολές φορτίου.



Σχήμα 4-6. Κύκλωμα σταθεροποίησης γραμμής 12V (buck-boost)

4.3.6 Γραμμή τροφοδοσίας 5V

Από τη σταθεροποιημένη γραμμή 12 V παράγεται η γραμμή 5 V μέσω του μετατροπέα TPS5430DDAR (U1). Ο TPS5430 είναι μετατροπέας υποβιβασμού τάσης (step-down / buck converter) με δυνατότητα παροχής έως 3 A, εύρος τάσης εισόδου 5,5–36 V, ενσωματωμένο high-side N-channel MOSFET, σταθερή συχνότητα μεταγωγής 500 kHz και εσωτερικούς μηχανισμούς προστασίας, όπως περιορισμό υπερτάσης, προστασία υπέρτασης και θερμική απενεργοποίηση[37].

Στο κύκλωμα της πλακέτας, ο TPS5430 συνεργάζεται με το πηνίο $L2 = 33 \mu\text{H}$, τη δίοδο Schottky D33, καθώς και με πυκνωτές εισόδου και εξόδου για τη μείωση της κυμάτωσης και τη σταθεροποίηση της γραμμής των 5 V. Επειδή ο συγκεκριμένος μετατροπέας είναι μη σύγχρονος buck, η δίοδος Schottky λειτουργεί ως δίοδος ελεύθερης διέλευσης (catch/freewheel diode) όταν το εσωτερικό high-side MOSFET είναι απενεργοποιημένο[37]. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται διαδρομή στο ρεύμα του πηνίου κατά το διάστημα off του διακόπτη, επιτρέποντας τη συνέχιση της μεταφοράς ενέργειας προς την έξοδο.

Η τάση εξόδου καθορίζεται από τον διαιρέτη ανάδρασης $R40 = 10 \text{ k}\Omega$ και $R39 = 3,24 \text{ k}\Omega$. Με βάση την εσωτερική τάση αναφοράς του ακροδέκτη VSENSE, η οποία είναι 1,221 V[37], η τάση εξόδου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R_{top}}{R_{bottom}} \right) \quad (4.5)$$

Επομένως:

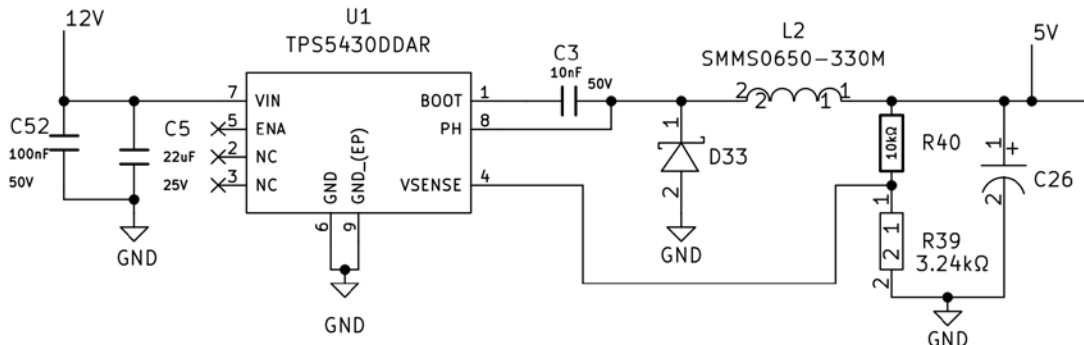
$$V_{OUT} = 1,221 \left(1 + \frac{10\text{k}\Omega}{3,24\text{k}\Omega} \right) \quad (4.6)$$

$$V_{OUT} = 1,221(1 + 3,086) \quad (4.7)$$

$$V_{OUT} = 1,221 * 4,086 = 4,98\text{V} \quad (4.8)$$

Άρα, ο συγκεκριμένος διαιρέτης ρυθμίζει την έξοδο του μετατροπέα πρακτικά στα 5 V. Η γραμμή αυτή χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία κυκλωμάτων που απαιτούν τάση 5 V, καθώς και ως είσοδος για τον επόμενο σταθεροποιητή, ο οποίος παράγει τη γραμμή 3,3 V για τα ψηφιακά κυκλώματα της

πλακέτας. Σε αντίθεση με το στάδιο του LM5175, ο TPS5430 δεν χρησιμοποιεί εξωτερική αντίσταση μέτρησης ρεύματος για τον καθορισμό του ορίου ρεύματος. Ο περιορισμός υπερέντασης υλοποιείται εσωτερικά, μέσω παρακολούθησης του ρεύματος στο ενσωματωμένο high-side MOSFET[37]. Έτσι, σε συνθήκες υπερφόρτισης ή βραχυκυκλώματος, ο μετατροπέας περιορίζει το ρεύμα και προστατεύει τόσο το ίδιο το ολοκληρωμένο όσο και τη γραμμή των 5 V.

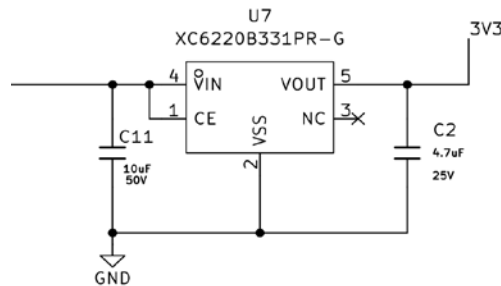


Σχήμα 4-7. Κύκλωμα μετατροπής 12V σε 5V

4.3.7 Γραμμή τροφοδοσίας 3.3V

Η γραμμή 3V3 παράγεται από τη γραμμή 5 V μέσω του γραμμικού σταθεροποιητή XC6220B331PR-G (U7). Ο συγκεκριμένος LDO χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των ψηφιακών ολοκληρωμένων και λογικών σημάτων χαμηλής τάσης, όπως οι μικροελεγκτές ESP32 και STM32, οι transceivers επικοινωνίας και βοηθητικά κυκλώματα ελέγχου. Η χρήση γραμμικού σταθεροποιητή στο τελευταίο στάδιο τροφοδοσίας επιλέχθηκε επειδή παρέχει χαμηλότερο θόρυβο εξόδου σε σχέση με έναν επιπλέον switching μετατροπέα, στοιχείο σημαντικό για τη σταθερή λειτουργία των ψηφιακών κυκλωμάτων.

Το XC6220 έχει δυνατότητα παροχής ρεύματος έως 1 A, λειτουργία χαμηλού θορύβου, συμβατότητα με κεραμικούς πυκνωτές χαμηλού ESR, καθώς και ενσωματωμένη προστασία υπερέντασης, θερμική προστασία και κύκλωμα περιορισμού ρεύματος εκκίνησης[36]. Στο κύκλωμα της πλακέτας χρησιμοποιούνται πυκνωτές αποσύζευξης στην είσοδο και στην έξοδο του LDO, συγκεκριμένα ο C11 = 10 μF στην είσοδο και ο C2 = 4,7 μF στην έξοδο των 3,3 V ακολουθώντας τις οδηγίες του κατασκευαστή[36], ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του ρυθμιστή και η μείωση τοπικών διαταραχών στην τροφοδοσία.



Σχήμα 4-8. Κύκλωμα μετατροπής 5V σε 3.3V

4.3.8 Οπίσθιος φωτισμός οθόνης

Εκτός από τις βασικές γραμμές 12 V, 5 V και 3,3 V, η πλακέτα περιλαμβάνει ξεχωριστή βαθμίδα τροφοδοσίας για τον φωτισμό της οθόνης. Η βαθμίδα αυτή βασίζεται στον TPS61169 (U9), ο οποίος είναι οδηγός LED τύπου boost converter για εφαρμογές backlight. Το ολοκληρωμένο τροφοδοτείται από τη γραμμή 5 V και μπορεί να ανυψώσει την τάση εξόδου, ώστε να οδηγήσει σειρά LED με μεγαλύτερη απαιτούμενη τάση από την τάση εισόδου. Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του, ο TPS61169 διαθέτει ενσωματωμένο MOSFET 40 V, λειτουργεί σε συχνότητα μεταγωγής 1,2 MHz, μπορεί να οδηγήσει LED string έως 38 V και ρυθμίζει το ρεύμα των LED μέσω τάσης αναφοράς 204 mV στον ακροδέκτη FB[8].

Στο κύκλωμα της πλακέτας, ο TPS61169 συνεργάζεται με το πηνίο $L1 = 4,7 \mu\text{H}$, τη δίοδο Schottky D29 = SS34, τον πυκνωτή εισόδου $C22 = 4,7 \mu\text{F}$ και τον πυκνωτή εξόδου $C13 = 1 \mu\text{F}$. Κατά τη λειτουργία του μετατροπέα, όταν το εσωτερικό MOSFET του TPS61169 άγει, αποθηκεύεται ενέργεια στο πηνίο L1. Όταν το MOSFET απενεργοποιείται, η ενέργεια του πηνίου μεταφέρεται μέσω της Schottky δίοδου D29 προς την έξοδο, φορτίζοντας τον πυκνωτή εξόδου και τροφοδοτώντας τα LED του backlight. Η έξοδος του κυκλώματος εμφανίζεται ως VLEDA, ενώ η επιστροφή του ρεύματος των LED γίνεται από τη γραμμή VLEDK.

Το ρεύμα του backlight καθορίζεται από την αντίσταση αίσθησης ρεύματος που συνδέεται από τον ακροδέκτη FB προς τη γείωση. Ο TPS61169 ρυθμίζει την τάση στον FB περίπου στα 204 mV, επομένως το ρεύμα των LED δίνεται από τη σχέση:

$$I_{LED} = \frac{V_{FB}}{R_{SET}} \quad (4.9)$$

Στο σχέδιο χρησιμοποιείται η $R23 = 8,2 \Omega$, ενώ υπάρχουν επιπλέον οι $R34 = 8,2 \Omega$ και $R35 = 3 \Omega$ μέσω των γεφυρών JP49 και JP50, ώστε το τελικό ρεύμα να μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με την επιθυμητή φωτεινότητα σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί διαφορετική οθόνη. Με ενεργές και τις τρεις αντιστάσεις, η ισοδύναμη αντίσταση είναι:

$$R_{SET} = 8,2\Omega \parallel 8,2\Omega \parallel 3 = 1,73\Omega \quad (4.10)$$

Άρα το μέγιστο ρεύμα του backlight είναι περίπου:

$$I_{LED} = \frac{0,204V}{1,73\Omega} = 0,117A \quad (4.11)$$

δηλαδή περίπου 118 mA. Η τιμή αυτή καλύπτει απόλυτα τις ονομαστικές προδιαγραφές του κατασκευαστή της οθόνης, ο οποίος ορίζει τυπικό ρεύμα οδήγησης τα 120 mA για τα 18 ενσωματωμένα LED [26]

Η ρύθμιση της φωτεινότητας γίνεται μέσω του ακροδέκτη CTRL του TPS61169, στον οποίο εφαρμόζεται το σήμα PWM brightness~ μέσω της αντίστασης $R33 = 100 \Omega$. Παράλληλα, η $R36 = 10 \text{ k}\Omega$ λειτουργεί ως pull-up προς τα 3,3 V, ώστε ο ακροδέκτης CTRL να έχει προκαθορισμένη στάθμη όταν το σήμα ελέγχου δεν οδηγείται ακόμη από τον μικροελεγκτή κατά την εκκίνηση. Με την εφαρμογή σήματος PWM συχνότητας από 5 kHz έως 100 kHz, για 100% duty cycle η τάση FB είναι περίπου 204 mV και το backlight λειτουργεί στο μέγιστο ρυθμισμένο ρεύμα. Για μικρότερο duty cycle, η τάση αναφοράς μειώνεται αναλογικά:

$$V_{FB} = Duty * 204mV \quad (4.12)$$

όπου το Duty εκφράζεται ως λόγος από 0 έως 1. Για παράδειγμα, με 50% duty cycle:

$$V_{FB} = 0,5 \cdot 204mV = 102mV \quad (4.13)$$

Η τροφοδοσία του ESP32-S3 γίνεται από τη γραμμή 3V3, η οποία παράγεται από τον γραμμικό σταθεροποιητή που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για την ορθή λειτουργία του module απαιτείται τοπική αποσύζευξη της τροφοδοσίας κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας, ώστε να περιορίζονται οι βυθίσεις τάσης που μπορούν να προκληθούν από στιγμιαίες μεταβολές κατανάλωσης, ειδικά κατά τη λειτουργία της οθόνης και των περιφερειακών επικοινωνίας.

Για τον προγραμματισμό, σειριακή επικοινωνία με υπολογιστή και αποσφαλμάτωση έχει τοποθετηθεί θύρα USB Type-C που λειτουργεί μέσω του ενσωματωμένου USB περιφερειακού του μικροελεγκτή. Η θύρα υλοποιείται με τον κονέκτορα USB1 TYPEC-303-ACP16. Στις γραμμές USB_P και USB_N έχει τοποθετηθεί το κύκλωμα προστασίας USBLC6-2P6 (U17), το οποίο προστατεύει το USB interface από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και γρήγορες μεταβατικές υπερτάσεις. Στο PCB layout οι διαφορικές γραμμές USB_P/USB_N δρομολογούνται ως ζεύγος ελεγχόμενης εμπέδησης, με στόχο διαφορική εμπέδηση 90 Ω, όπως απαιτείται για τη σωστή μετάδοση των σημάτων USB. Η συμμετρική δρομολόγηση, το κοντινό μήκος των δύο γραμμών και η συνεχής διαδρομή επιστροφής μέσω του επιπέδου γείωσης περιορίζουν τις ανακλάσεις και τη διαφορική ασυμμετρία του σήματος. Οι αντιστάσεις $R25 = 5,1 \text{ k}\Omega$ και $R26 = 5,1 \text{ k}\Omega$ συνδέονται στις γραμμές CC του USB Type-C και λειτουργούν ως pull-down αντιστάσεις αναγνώρισης συσκευής, ώστε η πλακέτα να αναγνωρίζεται σωστά ως USB device από τον υπολογιστή ή τον φορτιστή.

Για την επανεκκίνηση και τον προγραμματισμό του ESP32-S3 έχουν προβλεφθεί ξεχωριστά κυκλώματα reset και boot. Η γραμμή esp_RST διαθέτει pull-up αντίσταση $R28 = 10 \text{ k}\Omega$ προς τα 3,3 V και συνδέεται στο πλήκτρο SW6, το οποίο όταν πατηθεί οδηγεί τη γραμμή reset στη γείωση και προκαλεί επανεκκίνηση του μικροελεγκτή. Αντίστοιχα η γραμμή esp_boot0 διαθέτει pull-up αντίσταση $R7 = 10 \text{ k}\Omega$ προς τα 3,3 V και συνδέεται στο πλήκτρο SW7. Όταν το πλήκτρο BOOT κρατηθεί πατημένο κατά την επανεκκίνηση, δηλαδή τη στιγμή που παίρνει τροφοδοσία ο μικροελεγκτής, εισέρχεται σε λειτουργία bootloader επιτρέποντας τη φόρτωση firmware μέσω USB. Σε κανονική λειτουργία η pull-up αντίσταση κρατά τη γραμμή σε υψηλή στάθμη ώστε η εκκίνηση να γίνεται από την Flash.

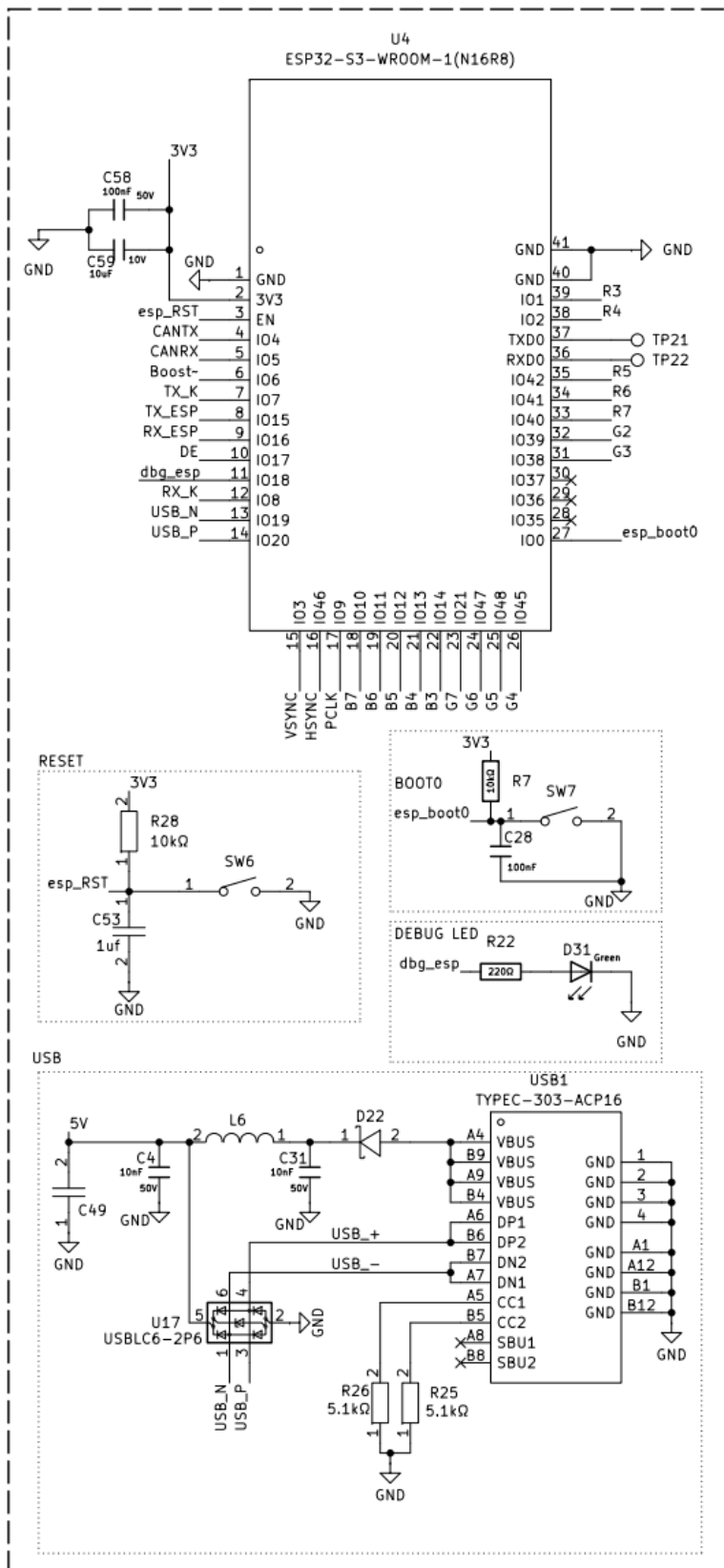
Ο ακροδέκτης GPIO18 οδηγεί το debug LED μέσω της αντίστασης περιορισμού ρεύματος $R22 = 220 \Omega$. Η έξοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το firmware για απλή οπτική ένδειξη κατάστασης, όπως επιτυχής εκκίνηση, λειτουργία κύριου βρόχου, σφάλμα επικοινωνίας ή άλλη διαγνωστική πληροφορία κατά τη φάση ανάπτυξης και δοκιμών. Η χρήση ενός απλού debug LED είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε ενσωματωμένα συστήματα, επειδή παρέχει άμεση οπτική ένδειξη λειτουργίας ακόμη και όταν δεν υπάρχει συνδεδεμένο σειριακό τερματικό ή debugger.

Η κατανομή των ακροδεκτών έχει γίνει με βάση τις απαιτήσεις των βασικών υποσυστημάτων. Για την επικοινωνία με την ECU μέσω K-line χρησιμοποιείται η θύρα UART2[15], με τα σήματα GPIO7 και GPIO8 προς τον transceiver L9637D[17]. Η επικοινωνία αυτή λειτουργεί στα 9600 baud, με διαμόρφωση 8E1, δηλαδή 8 bit δεδομένων, even parity και 1 stop bit. Μέσω αυτής της διεπαφής ο ESP32-S3 λαμβάνει δεδομένα από την ECU του αυτοκινήτου όπως στροφές κινητήρα, θέση πεταλούδας εισαγωγής, θερμοκρασία ψυκτικού υγρού και θερμοκρασία λαδιού. Για την επικοινωνία με τον STM32 χρησιμοποιείται η θύρα UART1 μέσω των ακροδεκτών GPIO15 (TX) και GPIO16 (RX). Η λήψη δεδομένων από το wideband controller πραγματοποιείται μέσω του ενσωματωμένου περιφερειακού TWAI του ESP32-S3[15], δηλαδή του ελεγκτή CAN μέσω των ακροδεκτών GPIO4 και GPIO5 ως γραμμές TX και RX προς τον CAN transceiver. Η επικοινωνία γίνεται σε δίαυλο CAN 2.0A με ταχύτητα 500 kbit/s[39], ενώ η εφαρμογή λειτουργεί σε normal mode λογική, καθώς ο ESP32-S3

Κεφάλαιο 4

λαμβάνει τα δεδομένα του wideband και απαντάει με πακέτα ack. Η παράλληλη διεπαφή RGB565 χρησιμοποιεί 16 γραμμές δεδομένων, δηλαδή 5 bit για το κόκκινο, 6 bit για το πράσινο και 5 bit για το μπλε χρώμα, καθώς και τα σήματα συγχρονισμού VSYNC, HSYNC, DE και PCLK.

Εκτός από τις διεπαφές επικοινωνίας, ο ESP32-S3 παράγει και σήματα ελέγχου. Η έξοδος για το boost solenoid παράγεται μέσω περιφερειακού LEDC PWM στο GPIO6[15], με συχνότητα που μπορεί να ρυθμιστεί από 10 Hz έως 50 Hz και duty cycle από 0% έως 100%. Το PWM σήμα οδηγεί το MOSFET driver U6 το οποίο με τη σειρά του οδηγεί το MOSFET ισχύος Q7 (IRFZ44N)[16].



Σχήμα 4-10. Συνδεσμολογία και κυκλώματα Μικροελεγκτή ESP32

4.5 Δευτερεύων μικροελεγκτής STM32: αισθητήρες, GPS, πλήκτρα

Εκτός από τον κύριο ελεγκτή ESP32-S3, η πλακέτα περιλαμβάνει και δεύτερο μικροελεγκτή, τον STM32F401RET6 (U10), ο οποίος λειτουργεί ως βοηθητικός για την επέκταση εισόδων/εξόδων και προεπεξεργασία δεδομένων. Ο STM32F401RET6 βασίζεται σε πυρήνα Arm Cortex-M4 με FPU, μέγιστη συχνότητα λειτουργίας 84 MHz, μνήμη Flash έως 512 kB και SRAM έως 96 kB[31]. Διαθέτει ADC 12 bit, πολλαπλές διεπαφές USART, SPI και I²C, καθώς και δυνατότητα προγραμματισμού και αποσφαλμάτωσης μέσω SWD/JTAG[31]. Τα χαρακτηριστικά αυτά τον καθιστούν κατάλληλο για το ρόλο του δευτερεύοντος μικροελεγκτή.

Η τροφοδοσία του STM32 γίνεται από τη γραμμή 3V3, καθώς τόσο ο πυρήνας όσο και οι είσοδοι/έξοδοι του μικροελεγκτή λειτουργούν σε λογικές στάθμες 3,3 V. Έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές αποσύζευξης κοντά στους ακροδέκτες τροφοδοσίας του μικροελεγκτή ώστε να περιορίζονται οι τοπικές διαταραχές και οι στιγμιαίες πτώσεις τάσης κατά τη λειτουργία των περιφερειακών. Παράλληλα, χρησιμοποιείται εξωτερικός κρύσταλλος 8 MHz (X1) με τους αντίστοιχους πυκνωτές φορτίου C25,C24 = 20pf, ώστε να παρέχεται σταθερή πηγή χρονισμού για τον μικροελεγκτή.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ο ακροδέκτης VCAP1 του STM32. Ο πυκνωτής που συνδέεται στον VCAP δεν αποτελεί απλό πυκνωτή αποσύζευξης της γραμμής 3,3 V, αλλά χρησιμοποιείται για τη σταθεροποίηση του εσωτερικού γραμμικού ρυθμιστή τάσης του μικροελεγκτή, ο οποίος παράγει την εσωτερική τάση τροφοδοσίας του πυρήνα. Για τον λόγο αυτό απαιτείται πυκνωτής χαμηλού ESR, τυπικά 2,2 μF, τοποθετημένος όσο το δυνατόν πιο κοντά στον ακροδέκτη VCAP και στη γείωση. Η ST ορίζει για τους ακροδέκτες VCAP_1 εξωτερικό πυκνωτή CEXT = 2,2 μF με ESR < 2 Ω [31], ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα του εσωτερικού regulator.

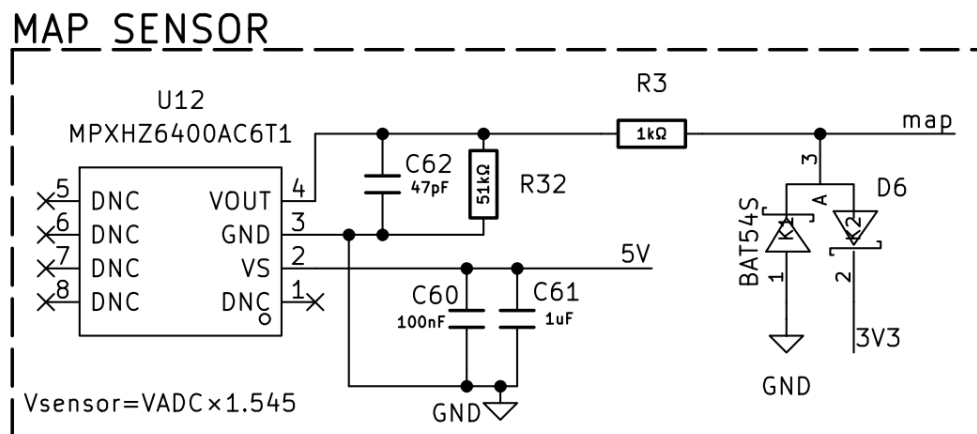
Το κύκλωμα reset του STM32 βασίζεται στη γραμμή stm_RST, η οποία συνδέεται στον ακροδέκτη NRST του μικροελεγκτή. Μέσω του πλήκτρου reset SW5 η γραμμή reset μπορεί να οδηγηθεί χειροκίνητα στη γείωση προκαλώντας επανεκκίνηση του μικροελεγκτή. Η ύπαρξη χειροκίνητου reset είναι χρήσιμη κατά τη φάση ανάπτυξης, δοκιμών και αποσφαλμάτωσης, καθώς επιτρέπει την άμεση επανεκκίνηση του δευτερεύοντος μικροελεγκτή χωρίς αποσύνδεση της τροφοδοσίας. Η γραμμή reset οδηγείται επίσης στη θύρα προγραμματισμού, ώστε ο προγραμματιστής ST-Link να μπορεί να ελέγχει την επαναφορά του μικροελεγκτή κατά τη διαδικασία φόρτωσης firmware.

Για τον προγραμματισμό και την αποσφαλμάτωση του STM32 έχει προβλεφθεί θύρα ST-Link/SWD μέσω του κονέκτορα U8. Στον κονέκτορα αυτό οδηγούνται τα βασικά σήματα stm_SWDIO, stm_SWCLK, stm_RST, καθώς και οι γραμμές 3V3 και GND. Η διεπαφή SWD επιτρέπει τον προγραμματισμό της Flash μνήμης του STM32, την εκτέλεση debug σε πραγματικό χρόνο, την ανάγνωση καταχωρητών και τη διάγνωση σφαλμάτων κατά την ανάπτυξη του firmware.

Ένα ενδεικτικό debug LED (D32) έχει τοποθετηθεί σε ακροδέκτη του STM32 (PB0) με αντίσταση περιορισμού ρεύματος R38 = 220 Ω. Το LED μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το firmware για ένδειξη κατάστασης, όπως για παράδειγμα επιτυχής εκκίνηση, λειτουργία κύριου βρόχου, σφάλμα επικοινωνίας ή κατάσταση αναμονής.

Η επικοινωνία μεταξύ STM32 και ESP32 γίνεται μέσω σειριακής θύρας UART. Χρησιμοποιούνται οι ακροδέκτες PA9 και PA10 του STM32, οι οποίοι αντιστοιχούν στο USART1[31]. Η γραμμή PA9 λειτουργεί ως έξοδος μετάδοσης προς τον ESP32, ενώ η PA10 ως είσοδος λήψης από τον ESP32. Η επικοινωνία λειτουργεί στα 115200 baud με διαμόρφωση 8N1, δηλαδή 8 bit δεδομένων, χωρίς parity και με 1 stop bit. Μέσω αυτής της σύνδεσης ο STM32 αποστέλλει στον ESP32 πακέτα μετρήσεων, ενώ μπορεί να λαμβάνει εντολές ελέγχου για λειτουργίες όπως η ψηφιακή έξοδος και το shift-light.

Οι αναλογικές εισοδοί του STM32 αξιοποιούνται για τη μέτρηση σημάτων αισθητήρων και τάσεων μέσω του εσωτερικού ADC 12-bit (ανάλυσης 0–4095)[31]. Ο ακροδέκτης PC0 χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τον αισθητήρα απόλυτης πίεσης (MAP). Για την εφαρμογή επιλέχθηκε ο προηγμένος πιεζοαντιστατικός μετατροπέας MPXH6400A, ο οποίος μετρά απόλυτη πίεση από 20 έως 400 kPa[21]. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας παράγει αναλογική τάση εξόδου που αυξάνεται γραμμικά με την πίεση, αποδίδοντας τυπικά 0.2V στην ελάχιστη πίεση και 4.8V στη μέγιστη[21]. Επειδή η τάση αυτή υπερβαίνει τα όρια των 3.3V του μικροελεγκτή, το σήμα προσαρμόζεται κατάλληλα μέσω δικτύου διαιρέτη τάσης πριν οδηγηθεί στο ADC. Αντίστοιχα, οι ακροδέκτες PC1 και PC2 χρησιμοποιούνται ως γενικές αναλογικές εισοδοί 0–5 V μέσω διαιρετών τάσης 12 kΩ / 22 kΩ, ενώ η μέτρηση της τάσης μπαταρίας γίνεται από τον ακροδέκτη PC3 μέσω διαιρέτη 47 kΩ / 10 kΩ, επιτρέποντας μετρήσεις έως 18.8 V. Για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος στο ηλεκτρικά θορυβώδες περιβάλλον του οχήματος, όλες οι παραπάνω αναλογικές εισοδοί προστατεύονται από στιγμιαίες υπερτάσεις μέσω κυκλωμάτων ψαλιδιστή τάσης (voltage clippers) με χρήση διπλοδιόδων Schottky τύπου BAT54S [11], τα οποία αποτρέπουν την υπέρβαση των ασφαλών ορίων τάσης στους ακροδέκτες του μικροελεγκτή.



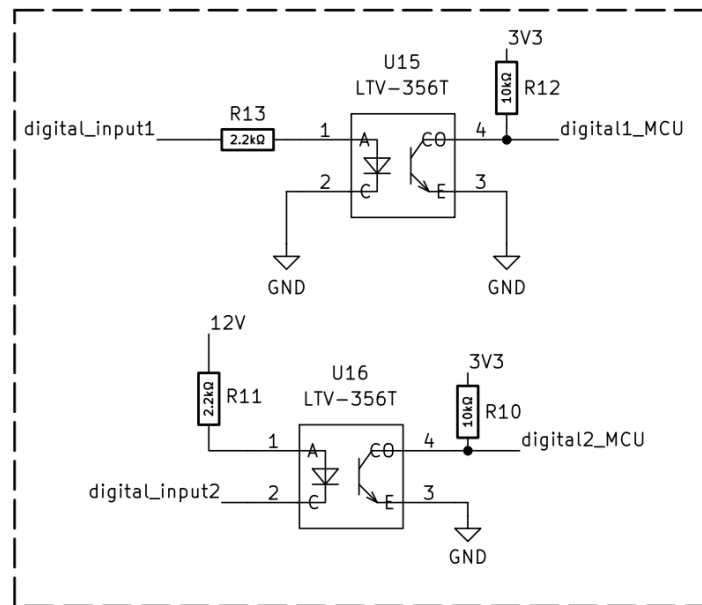
Σχήμα 4-11.Κύκλωμα αισθητήρα πίεσης εισαγωγής (MAP)

Το GPS module συνδέεται επίσης στον STM32 μέσω της σειριακής θύρας USART6[31], με τα σήματα PA11 προς το RX του GPS module και PA12 από το TX του GPS module. Η τροφοδοσία του γίνεται από τη γραμμή των 5V.

Για τον χειρισμό του συστήματος χρησιμοποιούνται τέσσερα πλήκτρα. Συγκεκριμένα, τα πλήκτρα Back, Down, Up και Enter συνδέονται αντίστοιχα στους ακροδέκτες PA0, PA1, PA4 και PA8. Τα πλήκτρα λειτουργούν με λογική active low, δηλαδή η είσοδος βρίσκεται σε υψηλή στάθμη μέσω εσωτερικού pull-up όταν το πλήκτρο δεν πατιέται και οδηγείται στη γείωση όταν πατηθεί, και έτσι ο μικροελεγκτής διαβάζει κατάσταση LOW. Η χρήση εσωτερικού pull-up απλοποιεί το hardware, καθώς κάθε πλήκτρο χρειάζεται μόνο σύνδεση προς τη γείωση, ενώ η ανίχνευση πατήματος γίνεται από το firmware χωρίς να απαιτείται hardware debounce.

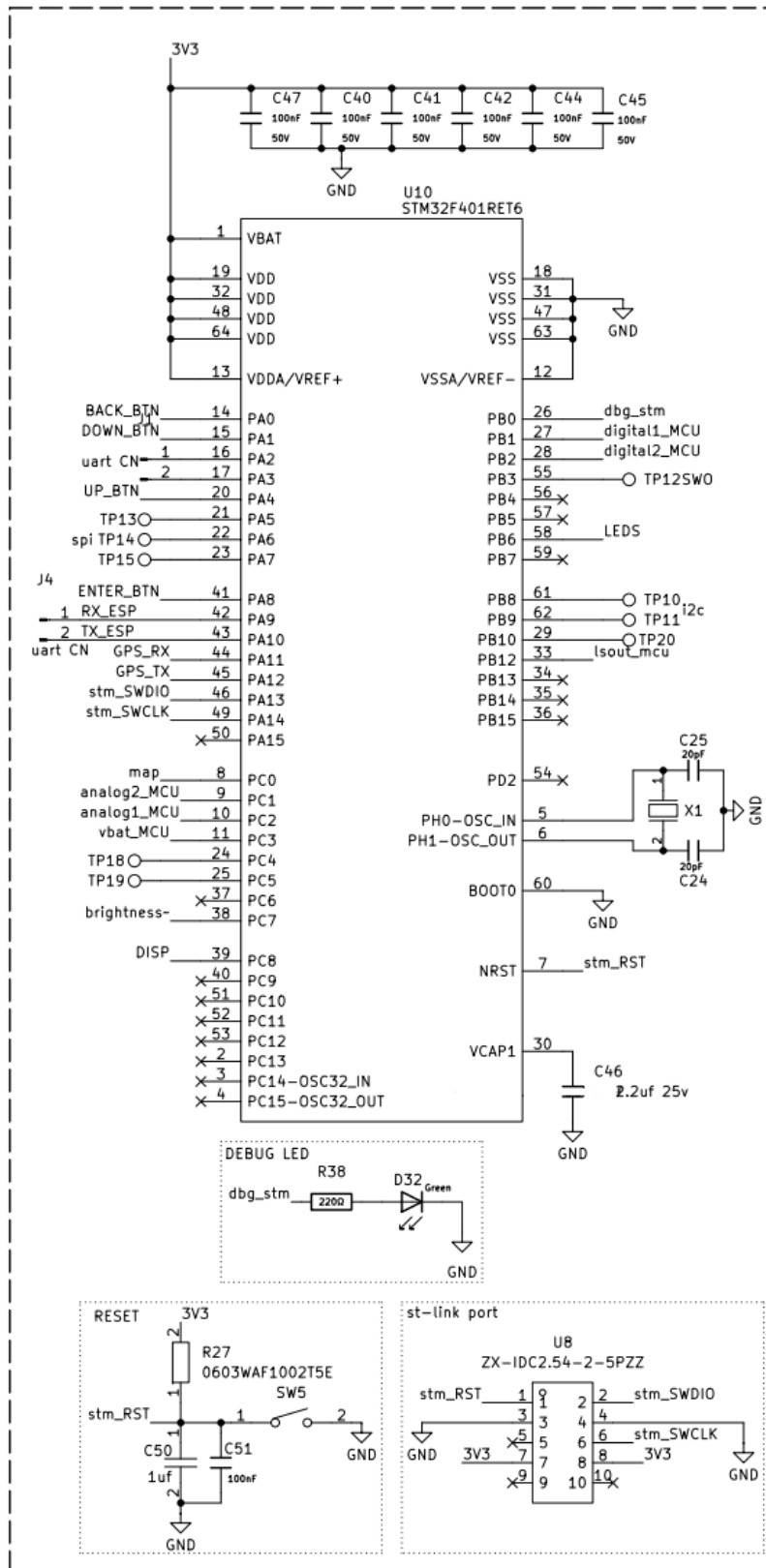
Επιπλέον, ο STM32 διαθέτει δύο ψηφιακές εισόδους, οι οποίες οδηγούνται μέσω οπτοζευκτών LTV-356T[25] για προστασία και προσαρμογή των εξωτερικών σημάτων στις λογικές στάθμες των 3,3 V. Η είσοδος digital_input1 οδηγεί το LED του οπτοζεύκτη U15 μέσω της αντίστασης R13 = 2,2 kΩ, ενώ η έξοδος digital1_MCU διαθέτει pull-up R12 = 10 kΩ προς τα 3,3 V. Αντίστοιχα, η είσοδος digital_input2 υλοποιείται μέσω του οπτοζεύκτη U16, με αντίσταση εισόδου R11 = 2,2 kΩ και pull-up εξόδου R10 =

10 kΩ. Όταν ενεργοποιείται η LED του αντίστοιχου οπτοζεύκτη, το φωτοτρανζίστορ άγει και οδηγεί τη γραμμή του STM32 σε χαμηλή στάθμη. Επομένως, οι δύο ψηφιακές εισοδοι διαβάζονται από τον μικροελεγκτή με λογική active-low, ενώ όταν είναι ανενεργές παραμένουν σε υψηλή στάθμη μέσω των εξωτερικών pull-up αντιστάσεων. Η είσοδος digital_input1 μπορεί να δεχθεί θετικό σήμα 12 V ενώ η είσοδος digital_input2 μπορεί να δεχθεί σήμα γείωσης. Οι εισοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξωτερικά σήματα κατάστασης, διακόπτες ή άλλες ψηφιακές πληροφορίες από το όχημα όπως ένας hall effect αισθητήρας ταχύτητας.



Σχήμα 4-12. Κύκλωμα ψηφιακών εισόδων με οπτοζεύκτες

Ο ακροδέκτης PB12 χρησιμοποιείται ως ψηφιακή έξοδος ελεγχόμενη από τον ESP32, ενώ το PB6 οδηγεί αλυσίδα WS2812B LED για λειτουργία shift-light. Τα WS2812B είναι διευθυνσιοδοτούμενα RGB LED, στα οποία το χρώμα και η φωτεινότητα κάθε LED καθορίζονται σειριακά από ένα ψηφιακό σήμα δεδομένων[35]. Ο STM32 αποστέλλει διαδοχικά τα δεδομένα των LED μέσω μίας γραμμής, οπότε δεν απαιτούνται ξεχωριστές έξοδοι για κάθε LED. Έτσι, η ένδειξη shift-light μπορεί να μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα ή την εντολή που λαμβάνεται από τον ESP32. Το σήμα brightness~ του ακροδέκτη PC7 χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της φωτεινότητας του backlight της οθόνης μέσω PWM, όπως αναλύθηκε στην ενότητα της τροφοδοσίας του backlight.



Σχήμα 4-13. Συνδεσμολογία και κυκλώματα Μικροελεγκτή STM32

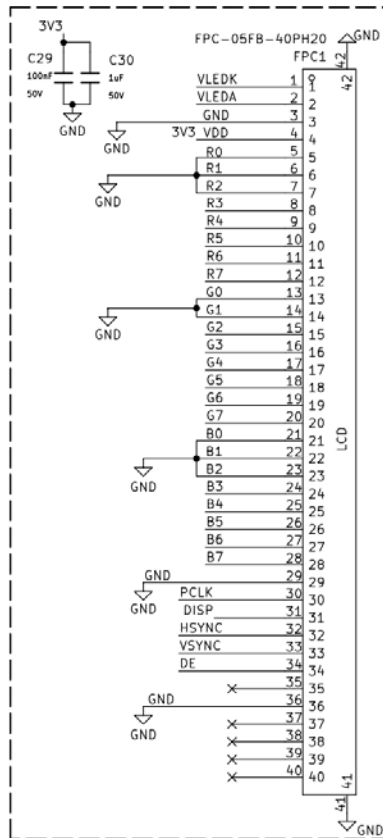
4.6 Υποσύστημα οθόνης RGB LCD

Η οπτική διεπαφή με το σύστημα γίνεται μέσω έγχρωμη οθόνης TFT LCD 5.0 ιντσών με ανάλυση 800×480 pixels. Η οθόνη διαθέτει παράλληλη διεπαφή RGB 24-bit, βάθος χρώματος 16,7 εκατομμυρίων χρωμάτων σε ενεργή περιοχή $108 \times 64,80$ mm. Οι συνολικές διαστάσεις της οθόνης συμπεριλαμβανομένου του περιγράμματος της είναι $120,7 \times 75,9 \times 3$ mm. Το backlight αποτελείται από 18 LED[26].

Η σύνδεση της οθόνης με την πλακέτα πραγματοποιείται μέσω FPC connector 40 ακροδεκτών (FPC1). Η διάταξη των ακροδεκτών της οθόνης περιλαμβάνει τις γραμμές τροφοδοσίας του backlight VBL+ και VBL-, τη λογική τροφοδοσία VDD (3,3V), γραμμές γείωσης, τις γραμμές δεδομένων R0-R7, G0-G7, B0-B7, καθώς και τα σήματα ελέγχου CLK, DISP, HSYNC, VSYNC και DE[26]. Παρότι η οθόνη διαθέτει είσοδο RGB 24-bit, χρησιμοποιείται διαμόρφωση RGB565 δηλαδή 16-bit χρώματος. Με τη συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιούνται 5 bit για το κόκκινο, 6 bit για το πράσινο και 5 bit για το μπλε, με αποτέλεσμα συνολικό βάθος 65.536 χρωμάτων. Οι υπολοιπούμενοι ακροδέκτες δεδομένων συνδέονται στη γείωση. Η επιλογή RGB565 μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων ακροδεκτών από 24 σε 16 περιορίζοντας την πολυπλοκότητα της δρομολόγησης γραμμών στο PCB και τον αριθμό των GPIO που δεσμεύονται από τον ESP32-S3, παραμένοντας επαρκή για την εφαρμογή.

Για το μπλε κανάλι δεδομένων χρησιμοποιούνται οι γραμμές B3-B7, για το πράσινο οι G2-G7 και για το κόκκινο οι R3-R7. Η αντιστοίχιση με τους ακροδέκτες του ESP32-S3 γίνεται ως εξής: B3-B7 στα GPIO 14, 13, 12, 11, 10, G2-G7 στα GPIO 39, 38, 45, 48, 47, 21 και R3-R7 στα GPIO 1, 2, 42, 41, 40. Τα σήματα ελέγχου είναι το DE στο GPIO17, το PCLK στο GPIO9, το VSYNC στο GPIO3 και το HSYNC στο GPIO46. Το DISP χρησιμοποιείται ως σήμα ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της οθόνης από την πλευρά του panel και οδηγείται μόνιμα σε κατάσταση HIGH από τον STM32 (PC8) ώστε να είναι πάντα ενεργοποιημένη η έξοδος.

Κατά τη σχεδίαση του PCB layout, η παράλληλη RGB διεπαφή αντιμετωπίστηκε ως ομάδα ψηφιακών σημάτων υψηλής ταχύτητας. Οι γραμμές RGB και συγχρονισμού πρέπει να δρομολογούνται με όσο το δυνατόν μικρότερα μήκη, με συνεχή διαδρομή επιστροφής γείωσης, ώστε να περιορίζονται οι ανακλάσεις και η χωρητική σύζευξη μεταξύ γειτονικών γραμμών. Αν και η συχνότητα των 25 MHz[26] δεν απαιτεί αυστηρή προσαρμογή μήκους αντίστοιχη με πολύ ταχύτερους διαύλους, η ομαδοποιημένη και συμμετρική δρομολόγηση των σημάτων συμβάλλει στη σταθερή λειτουργία της οθόνης. Η επιλογή των ακροδεκτών σημάτων άλλαξε αρκετές φορές ώστε να είναι σωστά ομαδοποιημένα και να μην περνούν σε δεύτερο layer.



Σχήμα 4-14. Συνδεσμολογία οθόνης με FPC connector

4.7 K-line interface

Το υποσύστημα K-line της πλακέτας χρησιμοποιείται για τη σειριακή επικοινωνία με την εργοστασιακή ECU του οχήματος. Η K-line είναι γραμμή επικοινωνίας μονού καλωδίου, η οποία λειτουργεί σε στάθμες που σχετίζονται με την τάση μπαταρίας του οχήματος και όχι με τις λογικές στάθμες 3,3 V του μικροελεγκτή. Για τον λόγο αυτό, η σύνδεση του ESP32-S3 με την ECU δεν γίνεται απευθείας, αλλά μέσω ειδικού transceiver. Για τη διεπαφή αυτή επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο E-L9637D013TR (U5). Ο L9637 είναι μονολιθικός οδηγός διαύλου για εφαρμογές ISO 9141, σχεδιασμένος για αμφίδρομη σειριακή επικοινωνία σε διαγνωστικά συστήματα οχημάτων[17]. Διαθέτει ξεχωριστή πλευρά λογικής τροφοδοσίας και πλευρά διαύλου οχήματος, επιτρέποντας τη μετατροπή μεταξύ των σημάτων UART του ESP32-S3 και της γραμμής K-line της ECU. Η επικοινωνία με τον ESP32-S3 γίνεται μέσω της θύρας UART2 και τους ακροδέκτες GPIO7 για το TX και GPIO8 για το RX.

Ο ακροδέκτης VCC του L9637 συνδέεται στα 3,3 V, ώστε τα σήματα TX και RX να είναι συμβατά με τις λογικές στάθμες του ESP32-S3. Για την τοπική αποσύζευξη της λογικής τροφοδοσίας έχουν τοποθετηθεί οι πυκνωτές C17 = 100 nF και C20 = 1 μF, ώστε να μειώνονται τοπικές διαταραχές στην τροφοδοσία του transceiver.

Η πλευρά διαύλου του transceiver τροφοδοτείται από τη γραμμή Vbatt_protected, μέσω του ακροδέκτη VS. Η τροφοδοσία αυτή αντιστοιχεί στην προστατευμένη γραμμή μπαταρίας της πλακέτας και χρησιμοποιείται ως αναφορά για τις στάθμες της K-line. Στον ακροδέκτη VS υπάρχει τοπικός πυκνωτής αποσύζευξης C16 = 100 nF.

Κεφάλαιο 4

Ο ακροδέκτης K του L9637 συνδέεται στον ακροδέκτη του κεντρικού κονέκτορα της πλακέτας J2, και μέσω αυτού γίνεται η σύνδεση με τη γραμμή K-LINE της ECU. Στον ακροδέκτη K έχει τοποθετηθεί αντίσταση pull-up $R_{24} = 510 \Omega$ προς τη γραμμή Vbatt_protected. Η αντίσταση αυτή κρατά τη γραμμή σε υψηλή στάθμη όταν κανένα κύκλωμα δεν την οδηγεί χαμηλά, ενώ παράλληλα περιορίζει το ρεύμα όταν ο transceiver ή η ECU τραβήξει τη γραμμή προς τη γείωση. Σε ονομαστική τάση οχήματος, το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση pull-up όταν η γραμμή οδηγείται σε χαμηλή στάθμη μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$I_K = \frac{V_{BATT}}{R_{24}} \quad (4.14)$$

Για τάση 12 V:

$$I_K = \frac{12V}{510\Omega} = 23,5mA \quad (4.15)$$

ενώ για τάση φόρτισης περίπου 14 V:

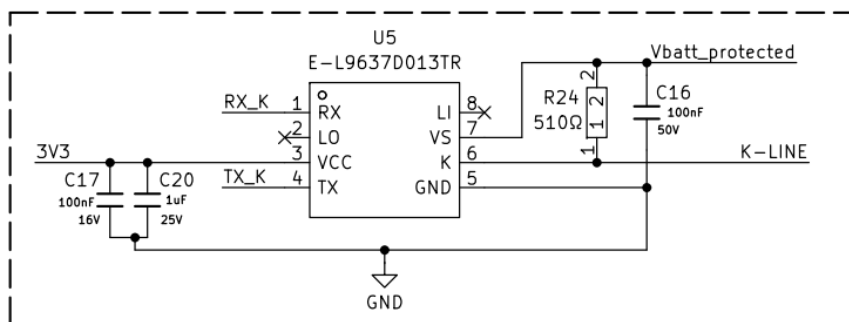
$$I_K = \frac{14V}{510\Omega} = 27,5mA \quad (4.16)$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην R24 στη δεύτερη περίπτωση είναι:

$$P_{R24} = \frac{V^2}{R} = \frac{14^2}{510} = 0,38W \quad (4.17)$$

Επομένως για την R24 επιλέχθηκε αντίσταση ισχύος 1 W, παρέχοντας επαρκές θερμικό περιθώριο σε σχέση με την υπολογισμένη απώλεια ισχύος κατά την ονομαστική λειτουργία.

Η λειτουργία της K-line βασίζεται σε λογική τύπου ενεργής χαμηλής στάθμης. Όταν το ESP32-S3 μεταδίδει δεδομένα, το σήμα TX_K οδηγεί την είσοδο TX του L9637. Ο transceiver μετατρέπει το λογικό σήμα σε κατάλληλη οδήγηση της γραμμής K, τραβώντας τη γραμμή προς τη γείωση όταν απαιτείται χαμηλή στάθμη. Όταν η γραμμή δεν οδηγείται χαμηλά, η R24 την επαναφέρει σε υψηλή στάθμη κοντά στην τάση μπαταρίας. Αντίστροφα, όταν η ECU μεταδίδει δεδομένα στην K-line, ο L9637 ανιχνεύει τη στάθμη στον ακροδέκτη K και παράγει αντίστοιχο λογικό σήμα στον ακροδέκτη RX, το οποίο διαβάζεται από τον ESP32-S3. Το σήμα K του transceiver έχει κατώφλια εισόδου εξαρτώμενα από την τάση VS, με χαμηλή στάθμη κάτω από περίπου $0,45 \cdot VS$ και υψηλή στάθμη πάνω από περίπου $0,55 \cdot VS$ για την περιοχή 4,5–18 V [17]. Ο L9637 έχει εύρος τροφοδοσίας $VS = 4,5-36 V$, αντοχή σε transient τροφοδοσίας έως 40 V, προστασία από ανάστροφη τροφοδοσία έως $-24 V$, καθώς και μεγάλο εύρος τάσης στον ακροδέκτη K από $-24 V$ έως VS. Επιπλέον διαθέτει περιορισμό ρεύματος στην έξοδο K και θερμική προστασία που απενεργοποιεί την έξοδο K σε περίπτωση υπερθέρμανσης, αποτρέποντας την καταστροφή του ολοκληρωμένου [17].



Σχήμα 4-15. Κύκλωμα για τη διασύνδεση με το πρωτόκολλο K-LINE

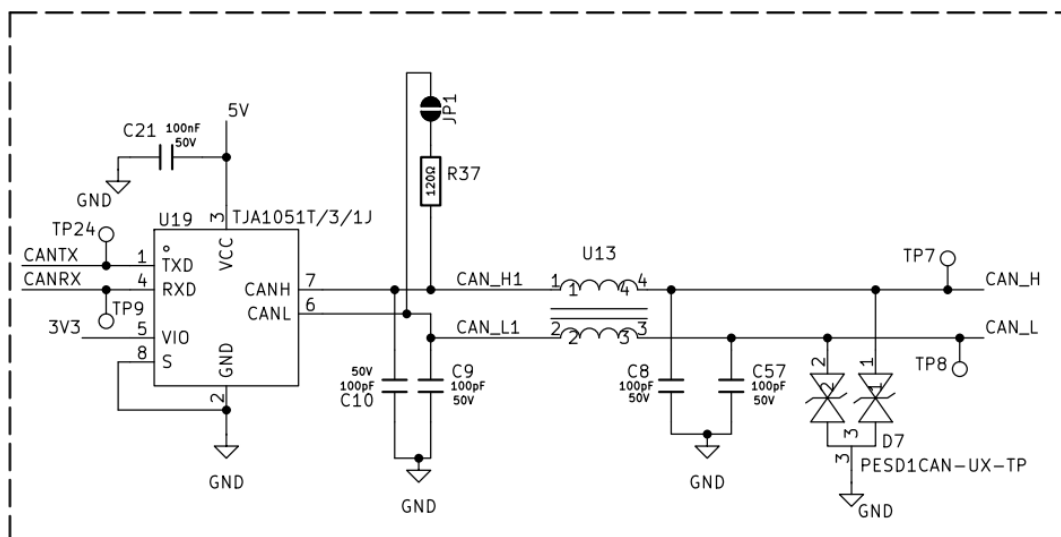
4.8 CAN interface

Το υποσύστημα CAN της πλακέτας χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ του ESP32-S3 και του wideband controller, και μπορεί να συνδεθεί με τον δίαυλο CAN του αυτοκινήτου ώστε να κάνει λήψη τιμών από την ECU ή άλλα υποσυστήματα που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Επειδή ο ESP32-S3 διαθέτει εσωτερικό CAN controller/TWAI αλλά όχι CAN transceiver χρησιμοποιήθηκε εξωτερικό ολοκληρωμένο για τη μετατροπή των λογικών σημάτων CANTX/CANRX σε διαφορικά σήματα CANH/CANL. Ο transceiver που επιλέχθηκε είναι ο TJA1051T/3/1J, ο οποίος είναι κατάλληλος για high-speed CAN. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο παρέχει διαφορική μετάδοση και λήψη προς τον δίαυλο CAN και διαθέτει ακροδέκτη VIO μέσω του οποίου επιλέγεται αν τα λογικά σήματα TXD/RXD θα λειτουργούν στα 3,3V ή 5V, συνδέοντας το στην ανάλογη τάση[32].

Στο σχηματικό χρησιμοποιούνται δύο transceivers TJA1051T/3/1J. Ο πρώτος U19 αποτελεί τη διεπαφή CAN του ESP32-S3. Το σήμα CANTX (GPIO4) του μικροελεγκτή συνδέεται στον ακροδέκτη TXD του U19, ενώ το σήμα CANRX (GPIO5) προέρχεται από τον ακροδέκτη RXD του ίδιου ολοκληρωμένου. Με αυτόν τον τρόπο ο ESP32-S3 ανταλλάσσει δεδομένα με τον CAN transceiver σε λογικές στάθμες 3,3 V, ενώ ο transceiver αναλαμβάνει την οδήγηση του διαφορικού διαύλου. Ο ακροδέκτης VCC του U19 τροφοδοτείται από τη γραμμή 5 V, που είναι η απαιτούμενη τροφοδοσία του φυσικού CAN driver, ενώ ο ακροδέκτης VIO συνδέεται στη γραμμή 3V3, ώστε οι ακροδέκτες TXD και RXD να λειτουργούν με συμβατές λογικές στάθμες για τον ESP32-S3[32]. Ο ακροδέκτης S είναι συνδεδεμένος στη γείωση, οπότε ο transceiver λειτουργεί σε Normal mode και μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει κανονικά δεδομένα στον δίαυλο[32]. Στην τροφοδοσία του U19 υπάρχει τοπικός πυκνωτής αποσύζευξης $C21 = 100 \text{ nF}$.

Ο δεύτερος transceiver U3 χρησιμοποιείται στην πλευρά του wideband module το οποίο διαθέτει όπως και ο ESP32 CAN controller αλλά όχι transceiver. Τα σήματα WBO_TX και WBO_RX του Wideband Controller συνδέονται αντίστοιχα στους ακροδέκτες TXD και RXD του U3, ενώ οι ακροδέκτες CANH και CANL του transceiver συνδέονται στον ίδιο διαφορικό δίαυλο CAN_H1/CAN_L1. Όπως και στον U19, ο U3 τροφοδοτείται με 5 V στον ακροδέκτη VCC, ενώ ο ακροδέκτης VIO συνδέεται στα 3,3 V για συμβατότητα λογικών σταθμών καθώς το module διαθέτει μικροελεγκτή STM32 που λειτουργεί σε λογικά επίπεδα 3,3V. Ο ακροδέκτης S συνδέεται στη γείωση, ώστε και αυτός ο transceiver να βρίσκεται μόνιμα σε Normal mode. Για τοπική αποσύζευξη της τροφοδοσίας του U3 χρησιμοποιείται ο πυκνωτής $C1 = 100 \text{ nF}$.

Οι γραμμές CAN_H1 και CAN_L1 περνούν από common mode choke ACT1210D-101-2P-TL00 (U13)[10] πριν εμφανιστούν ως εξωτερικές γραμμές CAN_H και CAN_L στον κεντρικό κονέκτορα J2 της πλακέτας για τη διασύνδεση με το CAN bus του οχήματος. Το συγκεκριμένο choke είναι δύο γραμμών σχεδιασμένο για automotive CAN εφαρμογές. Η επιλογή του βοηθά στη μείωση θορύβου και, χωρίς να επηρεάζει το διαφορικό σήμα του CAN[10]. Παράλληλα με τις γραμμές CAN έχουν τοποθετηθεί πυκνωτές μικρής χωρητικότητας προς γείωση. Συγκεκριμένα, οι C10 = 100 pF και C9 = 100 pF συνδέονται στις εσωτερικές γραμμές CAN_H1 και CAN_L1 πριν το choke, ενώ οι C8 = 100 pF και C57 = 100 pF συνδέονται στις γραμμές CAN_H και CAN_L μετά το choke. Οι πυκνωτές αυτοί λειτουργούν ως βοηθητικό φίλτρο υψηλών συχνοτήτων, περιορίζοντας γρήγορες παρεμβολές και θόρυβο RF που μπορεί να συζευχθεί στις γραμμές του διαύλου. Για την προστασία των γραμμών CAN από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις και γρήγορους παλμούς έχει τοποθετηθεί η διόδος προστασίας PESD1CAN-UX-TP (D7)[24]. Η διόδος συνδέεται στις γραμμές CAN_H και CAN_L προς τη γείωση και έχει ρόλο την εκτροπή παροδικών υπερτάσεων πριν αυτές φτάσουν στους transceivers. Η αντίσταση R37 = 120 Ω έχει τοποθετηθεί για τον τερματισμό του διαύλου CAN και υπάρχει δυνατότητα αποσύνδεσης της μέσω ενός solder jumper.



Σχήμα 4-16. Κύκλωμα για τη διασύνδεση με το πρωτόκολλο CAN bus

4.9 Έξοδοι ελέγχου

Η πλακέτα διαθέτει εξόδους ελέγχου για την οδήγηση εξωτερικών φορτίων και ενδεικτικών στοιχείων. Οι βασικές εξόδους είναι η έξοδος ελέγχου του boost solenoid, μία γενική ψηφιακή έξοδος low side και η αλυσίδα WS2812B RGB LED που χρησιμοποιείται ως shift-light. Επειδή τα φορτία αυτά δεν μπορούν να οδηγηθούν απευθείας από τους ακροδέκτες των μικροελεγκτών, στο σχηματικό χρησιμοποιούνται ενδιάμεσες βαθμίδες οδήγησης με MOSFET και gate driver.

Η σημαντικότερη έξοδος ελέγχου αφορά το boost solenoid, το οποίο ενεργοποιείται με σήμα PWM από τον ESP32-S3. Η έξοδος αυτή αντιστοιχεί στο GPIO6 του ESP32, με ρύθμιση duty cycle από 0–100% και συχνότητα λειτουργίας 10–50 Hz (μέσω του περιφερειακού LEDC)[15], ανάλογα με τις απαιτήσεις του solenoid και της στρατηγικής ελέγχου πίεσης υπερπλήρωσης. Το σήμα Boost~ του μικροελεγκτή δεν οδηγεί απευθείας το MOSFET ισχύος αλλά εισέρχεται στον διπλό gate driver UCC27324DR (U6)[33]. Ο gate driver τροφοδοτείται από τη γραμμή 12 V και διαθέτει τοπική αποσύνδεση με τους

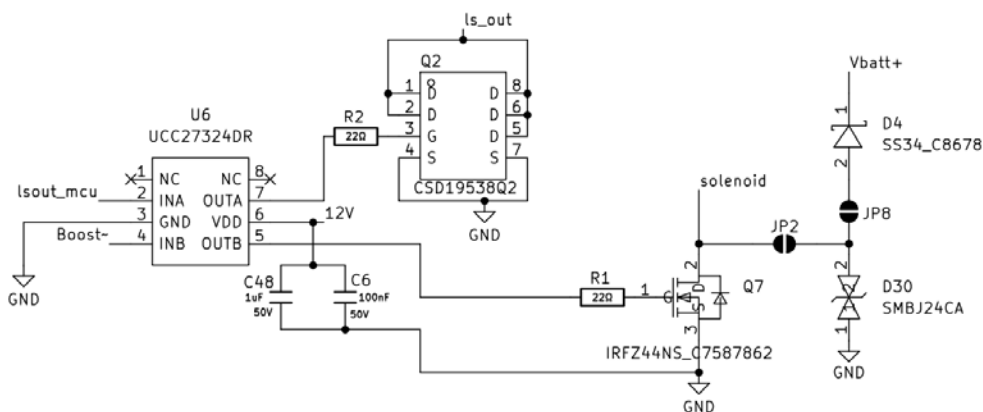
πυκνωτές C48 = 1 μ F και C6 = 100 nF, ώστε να μπορεί να παρέχει στιγμιαίο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης στην πύλη του MOSFET[33].

Η τελική βαθμίδα ισχύος του boost solenoid υλοποιείται με το N-channel MOSFET IRFZ44NS (Q7)[16] σε διάταξη low-side switch. Το εξωτερικό solenoid τροφοδοτείται από τη θετική γραμμή του οχήματος, ενώ το MOSFET αναλαμβάνει να συνδέει ή να αποσυνδέει την άλλη πλευρά του φορτίου με τη γείωση. Όταν το σήμα PWM βρίσκεται σε ενεργή κατάσταση, ο gate driver φορτίζει την πύλη του Q7 μέσω της αντίστασης R1 = 22 Ω , το MOSFET άγει και το solenoid ενεργοποιείται. Όταν το PWM απενεργοποιηθεί, η πύλη εκφορτίζεται γρήγορα, το MOSFET αποκόπτεται και το solenoid παύει να τροφοδοτείται.

Επειδή το boost solenoid είναι επαγωγικό φορτίο, κατά την αποκοπή του ρεύματος μπορούν να δημιουργηθούν αιχμές τάσης. Για τον λόγο αυτό στο σχηματικό έχουν τοποθετηθεί στοιχεία προστασίας στην έξοδο, όπως η δίοδος SS34 (D4)(flyback) και η TVS δίοδος SMBJ24CA (D30). Τα στοιχεία αυτά περιορίζουν τις υπερτάσεις που δημιουργούνται κατά την απενεργοποίηση του solenoid και προστατεύουν το MOSFET και την υπόλοιπη πλακέτα από απότομες μεταβολές τάσης.

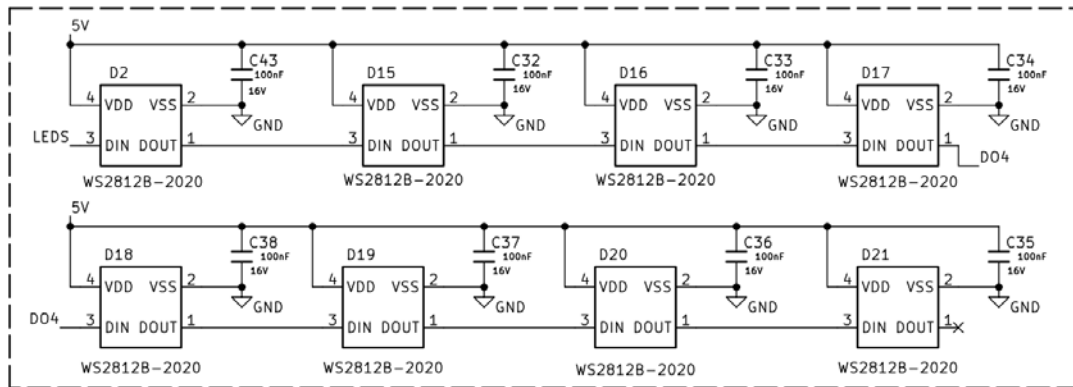
Η δεύτερη έξοδος ελέγχου είναι η γενική ψηφιακή έξοδος ls_out, η οποία συνδέεται μέσω του κεντρικού κονέκτορα της πλακέτας. Η έξοδος αυτή υλοποιείται επίσης ως low-side MOSFET output, με το MOSFET CSD19538Q2 (Q2)[14]. Το σήμα ελέγχου lsout_mcu οδηγείται στο δεύτερο κανάλι του UCC27324DR gate driver, και η έξοδος του driver οδηγεί την πύλη του Q2 μέσω της αντίστασης R2 = 22 Ω . Με αυτή τη διάταξη, το εξωτερικό φορτίο μπορεί να συνδεθεί μεταξύ θετικής τροφοδοσίας και της γραμμής ls_out, ενώ η πλακέτα αναλαμβάνει να το ενεργοποιεί τραβώντας τη γραμμή προς τη γείωση. Η λειτουργία της συγκεκριμένης εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φορτία όπως ρελέ και ενδεικτικές λυχνίες. Η γενική ψηφιακή έξοδος ελέγχεται από τον STM32 μέσω του ακροδέκτη PB12.

Τέλος, στο υποσύστημα εξόδων περιλαμβάνεται και η αλυσίδα WS2812B-2020 RGB LED, η οποία χρησιμοποιείται ως shift-light. Στο σχηματικό υπάρχουν οκτώ διαδοχικά LED, τροφοδοτούμενα από τη γραμμή 5 V, με πυκνωτές αποσύζευξης 100 nF κοντά σε κάθε LED. Η οδήγηση γίνεται από τον STM32 μέσω του σήματος LEDS στον ακροδέκτη PB6. Τα WS2812B ενσωματώνουν στο ίδιο περίβλημα το RGB LED και το κύκλωμα ελέγχου[35], διαθέτουν είσοδο DIN από την οποία δέχονται τα δεδομένα και έξοδο DOUT στην οποία συνδέεται το DIN του επόμενου LED και μεταφέρουν τα δεδομένα σειριακά από το ένα LED στο επόμενο. Κάθε LED λαμβάνει πλαίσιο δεδομένων 24 bit με σειρά GRB, ενώ το σήμα αναμορφώνεται εσωτερικά πριν περάσει στο επόμενο LED[35].



Σχήμα 4-17. Κύκλωμα οδήγησης MOSFET εξόδων ελέγχου

Η χρήση των WS2812B επιτρέπει τον έλεγχο πολλών RGB LED με μία μόνο γραμμή δεδομένων, χωρίς να απαιτούνται ξεχωριστές έξοδοι PWM για κάθε χρώμα και κάθε LED[35]. Η αλυσίδα των οκτώ LED χρησιμοποιείται για ένδειξη αλλαγής σχέσης στο κιβώτιο ταχυτήτων.



Σχήμα 4-18. Κύκλωμα αλυσίδας LED WS2812B

4.10 Κριτήρια PCB layout

Η σχεδίαση του PCB πραγματοποιήθηκε με βάση ηλεκτρικά, μηχανολογικά και εργονομικά κριτήρια, καθώς η πλακέτα δεν αποτελεί μόνο φορέα των ηλεκτρονικών, αλλά και βασικό δομικό στοιχείο της τελικής συσκευής. Πάνω στην ίδια πλακέτα τοποθετούνται οι μικροελεγκτές, οι βαθμίδες τροφοδοσίας, οι διεπαφές επικοινωνίας, η οθόνη, τα πλήκτρα πλοήγησης, τα LED ένδειξης και ο κεντρικός κονέκτορας για την καλωδίωση στο όχημα. Για τον λόγο αυτό το layout σχεδιάστηκε ώστε να εξυπηρετεί ταυτόχρονα τη σωστή ηλεκτρονική λειτουργία, τη μηχανική στήριξη στο περίβλημα και την ευκολία συναρμολόγησης και αποσφαλμάτωσης.

Βασικό κριτήριο της γεωμετρίας ήταν οι διαστάσεις της πλακέτας να είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από τις διαστάσεις της οθόνης. Η οθόνη τοποθετείται στην πίσω πλευρά της πλακέτας, όπως φαίνεται από το περίγραμμά της στο κάτω layer, ενώ η πλακέτα εκτείνεται περιμετρικά ώστε να υπάρχει διαθέσιμος χώρος για τα πλήκτρα πλοήγησης και τα LED. Με αυτόν τον τρόπο, τα πλήκτρα ENTER, UP, DOWN και BACK τοποθετούνται στο κάτω μέρος της πίσω πλευράς και παραμένουν προσβάσιμα από τον χρήστη, ενώ η αλυσίδα των shift-light LED βρίσκεται στην επάνω περιοχή της πίσω πλευράς της πλακέτας, σε θέση εύκολα ορατή από τον οδηγό.

Για τη μηχανική στερέωση του PCB στο περίβλημα προβλέφθηκαν οπές βιδώματος στις γωνίες της πλακέτας. Οι οπές αυτές επιτρέπουν τη σταθερή συγκράτηση του PCB σε αντίστοιχες βάσεις του περιβλήματος, μειώνοντας την καταπόνηση των κολλήσεων και των συνδέσμων.

Ο κεντρικός κονέκτορας καλωδίωσης για τη διασύνδεση με το όχημα τοποθετήθηκε στο κάτω μέρος της πλακέτας, στην πλευρά των εξαρτημάτων, ώστε το κύριο καλώδιο του συστήματος να μπορεί να κατευθυνθεί προς το πίσω μέρος του περιβλήματος και να κρύβεται ευκολότερα κατά την εγκατάσταση στο όχημα.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη θέση του FPC κονέκτορα της οθόνης. Επειδή η οθόνη βρίσκεται στην πίσω πλευρά της πλακέτας, ενώ ο FPC κονέκτορας και τα περισσότερα εξαρτήματα βρίσκονται στην εμπρόσθια πλευρά, προβλέφθηκε κατάλληλη εγκοπή στο PCB. Η εγκοπή αυτή επιτρέπει τη διέλευση

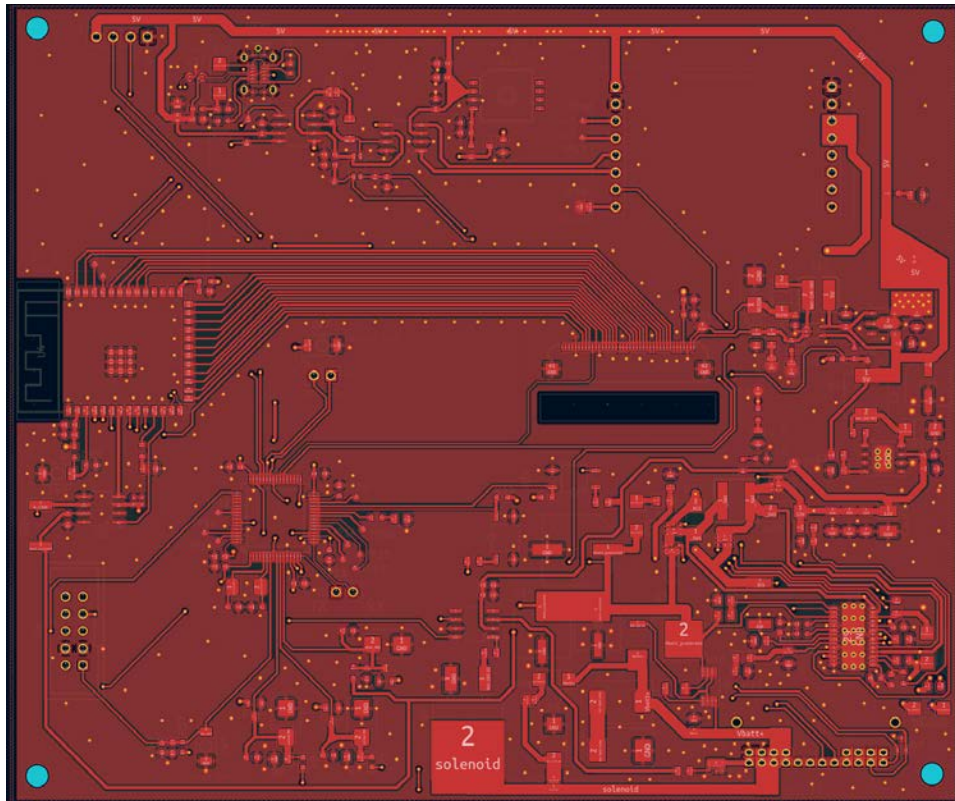
και την κάμψη της καλωδιοταινίας της οθόνης χωρίς υπερβολική μηχανική καταπόνηση, ενώ διατηρεί τον κονέκτορα σε θέση εύκολης πρόσβασης κατά τη συναρμολόγηση, καθώς μπορεί να τοποθετηθεί πρώτα η οθόνη και ύστερα η πλακέτα.

Η πλακέτα σχεδιάστηκε ως τετραστρωματικό PCB με τα στρώματα να ακολουθούν τη σειρά: σήματα - GND - 3V3 - σήματα. Τα εξωτερικά layers χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για τη δρομολόγηση σημάτων, ώστε οι διαδρομές να είναι ορατές και προσβάσιμες κατά τον έλεγχο του πρωτοτύπου. Αυτό διευκολύνει την οπτική αποσφαλμάτωση, τη μέτρηση σημάτων, καθώς και πιθανές μικροδιορθώσεις σε περίπτωση σχεδιαστικού λάθους. Το εσωτερικό επίπεδο γείωσης παρέχει χαμηλή εμπέδηση επιστροφής για τα σήματα, ενώ το εσωτερικό επίπεδο 3V3 βοηθά στην εύκολη διανομή της τροφοδοσίας προς τα ψηφιακά ολοκληρωμένα.

Στις περιοχές των μετατροπέων τάσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στη θέση των εξαρτημάτων. Οι πυκνωτές εισόδου και εξόδου τοποθετήθηκαν όσο το δυνατόν πιο κοντά στα αντίστοιχα ολοκληρωμένα, ενώ οι διαδρομές που μεταφέρουν μεγάλα ρεύματα σχεδιάστηκαν μικρές και φαρδιές. Με αυτόν τον τρόπο μειώνονται οι απώλειες, οι ανεπιθύμητες πτώσεις τάσης και ο ηλεκτρικός θόρυβος που δημιουργείται από τη μεταγωγική λειτουργία. Ειδικά στα κυκλώματα των LM5175, TPS5430 και TPS61169, η τοποθέτηση των πηνίων, των MOSFET, των διόδων και των πυκνωτών έγινε με βάση τις προτάσεις των datasheets, ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή και αξιόπιστη λειτουργία των τροφοδοσιών.

Για τα σήματα υψηλότερης ταχύτητας ακολουθήθηκαν κανόνες καθαρής και συμμετρικής δρομολόγησης. Οι γραμμές της παράλληλης RGB διεπαφής της οθόνης δρομολογήθηκαν ομαδοποιημένα. Οι γραμμές USB_P και USB_N του USB Type-C δρομολογήθηκαν ως διαφορικό ζεύγος ελεγχόμενης εμπέδησης, με στόχο 90 Ω differential impedance, ώστε να διατηρείται η ακεραιότητα του σήματος USB. Αντίστοιχα, οι γραμμές CANH και CANL δρομολογήθηκαν με μικρή και σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Αποφεύχθηκαν περιττές διακλαδώσεις και μεγάλες παράλληλες παρακάμψεις στις γραμμές, ώστε να διατηρηθεί καθαρό το διαφορικό σήμα του CAN.

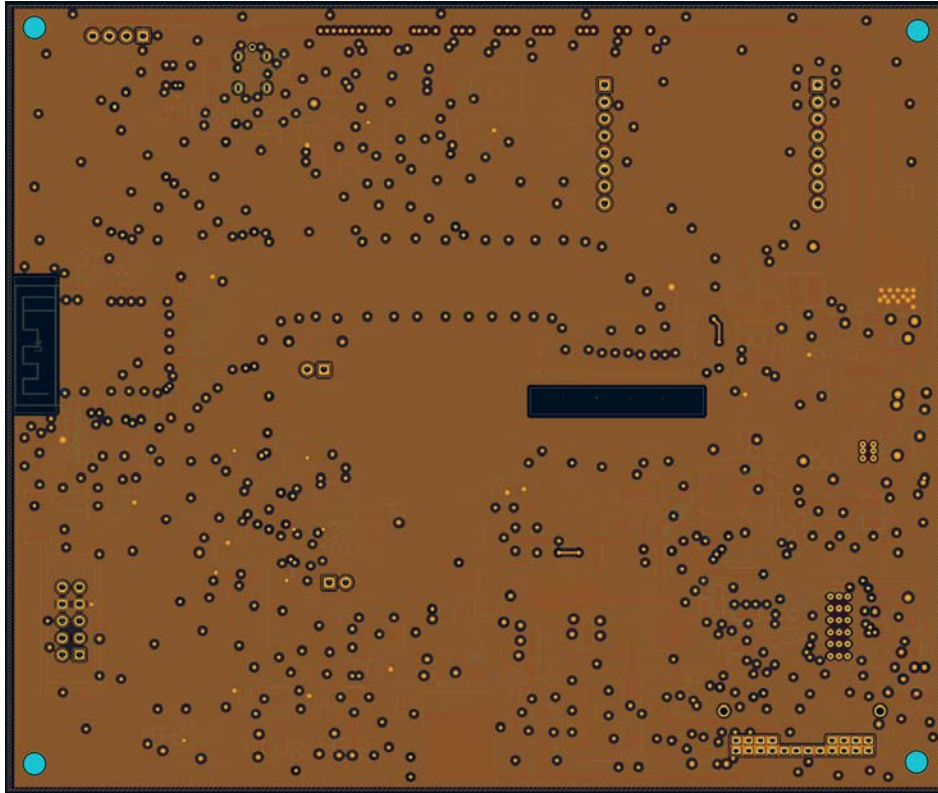
Κατά την τοποθέτηση των εξαρτημάτων λήφθηκε υπόψη και η μηχανική συμβατότητα με τα επιμέρους modules. Κάτω από τα module του wideband controller και του GPS αποφεύχθηκε η τοποθέτηση εξαρτημάτων μεγάλου ύψους, ώστε να μην υπάρχει επαφή μεταξύ των modules και των εξαρτημάτων του PCB.



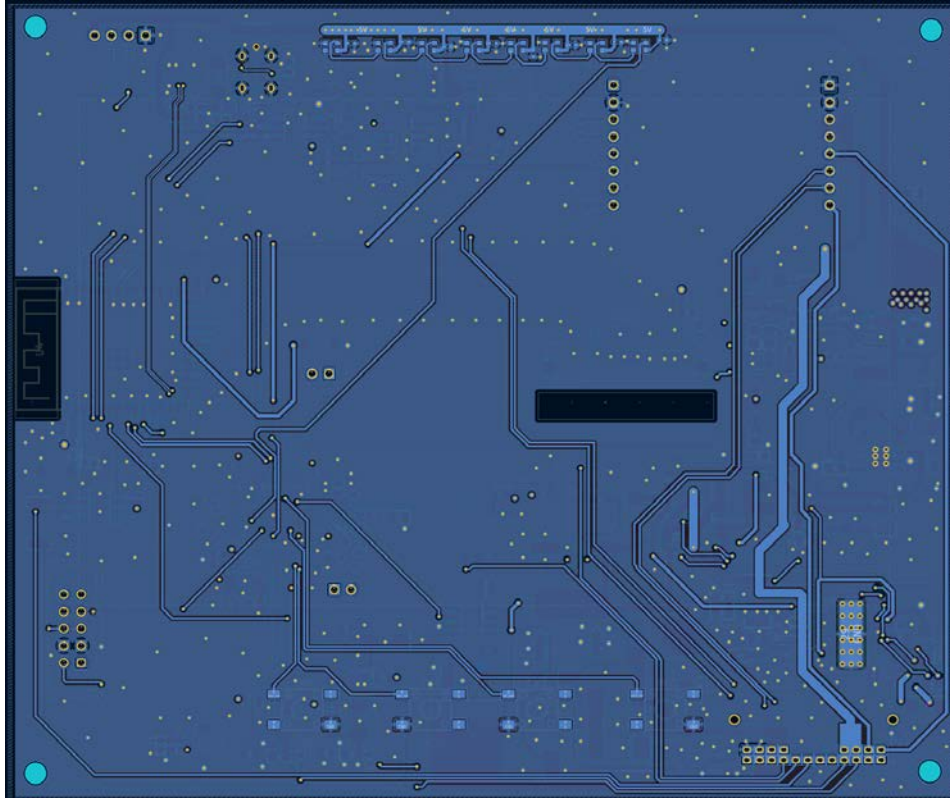
Σχήμα 4-19. Πρώτο Επίπεδο χαλκού πλακέτας



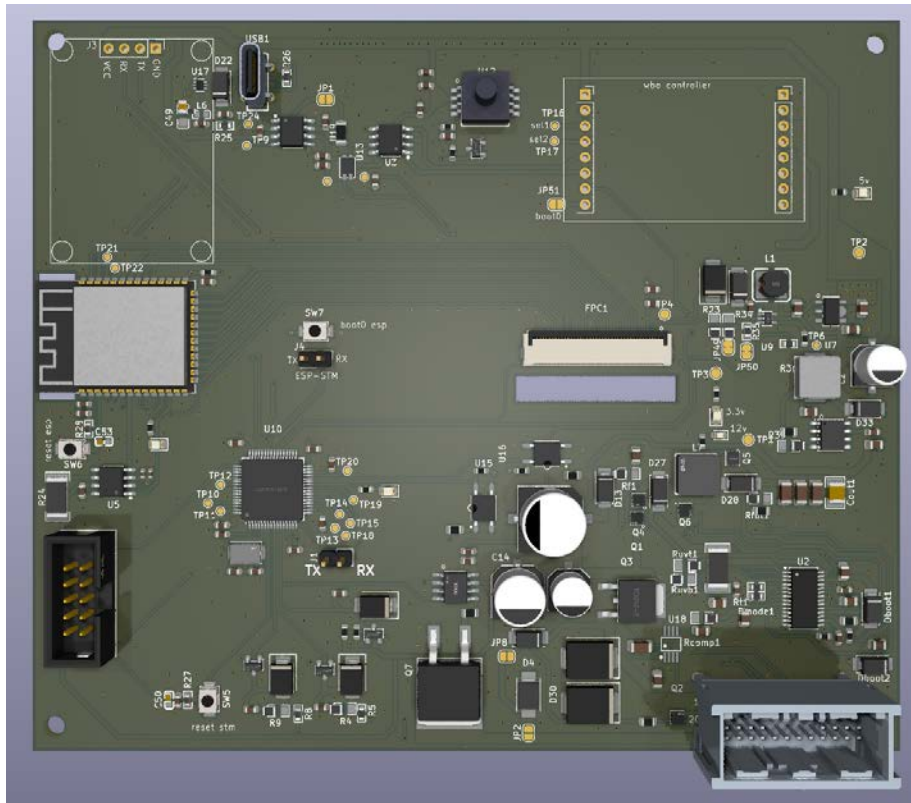
Σχήμα 4-20. Δεύτερο επίπεδο χαλκού πλακέτας



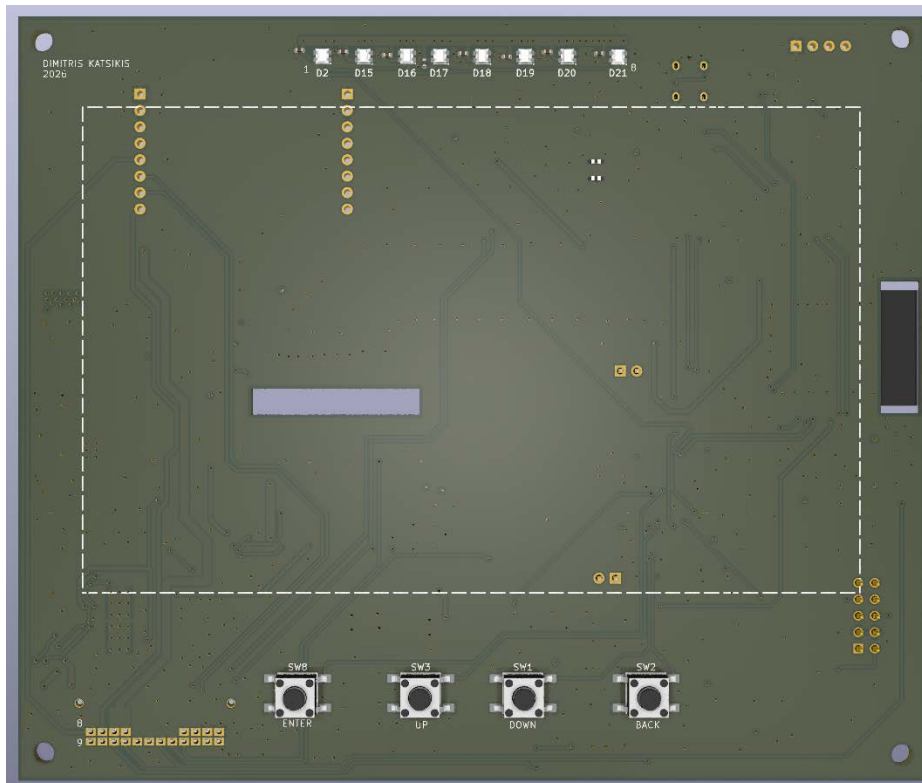
Σχήμα 4-21. Τρίτο επίπεδο χαλκού πλακέτας



Σχήμα 4-22. Τέταρτο επίπεδο χαλκού πλακέτας



Εικόνα 4-1. Πίσω όψη πλακέτας



Εικόνα 4-2. Εμπρόσθια όψη πλακέτας

4.11 Μηχανολογική ολοκλήρωση συσκευής

Η μηχανολογική ολοκλήρωση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη σχεδίαση περιβλήματος, στο οποίο ενσωματώνονται τα ηλεκτρονικά μέρη. Το περίβλημα σχεδιάστηκε ώστε να προστατεύει το ηλεκτρονικό κύκλωμα, να επιτρέπει την εύκολη εγκατάσταση στο όχημα και ταυτόχρονα να παρέχει άμεση πρόσβαση στην οθόνη, στα πλήκτρα πλοήγησης, στα ενδεικτικά LED και στις βασικές εξωτερικές διασυνδέσεις. Το περίβλημα αποτελείται από δύο βασικά τμήματα: το εμπρόσθιο τμήμα και το οπίσθιο κάλυμμα. Το εμπρόσθιο τμήμα περιλαμβάνει το άνοιγμα και τη στήριξη της οθόνης, τις οπές των πλήκτρων πλοήγησης και τις οπές των LED shift-light. Το οπίσθιο κάλυμμα κλείνει τη συσκευή από την πίσω πλευρά και περιλαμβάνει ανοίγματα για τους συνδέσμους και τον αισθητήρα πίεσης MAP. Ανάμεσα στα δύο τμήματα τοποθετείται το σύνολο πλακέτας και οθόνης.



Εικόνα 4-3. Ολοκληρωμένη μηχανολογικά συσκευή

4.11.1 Γεωμετρία και διαστάσεις

Η βασική γεωμετρία του περιβλήματος είναι ορθογωνική με στρογγυλεμένες γωνίες και αυξημένο εσωτερικό βάθος ώστε να χωρά η πλακέτα μαζί με την οθόνη, τους κονέκτορες και τα υψηλότερα εξαρτήματα και modules. Οι συνολικές διαστάσεις του περιβλήματος καθορίστηκαν από τις διαστάσεις του PCB και της οθόνης, καθώς η πλακέτα έχει σχεδιαστεί ελαφρώς μεγαλύτερη από την οθόνη ώστε να υπάρχει διαθέσιμος χώρος για τα πλήκτρα, τα LED και τα σημεία στήριξης. Στην πρόσοψη του περιβλήματος έχει δημιουργηθεί κεντρικό άνοιγμα για την οθόνη. Το άνοιγμα αυτό ευθυγραμμίζεται με την ενεργή περιοχή της οθόνης και καλύπτεται η στεφάνη της οθόνης. Το περίγραμμα του ανοίγματος σχεδιάστηκε με στρογγυλεμένες ακμές για να εξασφαλιστεί η πλήρης ορατότητα της οθόνης από διάφορες γωνίες θέασης, χωρίς να καλύπτονται τμήματα της οθόνης από το πάχος του υλικού. Στο

επάνω μέρος της πρόσοψης έχουν προβλεφθεί οπές για τα LED του shift-light. Στο κάτω μέρος της πρόσοψης βρίσκονται οι οπές των τεσσάρων πλήκτρων πλοήγησης, με τις αντίστοιχες ενδείξεις ENTER, UP, DOWN και BACK. Οι ακμές και οι γωνίες του περιβλήματος σχεδιάστηκαν στρογγυλεμένες ώστε να αποφεύγονται αιχμηρά σημεία. Το σχήμα του περιβλήματος διατηρεί απλή γεωμετρία ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα με τρισδιάστατη εκτύπωση και να συναρμολογηθεί χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες.



Εικόνα 4-4. Αναπτυγμένη απεικόνιση εξαρτημάτων συσκευής (μπροστά όψη)

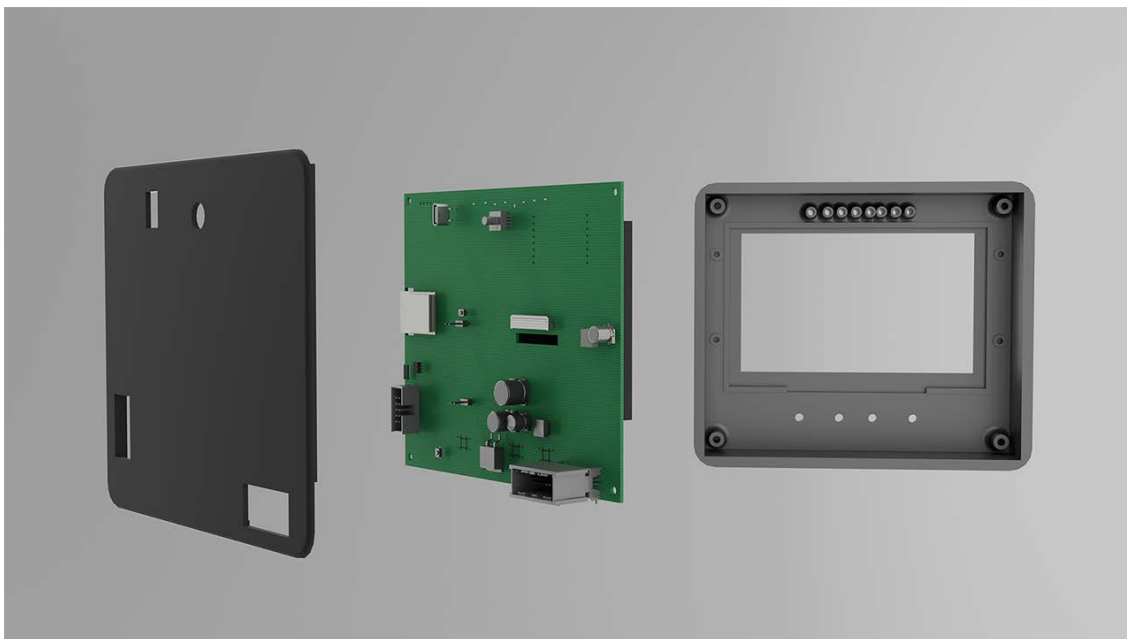
4.11.2 Στήριξη PCB και οθόνης

Η στήριξη του PCB πραγματοποιείται μέσω εσωτερικών βάσεων και σημείων βιδώματος στο περίβλημα. Οι οπές που έχουν προβλεφθεί στην πλακέτα ευθυγραμμίζονται με αντίστοιχες κολώνες στήριξης στο εσωτερικό του περιβλήματος, επιτρέποντας τη στερέωση της πλακέτας με βίδες. Με αυτόν τον τρόπο η πλακέτα παραμένει σταθερή στη θέση της και περιορίζονται οι μηχανικές καταπονήσεις που μπορούν να εμφανιστούν λόγω κραδασμών στο όχημα.

Οι εσωτερικές βάσεις καθορίζουν επίσης το ύψος τοποθέτησης του PCB σε σχέση με την πρόσοψη και την οθόνη. Αυτό είναι σημαντικό επειδή τα πλήκτρα και τα LED είναι τοποθετημένα πάνω στην πλακέτα και πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τα αντίστοιχα ανοίγματα του περιβλήματος. Επομένως, η θέση της πλακέτας δεν καθορίζεται μόνο από τις οπές στήριξης, αλλά και από την ανάγκη σωστής ευθυγράμμισης των στοιχείων χειρισμού με την εξωτερική επιφάνεια της συσκευής.

Η οθόνη τοποθετείται ανάμεσα στην πρόσοψη και στο PCB. Το εμπρόσθιο τμήμα του περιβλήματος λειτουργεί ως οδηγός τοποθέτησης της οθόνης καθώς έχει σχεδιαστεί πλαίσιο στις εξωτερικές διαστάσεις της ώστε να μπαίνει σφηνωτά και βιδώνεται δεξιά και αριστερά στις αντίστοιχες οπές. Παράλληλα, η θέση του PCB έχει καθοριστεί έτσι ώστε ο FPC connector της οθόνης να παραμένει προσβάσιμος και η καλωδιότητα να μπορεί να συνδεθεί χωρίς υπερβολική κάμψη.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην αποφυγή επαφής μεταξύ του οπίσθιου καλύμματος και υψηλών εξαρτημάτων της πλακέτας, όπως και στην απόσταση πλακέτας με οθόνη, καθώς το οπίσθιο μέρος της οθόνης είναι μεταλλικό και αν η πλακέτα τοποθετούνταν πολύ κοντά θα βραχυκύκλωναν επαφές. Στην εσωτερική γεωμετρία προβλέφθηκε επαρκής χώρος για τους πυκνωτές, τα modules και τα υπόλοιπα εξαρτήματα μεγαλύτερου ύψους.



Εικόνα 4-5. Αναπτυγμένη απεικόνιση εξαρτημάτων συσκευής (πίσω όψη)

4.11.3 Πρόσβαση σε εξωτερικές διασυνδέσεις

Το οπίσθιο κάλυμμα του περιβλήματος περιλαμβάνει ανοίγματα για τις βασικές θύρες και εξωτερικές διασυνδέσεις της πλακέτας. Έχει προβλεφθεί άνοιγμα για τη θύρα USB Type-C, ώστε να είναι δυνατός ο προγραμματισμός, η σειριακή επικοινωνία και η αποσφαλμάτωση του ESP32-S3 χωρίς να απαιτείται αποσυναρμολόγηση της συσκευής. Επιπλέον, στο πίσω μέρος υπάρχει άνοιγμα για τη θύρα προγραμματισμού του STM32 μέσω ST-Link/SWD. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να πραγματοποιηθεί φόρτωση firmware ή αποσφαλμάτωση των μικροελεγκτών χωρίς να αφαιρεθεί η πλακέτα από το περίβλημα. Ο κεντρικός κονέκτορας τοποθετείται χαμηλά στο πίσω μέρος της συσκευής όπου και υπάρχει το αντίστοιχο άνοιγμα στο οπίσθιο κάλυμμα. Η θέση αυτή επιλέχθηκε ώστε το κύριο καλώδιο του συστήματος να μπορεί να δρομολογηθεί προς το εσωτερικό του ταμπλό και να μην είναι εμφανές από την πρόσοψη.

Η πρόσβαση στις εξωτερικές διασυνδέσεις σχεδιάστηκε με γνώμονα τη χρήση της συσκευής μέσα σε όχημα. Οι θύρες που χρησιμοποιούνται κυρίως για ανάπτυξη και προγραμματισμό βρίσκονται στο πίσω μέρος, ενώ στην πρόσοψη παραμένουν μόνο τα στοιχεία που απαιτούνται κατά τη λειτουργία, δηλαδή η οθόνη, τα LED και τα πλήκτρα πλοήγησης.



Εικόνα 4-6. Κάλυμμα συσκευής και πρόσβαση σε εξωτερικές διασυνδέσεις

4.11.4 Διαδικασία κατασκευής

Για την κατασκευή του φυσικού πρωτοτύπου επιλέχθηκε η μέθοδος της τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Ως υλικό κατασκευής προτιμήθηκε το ABS έναντι του κοινού PLA, λόγω της ανώτερης μηχανικής του αντοχής και της θερμικής του σταθερότητας. Οι ιδιότητες αυτές κρίνονται απαραίτητες για να αντεπεξέλθει το σύστημα στις απαιτητικές συνθήκες ενός αγωνιστικού οχήματος όπου υπάρχουν κραδασμοί και υψηλές θερμοκρασίες. Ακολούθησε η δοκιμαστική συναρμολόγηση με τα πραγματικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Κατά τον πρακτικό αυτό έλεγχο επαληθεύτηκε η σωστή εφαρμογή του PCB στις βάσεις του, η εφαρμογή της οθόνης στο άνοιγμα της πρόσοψης και η εργονομία των πλήκτρων. Η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης αποδείχθηκε καθοριστική, καθώς επέτρεψε την ταχύτατη πρωτοτυποποίηση και τη δυνατότητα άμεσων γεωμετρικών βελτιώσεων πριν την τελική μορφή.

4.12 Επίλογος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η πλήρης ανάπτυξη του υλικού και η μηχανολογική ολοκλήρωση της συσκευής. Αναλύθηκε η αρχιτεκτονική της πλακέτας γύρω από τους μικροελεγκτές ESP32-S3 και STM32, με ιδιαίτερη έμφαση στα κυκλώματα σταθεροποίησης της τροφοδοσίας, την προστασία από ηλεκτρικές διαταραχές και την ενσωμάτωση πρωτοκόλλων επικοινωνίας CAN bus και K-Line για το απαιτητικό περιβάλλον του οχήματος. Τέλος, η τρισδιάστατη σχεδίαση και η κατασκευή του περιβλήματος από ABS εξασφάλισαν την προστασία των ηλεκτρονικών, την εργονομική ενσωμάτωση της οθόνης και των χειριστηρίων, θέτοντας τη φυσική βάση πάνω στην οποία θα αναπτυχθεί και θα εκτελεστεί το λογισμικό του συστήματος.

Κεφάλαιο 5ο: Υλοποίηση λογισμικού ESP32-S3 και STM32

5.1 Εισαγωγή

Το ηλεκτρονικό υλικό, όσο προηγμένο και αν είναι παραμένει αδρανές χωρίς το κατάλληλο λογισμικό να συντονίζει τη λειτουργία του. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η αρχιτεκτονική του λογισμικού που αναπτύχθηκε ώστε να γίνει λειτουργικό το σύνολο του hardware. Δεδομένης της φιλοσοφίας Dual-MCU (δύο μικροελεγκτών) που ακολουθήθηκε στο hardware, το λογισμικό οργανώνεται σε δύο διακριτά περιβάλλοντα. Ο ισχυρός ESP32-S3 αναλαμβάνει τον ρόλο του κεντρικού ενορχηστρωτή, αξιοποιώντας τις δυνατότητες Λειτουργικού Συστήματος Πραγματικού Χρόνου (FreeRTOS) για να διαχειριστεί την απαιτητική οθόνη γραφικών και τις επικοινωνίες. Ο STM32F4 λειτουργεί ως ένας συνεπεξεργαστής συλλογής δεδομένων, εκτελώντας έναν ταχύτατο βρόχο λειτουργίας απόλυτης χρονικής ακρίβειας.

5.2 Περιβάλλον ανάπτυξης

Για τη δημιουργία του λογισμικού επιλέχθηκαν σύγχρονα και αξιόπιστα εργαλεία, τα οποία συγκεντρώθηκαν κάτω από το ίδιο περιβάλλον εργασίας Visual Studio Code (VS Code).

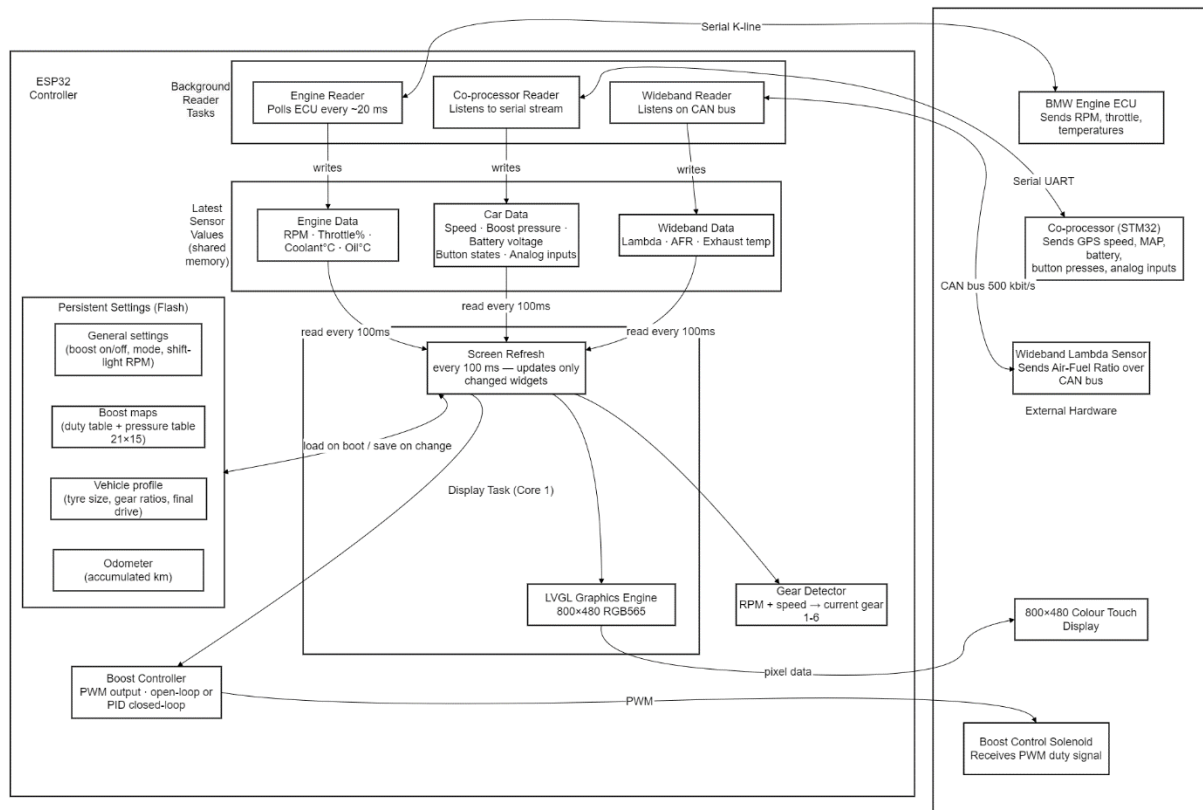
Η συγγραφή του κώδικα χωρίστηκε σε δύο μέρη, προσαρμοσμένα στις ανάγκες του κάθε μικροελεγκτή:

- **Για τον κύριο ESP32-S3:** Ο κώδικας γράφτηκε σε γλώσσα C, χρησιμοποιώντας το επίσημο εργαλείο της κατασκευάστριας εταιρείας, το ESP-IDF (έκδοση 5.0+). Για τον σχεδιασμό των μενού και των γραφικών της οθόνης, χρησιμοποιήθηκε η ανοιχτού κώδικα (open source) βιβλιοθήκη LVGL (έκδοση 9.2.2), αξιοποιώντας το πρότυπο χρωμάτων RGB565.
- **Για τον δευτερεύον STM32:** Σε αυτή την περίπτωση ακολουθήθηκε μια διαφορετική, πιο πρακτική προσέγγιση. Επιλέχθηκε το εργαλείο PlatformIO και ο κώδικας αναπτύχθηκε βασισμένος στο γνώριμο οικοσύστημα του Arduino (σε γλώσσα C/C++). Αυτή η επιλογή έγινε απολύτως συνειδητά καθώς το Arduino διαθέτει ήδη έτοιμες και καλά δοκιμασμένες βιβλιοθήκες για τον χειρισμό των εξαρτημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, κατέστη δυνατή η γρήγορη διασύνδεση του δέκτη GPS και των έξυπνων NeoPixel LEDs, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο στην ανάπτυξη, χωρίς να θυσιάσει καθόλου η απόδοση του συστήματος.

5.3 Δομή λογισμικού ESP32-S3

Η καρδιά του κεντρικού ελεγκτή είναι το FreeRTOS. Σε ένα σύστημα όπου ετερογενή δεδομένα καταφθάνουν με διαφορετικές ταχύτητες και πρωτόκολλα, η χρήση ενός λειτουργικού πραγματικού χρόνου είναι μονόδρομος. Όπως αποτυπώνεται στο Διάγραμμα Εξαρτημάτων Συστήματος (System Component Diagram) και κατανεμημένη αρχιτεκτονική Dual-MCU, η εφαρμογή οργανώνεται σε ανεξάρτητες διεργασίες (tasks). Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση του συστήματος και να διασφαλιστεί η απόλυτη ομαλότητα των γραφικών, εφαρμόστηκε ένας αυστηρός διαχωρισμός στους δύο πυρήνες (Cores) του επεξεργαστή:

- Ο **Πυρήνας 1 (Core 1)** αφιερώνεται αποκλειστικά στη «βαριά» διεργασία της οθόνης (LVGL port task), διαχειριζόμενος τη μνήμη PSRAM και την ανανέωση των pixels.
- Ο **Πυρήνας 0 (Core 0)** λειτουργεί ως κέντρο επικοινωνιών. Εκεί φιλοξενούνται όλες οι διεργασίες υποβάθρου (kline_task, stm_link_task, wb_can_rx), οι οποίες συλλέγουν αδιάκοπα τα δεδομένα του οχήματος.



Σχήμα 5-1. Διάγραμμα Εξαρτημάτων Συστήματος (System Component Diagram) και κατανεμημένη αρχιτεκτονική Dual-MCU

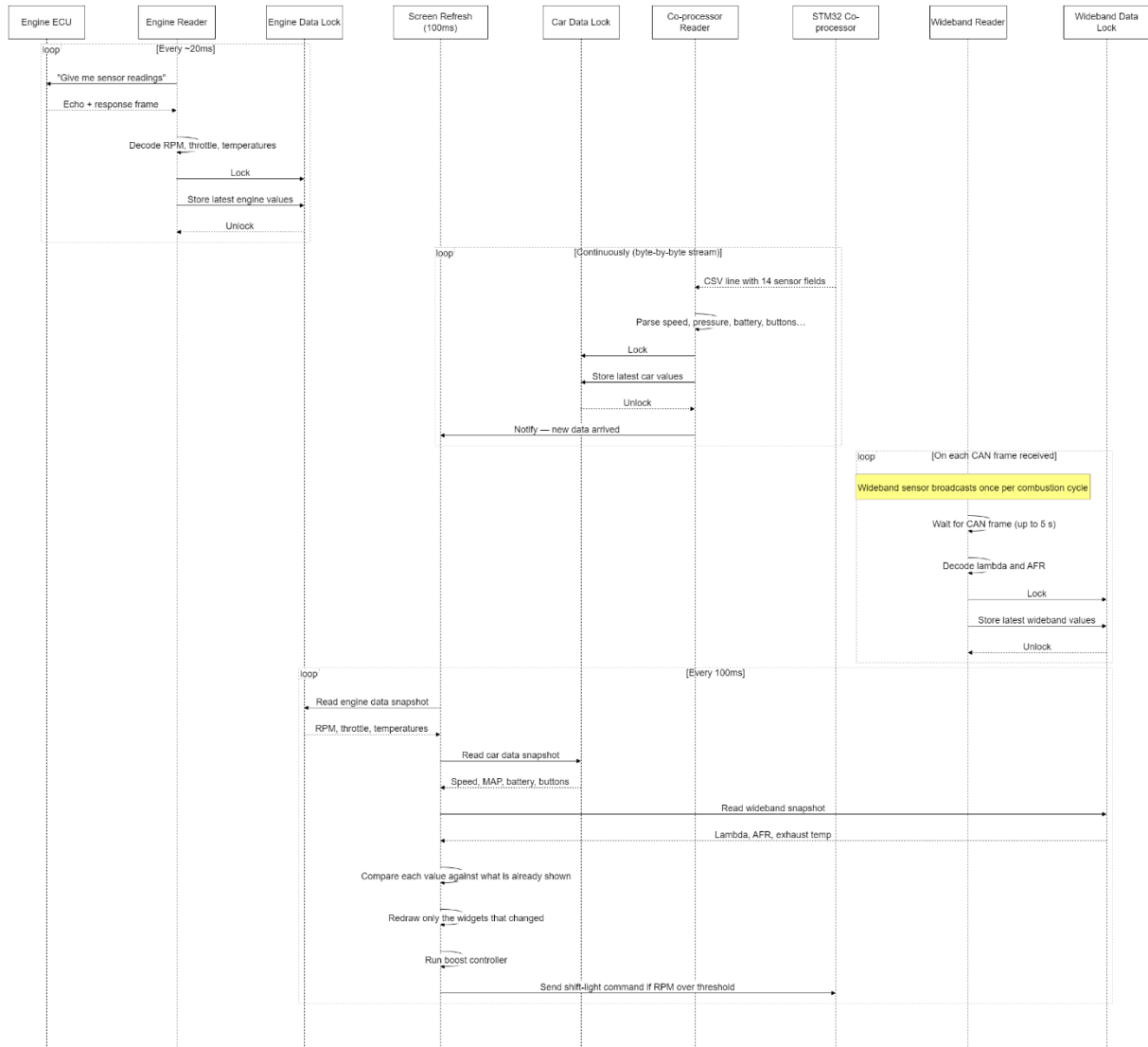
5.4 Ακολουθία εκκίνησης ESP32

Σύμφωνα με το Διάγραμμα Ροής Ακολουθίας Εκκίνησης (Startup Sequence Flowchart) που βρίσκεται στο Παράρτημα, η κύρια ρουτίνα εκκίνησης (main) του συστήματος δεν εκτελεί κάποιον ατέρμονο βρόχο. Αντιθέτως, λειτουργεί καθαρά ως εκκινήτης. Αρχικά, ενεργοποιεί το σύστημα μόνιμης αποθήκευσης (NVS) για να ανακτήσει τις αποθηκευμένες ρυθμίσεις του οδηγού (όπως την περίμετρο ελαστικού και τα όρια του shift-light). Έπειτα, ρυθμίζει τη σύνδεση με την οθόνη κάνοντας χρήση της διπλής μνήμης (Double Buffering) και δημιουργεί τις ανεξάρτητες διεργασίες που θα αναλάβουν την επικοινωνία. Το τελευταίο βήμα της εκκίνησης είναι η δημιουργία ενός χρονομέτρου (software timer), το οποίο αναλαμβάνει να πυροδοτεί τη διαδικασία ανανέωσης των γραφικών σε σταθερό ρυθμό. Αφού ρυθμίσει αυτά τα στοιχεία, η αρχική ρουτίνα τερματίζεται, παραδίδοντας τον απόλυτο έλεγχο στον χρονοπρογραμματιστή (scheduler) του FreeRTOS.

5.5 Εργασίες επικοινωνίας και shared data

Όπως περιγράφεται στο Διάγραμμα Αλληλουχίας Επικοινωνίας (Task Communication Sequence Diagram) και ασφαλής διαχείριση κοινόχρηστης μνήμης, μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του συστήματος είναι η ασφαλής ανταλλαγή πληροφοριών. Εάν η διεργασία που διαβάζει το K-line προσπαθήσει να ενημερώσει τις στροφές του κινητήρα την ίδια ακριβώς στιγμή που η οθόνη προσπαθεί να τις διαβάσει για να τις σχεδιάσει, τα δεδομένα θα καταστραφούν. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, όλα τα εισερχόμενα δεδομένα αποθηκεύονται σε μια κεντρική κοινόχρηστη δομή μνήμης. Η πρόσβαση σε αυτή τη δομή προστατεύεται από έναν Αμοιβαίο Αποκλεισμό (Mutex). Ο

αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: όταν το χρονόμετρο του συστήματος δίνει εντολή στην οθόνη να ανανεωθεί, η ρουτίνα γραφικών «κλειδώνει» τον Mutex, αντιγράφει με ασφάλεια όλα τα νέα δεδομένα (όπως πίεση, θερμοκρασίες και ταχύτητα) σε μια τοπική, δική της μνήμη, και αμέσως ξεκλειδώνει τον Mutex. Χάρη σε αυτόν τον διαχωρισμό, η διεργασία της οθόνης δεν μπλοκάρει ποτέ τις διαδικασίες επικοινωνίας, εγγυώμενη ότι τα γραφικά δεν θα "παγώσουν", ανεξάρτητα από ενδεχόμενα προβλήματα επικοινωνίας ή διακοπές στη μετάδοση δεδομένων από τους αισθητήρες του οχήματος.



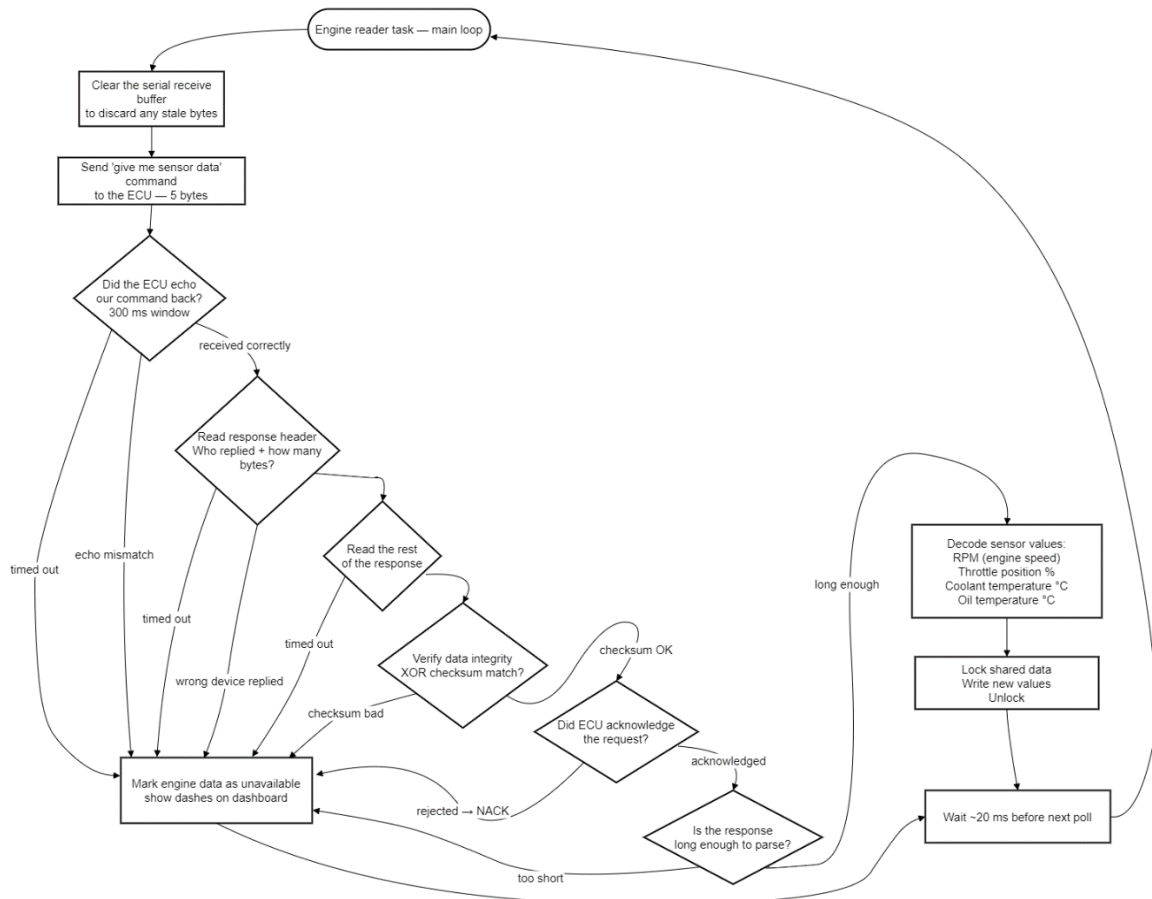
Σχήμα 5-2. Διάγραμμα Αλληλουχίας Επικοινωνίας (Task Communication Sequence Diagram) και ασφαλής διαχείριση κοινόχρηστης μνήμης

5.6 K-line task

Η διεργασία K-line αναλαμβάνει την άντληση των παραμέτρων απευθείας από την εργοστασιακή μονάδα ελέγχου (ECU) του οχήματος. Ο τρόπος λειτουργίας της αποτυπώνεται λεπτομερώς στο αντίστοιχο διάγραμμα ροής άντλησης δεδομένων κινητήρα και λειτουργίας του ιδιοταγούς πρωτοκόλλου BMW DS2 μέσω της γραμμής K-line.. Για την υλοποίηση της επικοινωνίας στον μικροελεγκτή ESP32-S3, αξιοποιήθηκε ως βάση η ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκη «ds2», η οποία διαχειρίζεται το ιδιοταγές διαγνωστικό πρωτόκολλο επικοινωνίας πάνω στο φυσικό επίπεδο του ISO

9141. Η διασύνδεση ρυθμίστηκε στο υλικό (hardware) μέσω της σειριακής θύρας UART2 με ρυθμό μετάδοσης 9600 baud και διαμόρφωση πλαισίου 8E1 (8 bits δεδομένων, Άρτια ισοτιμία/Even parity, 1 stop bit). Ένα από τα βασικά ζητήματα που επιλύει λογισμικά η συγκεκριμένη ρουτίνα επικοινωνίας είναι η διαχείριση του echo. Λόγω της φυσικής τοπολογίας του ενός καλωδίου (single-wire) που χαρακτηρίζει το K-line, κάθε byte που εκπέμπει ο μικροελεγκτής (TX) δημιουργεί ηλεκτρική ανάκλαση και διαβάζεται ταυτόχρονα από τον δικό του δέκτη (RX). Ο αλγόριθμος της διεργασίας έχει σχεδιαστεί ώστε να φιλτράρει δυναμικά αυτή την ανάκλαση, διαχωρίζοντας τις δικές του εντολές από την πραγματική απάντηση της ECU.

Σε επίπεδο λειτουργίας, το λογισμικό εκτελεί έναν συνεχή βρόχο ερωταποκρίσεων (polling). Αποστέλλει διαρκώς την εντολή «Γενικών Τιμών» (General Values), η οποία έχει τη δεκαεξαδική δομή {0x12, 0x05, 0x0B, 0x03, 0x1F}. Το πακέτο αυτό ακολουθεί αυστηρά τη δομή του πρωτοκόλλου DS2, περιλαμβάνοντας το αναγνωριστικό της συσκευής-στόχου (όπου 0x12 αντιστοιχεί στην ECU), το συνολικό μήκος του μηνύματος, το ωφέλιμο φορτίο (payload) και το τελικό άθροισμα ελέγχου (XOR Checksum). Μόλις ληφθεί η απάντηση, η διεργασία υπολογίζει ξανά το άθροισμα ελέγχου για να βεβαιωθεί ότι το πακέτο δεν αλλοιώθηκε από ηλεκτρικό θόρυβο κατά τη μετάδοση. Εφόσον το πακέτο κριθεί έγκυρο, η ρουτίνα αντιστοιχίζει συγκεκριμένες θέσεις (offsets) του πακέτου για να εξάγει τις τιμές των στροφών του κινητήρα, της θέσης της πεταλούδας (TPS) και των θερμοκρασιών. Έπειτα, περνάει τα ακατέργαστα δεδομένα από την κατάλληλη μαθηματική μετατροπή (κλιμάκωση) και ενημερώνει την κοινόχρηστη μνήμη του συστήματος, προσφέροντάς τα έτοιμα προς απεικόνιση στο γραφικό περιβάλλον της οθόνης.



Σχήμα 5-3. Διάγραμμα ροής άντλησης δεδομένων κινητήρα και λειτουργίας του ιδιοπαγούς πρωτοκόλλου BMW DS2 μέσω της γραμμής K-line.

5.7 STM32 UART link

Για να συνομιλήσει με τον δευτερεύον μικροελεγκτή STM32, ο ESP32 διατηρεί μια μόνιμη σειριακή σύνδεση (UART) στα 115200 baud. Η ροή της πληροφορίας είναι αμφίδρομη και απολύτως συγχρονισμένη:

- **Λήψη από STM32 (RX):** Μια διεργασία ακούει διαρκώς τη σειριακή θύρα περιμένοντας ένα πακέτο κειμένου, δομημένο σε μορφή CSV (Comma-Separated Values) δεκατεσσάρων τιμών. Μόλις ανιχνευθεί ο χαρακτήρας αλλαγής γραμμής, το λογισμικό του ESP32 χωρίζει το κείμενο, απομονώνει τα 14 διαφορετικά πεδία (όπως την ταχύτητα GPS, την πίεση του MAP και την κατάσταση των πλήκτρων), τα μετατρέπει από κείμενο σε αριθμούς και τα αποθηκεύει.
- **Αποστολή προς STM32 (TX):** Ταυτόχρονα, ο ESP32 αποστέλλει πίσω ένα σύντομο πακέτο ελέγχου. Μέσω αυτού, ενημερώνει τον STM32 για το εάν πρέπει να ανάψει το shift-light ή αν χρειάζεται να ενεργοποιήσει την έξοδο low-side output βάσει των ρυθμίσεων του οδηγού.

5.8 CAN wideband receiver

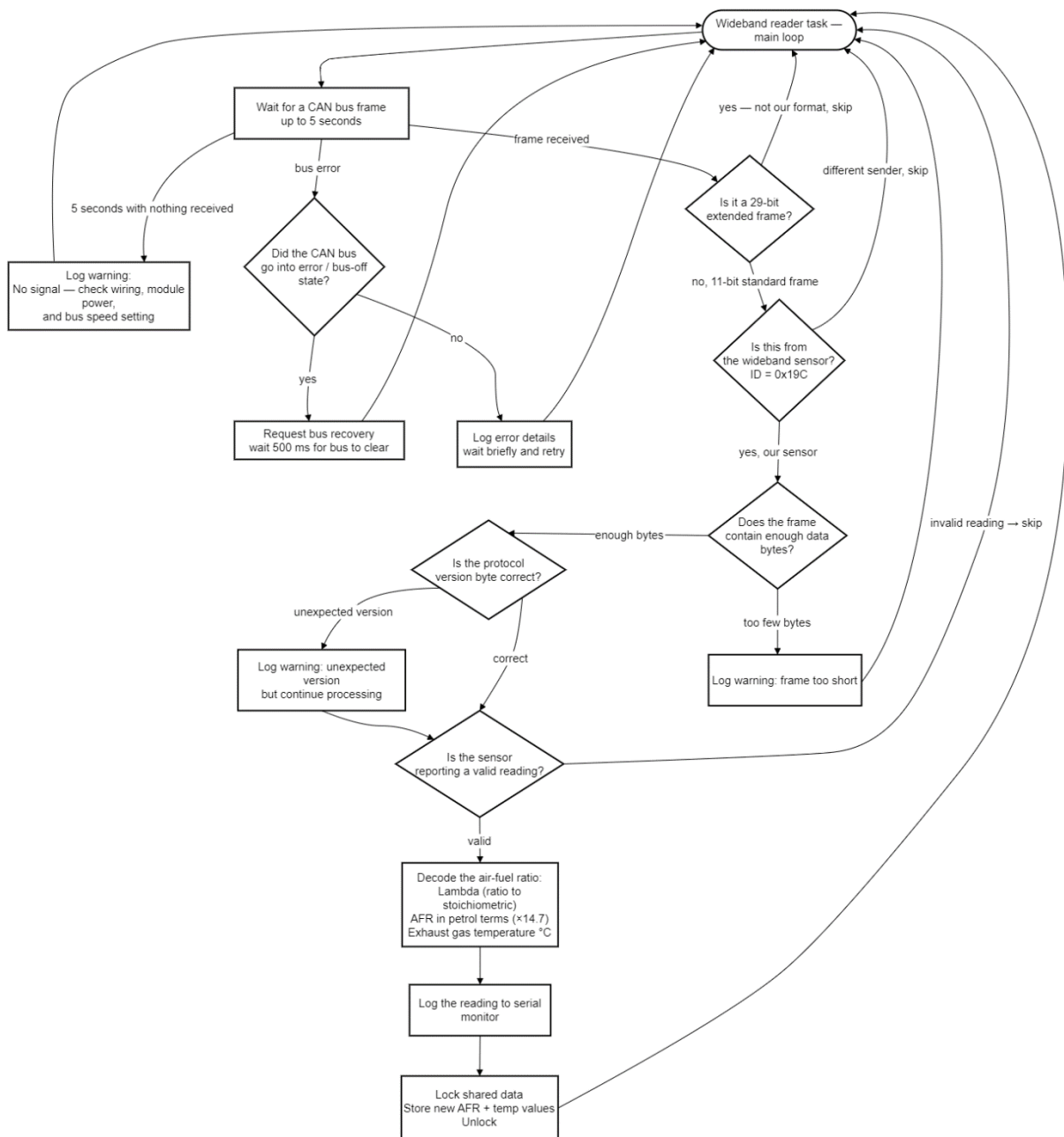
Η αναλογία αέρα-καυσίμου (Lambda / AFR) είναι από τις πιο κρίσιμες μετρήσεις για την ασφάλεια ενός βελτιωμένου κινητήρα. Η συλλογή της περιγράφεται στο διάγραμμα ροής λήψης και υπολογισμού

της αναλογίας αέρα-καυσίμου (AFR) μέσω του διαύλου επικοινωνίας CAN. Ο ενσωματωμένος ελεγκτής TWAI του ESP32 ρυθμίζεται στην ταχύτητα των 500 kbit/s και σε Κανονική Λειτουργία (Normal Mode). Αυτό συμβαίνει διότι το κύκλωμα πρέπει να απαντά με πακέτα επιβεβαίωσης (ACK) στον εξωτερικό ελεγκτή μισEF1, αλλιώς ο τελευταίος θα καταγράψει σφάλμα στην επικοινωνία.

Η διεργασία του λογισμικού περιμένει στοχευμένα μηνύματα με το αναγνωριστικό 0x190. Κατά τη λήψη αυτού του πακέτου, εκτελούνται αλγοριθμικά τα εξής βήματα:

1. **Έλεγχος Εγκυρότητας (Valid Flag):** Ελέγχεται το πρώτο byte του ωφέλιμου φορτίου. Αν είναι 0, ο αισθητήρας βρίσκεται σε φάση προθέρμανσης, τα δεδομένα αγνοούνται και η οθόνη προβάλλει προσωρινά το σύμβολο "-".
2. **Εξαγωγή Λάμδα:** Εφόσον ο αισθητήρας είναι έτοιμος, η τιμή του λάμδα εξάγεται συνενώνοντας τα bytes 2 και 3 του πακέτου. Η τιμή αυτή διαιρείται με το 10.000 για να προκύψει ο πραγματικός δεκαδικός αριθμός.
3. **Υπολογισμός AFR:** Ο κώδικας υπολογίζει τη συνολική αναλογία πολλαπλασιάζοντας το λάμδα με τη στοιχειομετρική αναλογία της βενζίνης (14.7).

Παράλληλα, διαθέτει έναν μηχανισμό ασφαλείας (timeout) όπου εάν περάσουν 5 δευτερόλεπτα χωρίς να ληφθεί πακέτο, το λογισμικό αντιλαμβάνεται αποσύνδεση, περνάει το σύστημα σε κατάσταση σφάλματος και προβάλλει σχετική ένδειξη στην οθόνη.



Σχήμα 5-4. Διάγραμμα ροής λήψης και υπολογισμού της αναλογίας αέρα-καυσίμου (AFR) μέσω του διαύλου επικοινωνίας CAN.

5.9 Δομή λογισμικού STM32

Όπως περιγράφεται στο Διάγραμμα Βρόχου Λειτουργίας (Main Loop Flowchart) (Παράρτημα Β), ο κώδικας που εκτελείται στον STM32F401RE έχει εντελώς διαφορετική φιλοσοφία από αυτόν του ESP32. Στον STM32 δεν υπάρχει κανένα βαρύ λειτουργικό σύστημα. Ο κώδικας εκτελείται σε έναν ατέρμονο βρόχο. Η αποστολή του είναι να διαχειρίζεται τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου (όπως η γραμμή δεδομένων των NeoPixel LEDs), να διαβάζει αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και ύστερα να τοποθετεί τα πάντα σε ένα καθαρό πακέτο και να το αποστέλλει στον ESP32.

5.10 GPS, inputs και buttons στον STM32

Ο STM32 διαχειρίζεται τα δεδομένα του φυσικού κόσμου με αλγορίθμους που περιγράφονται αναλυτικά στα Διαγράμματα Ροής του Παραρτήματος:

- **Αρχικοποίηση και NMEA Parsing του GPS:** Κατά την εκκίνηση, το λογισμικό (όπως φαίνεται στο *GPS Initialisation Flowchart*) εκτελεί "Baud Rate Detection", δοκιμάζοντας διάφορες ταχύτητες μέχρι να «κλειδώσει» την επικοινωνία με τον δέκτη u-blox. Στη συνέχεια, του αποστέλλει δυαδικές εντολές διαμόρφωσης (UBX Protocol). Τον «αναγκάζει» να αυξήσει τον ρυθμό ανανέωσης στα 10 Hz και να κόψει την περιττή πληροφορία, κρατώντας μόνο τις προτάσεις NMEA (RMC και GGA). Έπειτα, στον κύριο βρόχο του, διαβάζει τα δεδομένα χαρακτήρα-χαρακτήρα, υπολογίζοντας διαρκώς την πραγματική ταχύτητα του οχήματος.
- **Αναλογικές Μετρήσεις (Inputs):** Ο εσωτερικός μετατροπέας (ADC) 12-bit διαβάζει τις αναλογικές τάσεις των ακροδεκτών. Το λογισμικό δεν αποστέλλει τις ακατέργαστες ψηφιακές τιμές, αλλά εφαρμόζει εσωτερικά τις απαραίτητες μαθηματικές συναρτήσεις μεταφοράς. Για παράδειγμα, η ψηφιακή τιμή της στιγμιαίας τάσης του αισθητήρα MAP (MPXH6400A) μετατρέπεται απευθείας σε πραγματική απόλυτη πίεση (kiloPascals) μέσω της γραμμικής εξίσωσης $P = 82.61 * V + 3.48$, προσφέροντας στον κεντρικό ελεγκτή ESP32 ένα έτοιμο, αξιοποιήσιμο φυσικό μέγεθος.
- **Αποθορυβοποίηση Πλήκτρων (Debounce):** Επειδή τα μηχανικά πλήκτρα δημιουργούν πολλαπλούς ψευδείς ηλεκτρικούς παλμούς (bouncing) κατά την πίεσή τους, ο STM32 δεν δέχεται την είσοδο τυφλά. Υλοποιεί μια ψηφιακή μηχανή τεσσάρων καταστάσεων (IDLE, DEBOUNCING, PRESSED, RELEASED), η οποία απεικονίζεται στο *Debounce State Machine Flowchart*. Όταν ανιχνευθεί αλλαγή στην τάση, η μηχανή ξεκινά έναν χρονομετρητή 25 ms. Εάν το πλήκτρο παραμένει πατημένο και μετά τη λήξη αυτού του αυστηρού χρονικού παραθύρου, μόνο τότε η πίεση θεωρείται έγκυρη και καταγράφεται.

5.11 Επίλογος

Η υλοποίηση του λογισμικού αναδεικνύει την απόλυτη επιτυχία της λογικής Master-Slave μικροελεγκτών. Ενσωματώνοντας το FreeRTOS στον ESP32, δημιουργήθηκε μια πλατφόρμα ικανή να χειρίζεται βαρύ γραφικό περιβάλλον (LVGL) και πολύπλοκες ρουτίνες ελέγχου, χωρίς να χάνει τις κρίσιμες επικοινωνίες K-Line και CAN για την λήψη των δεδομένων. Παράλληλα, με την ανάθεση της επικοινωνίας του GPS, των αναλογικών μετατροπών και διακοπών και την ανάγνωση καταστάσεων των πλήκτρων πλοήγησης στον STM32, ο κεντρικός μικροελεγκτής απαλλάχθηκε από τον περιττό υπολογιστικό φόρτο. Μέσω της ασφαλούς διαχείρισης της κοινόχρηστης μνήμης και της αποδοτικής ανάλυσης των δεδομένων, επιτυγχάνεται η απρόσκοπτη και ακαριαία ανανέωση των μετρήσεων χωρίς τον κίνδυνο αλλοίωσης της πληροφορίας.

Κεφάλαιο 6ο: Γραφική διεπαφή, ρυθμίσεις και αλγόριθμοι λειτουργίας

6.1 Εισαγωγή

Η γραφική διεπαφή (GUI) και οι ρυθμίσεις είναι η γέφυρα ανάμεσα στα ηλεκτρονικά του συστήματος και τον οδηγό. Πίσω όμως από αυτό που φαίνεται στην οθόνη, λειτουργεί ένα σύνολο αλγορίθμων. Σε αυτό το κεφάλαιο εστιάζουμε στον τρόπο λειτουργίας του λογισμικού και πιο συγκεκριμένα, αναλύεται πώς βελτιώνεται η ανανέωση της οθόνης, πώς λειτουργεί ο ελεγκτής PID για το boost control, πώς υπολογίζεται η σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων και πώς διαχειρίζεται η μόνιμη μνήμη. Στόχος είναι να γίνει κατανοητό πώς το λογισμικό συνδυάζει τις πρωτογενείς μετρήσεις για να εκτελέσει σύνθετους υπολογισμούς πραγματικού χρόνου και να εξασφαλίσει τον δυναμικό έλεγχο του οχήματος.

6.2 Γραφικό περιβάλλον LVGL και SquareLine Studio

Τα γραφικά υλοποιούνται μέσω της βιβλιοθήκης ανοιχτού κώδικα LVGL (έκδοση 9.2.2). Για τον σχεδιασμό των μενού και των οργάνων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SquareLine Studio, το οποίο επιτρέπει την οπτική τοποθέτηση των δεικτών και την αυτόματη παραγωγή του βασικού κώδικα του UI. Η τεχνική πρόκληση στη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι η ομαλή ανανέωση μιας οθόνης υψηλής ανάλυσης (800x480) χωρίς το φαινόμενο του "tearing" (όπου η οθόνη εμφανίζει μισή παλιά και μισή νέα εικόνα).

Για να επιτευχθεί αυτό, ο αλγόριθμος απεικόνισης αξιοποιεί την τεχνική της Διπλής Ενδιάμεσης Μνήμης (Double Buffering) σε συνδυασμό με τη χρήση Bounce Buffer. Πιο συγκεκριμένα, δεσμεύονται δύο μεγάλοι πίνακες μνήμης (frame buffers) στην εξωτερική PSRAM του επεξεργαστή ESP32 και ένας εξαιρετικά γρήγορος ενδιάμεσος χώρος μεγέθους 10 γραμμών στην εσωτερική SRAM. Ο αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής: κατά τη διάρκεια που το κύκλωμα DMA διαβάζει τα δεδομένα κομμάτι-κομμάτι μέσω του bounce buffer και τα μεταφέρει ανεξάρτητα στην οθόνη, ο κεντρικός επεξεργαστής σχεδιάζει το επόμενο καρτέ (frame) στον δεύτερο αδρανή πίνακα. Μόλις η σχεδίαση ολοκληρωθεί, οι ρόλοι των πινάκων αντιστρέφονται. Η κωδικοποίηση των χρωμάτων ακολουθεί το πρότυπο RGB565 (16-bit), κατανέμοντας 5 bit στο κόκκινο χρώμα, 6 στο πράσινο και 5 στο μπλε.

6.3 Οθόνες του συστήματος

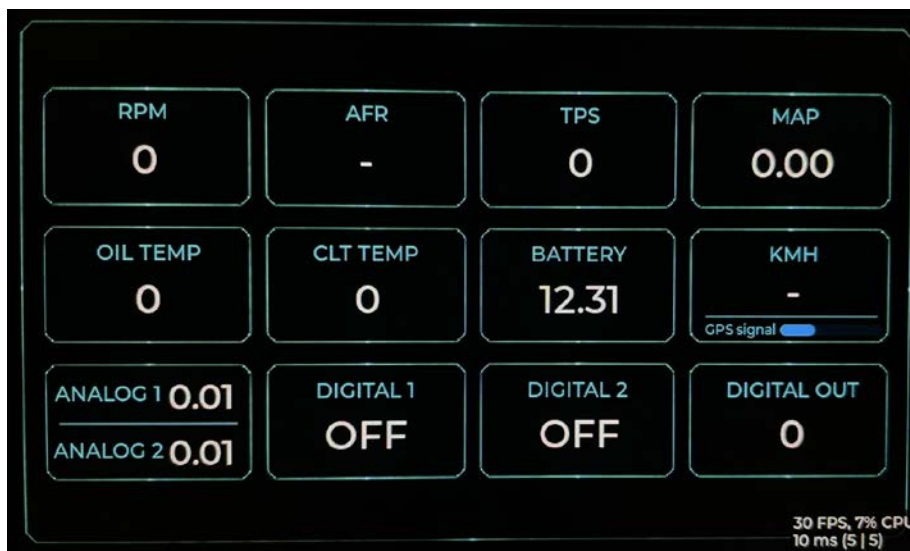
Η διεπαφή έχει σχεδιαστεί σε πέντε (5) διακριτές οθόνες (Screens), η εναλλαγή των οποίων γίνεται με ομαλές οπτικές μεταβάσεις ολίσθησης μέσω των φυσικών πλήκτρων πλοήγησης:

- **Οθόνη 1 & 2:** Αποτελούν τους κύριους πίνακες ενδείξεων, οι οποίοι προβάλλουν ψηφιακά όλα τα δεδομένα (πίεση, θερμοκρασίες, λάμδα κλπ.). Η οθόνη 1 διαθέτει μία δυναμική μπάρα 46 τμημάτων (segments) για την αναπαράσταση των στροφών του κινητήρα ενώ στην οθόνη 2 τα δεδομένα προβάλλονται μόνο αριθμητικά.
- **Οθόνη 3 (Settings):** Το κεντρικό μενού ρυθμίσεων, όπου ο χρήστης επιλέγει τις λειτουργίες του ελέγχου υπερπλήρωσης (Boost), των ορίων του shift-light και των ρυθμίσεων του οχήματος για την λειτουργία του αλγορίθμου ανίχνευσης σχέσης ταχυτήτων.
- **Οθόνη 4 (Boost Map Editor) & Οθόνη 5 (Vehicle Config):** Αποτελούν οθόνες παραμετροποίησης δεδομένων. Η Οθόνη 4 περιλαμβάνει έναν πίνακα 21x15 κελιών για τη ρύθμιση του χάρτη υπερπλήρωσης, οι τιμές που εμφανίζονται είναι ανάλογες με το αν ο

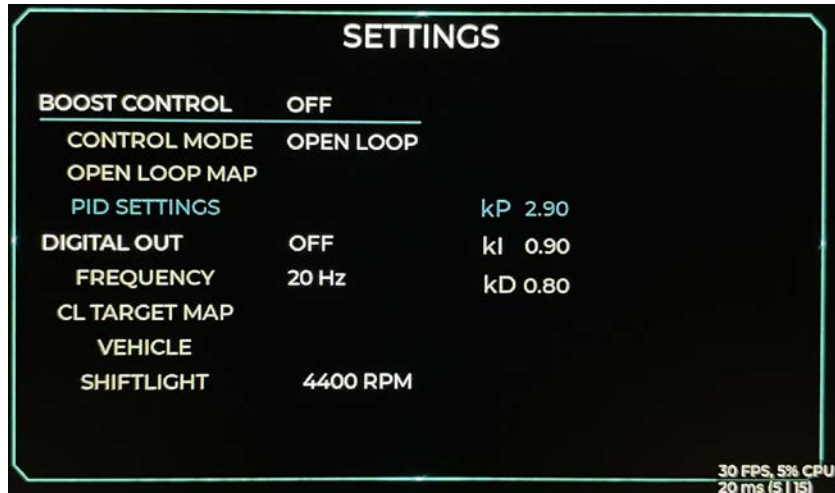
χρήστης εισέρχεται στην οθόνη μέσω των δύο επιλογών OPEN LOOP MAP και CL TARGET MAP. Η Οθόνη 5 σχετίζεται με τις παραμέτρους του κιβωτίου. Η αλληλεπίδραση και η επεξεργασία των αριθμητικών τιμών σε αυτές τις οθόνες γίνεται αποκλειστικά με τη χρήση των φυσικών πλήκτρων πλοήγησης, επιτρέποντας στον οδηγό να αλλάζει χειροκίνητα τα δεδομένα λειτουργίας.



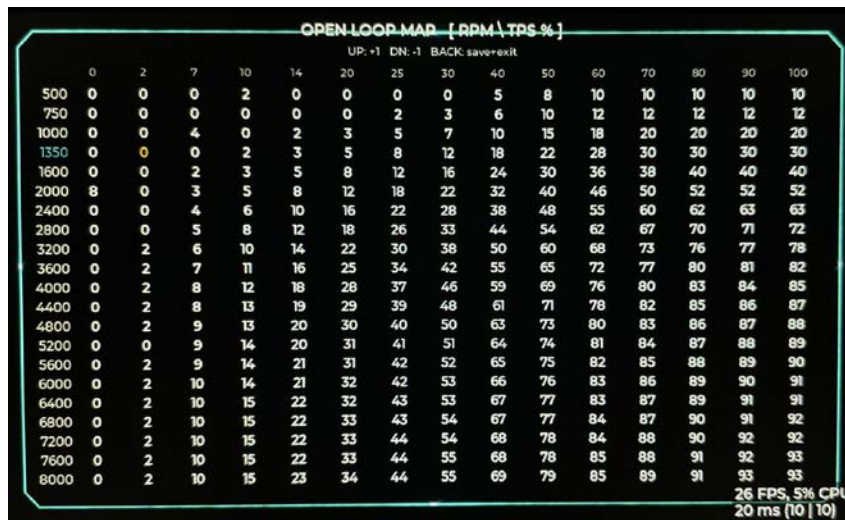
Εικόνα 6-1. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνη 16 1



Εικόνα 6-2. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνη 2



Εικόνα 6-3. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνης 3



Εικόνα 6-4. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνης 4

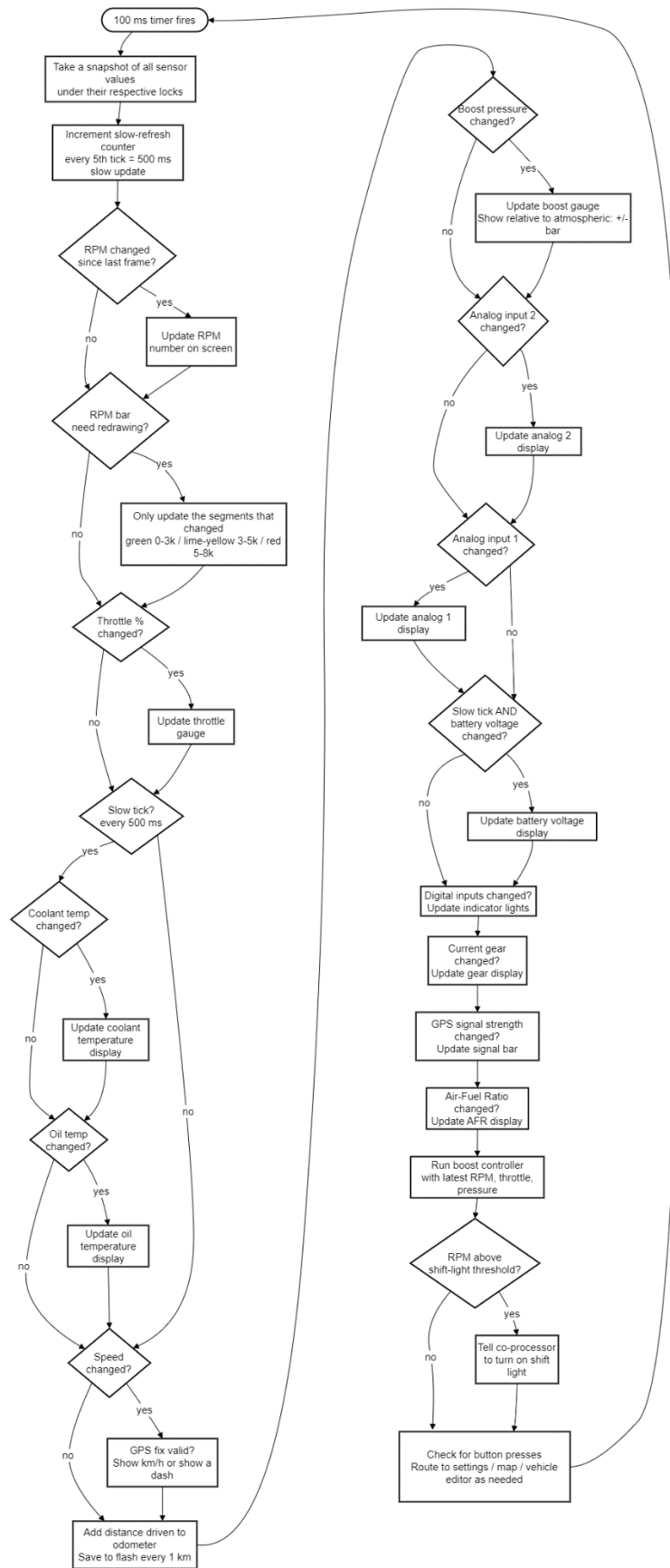


Εικόνα 6-5. Διεπαφή χρήστη (UI) οθόνης 5

6.4 Βελτιστοποίηση ενημέρωσης UI

Η αδιάκοπη αποστολή εντολών επανασχεδίασης των στοιχείων (όπως η αλλαγή του κειμένου της ταχύτητας 10 φορές το δευτερόλεπτο) καταναλώνει τεράστια επεξεργαστική ισχύ. Για να αποφευχθεί η υπερφόρτωση της CPU, αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι υστέρησης και ελέγχου καταστάσεων:

1. **Αλγόριθμος "Dirty-Check":** Το σύστημα διατηρεί σε ένα τοπικό αρχείο (cache) τις προηγούμενες τιμές κάθε μεταβλητής που προβάλλεται. Σε κάθε κύκλο λειτουργίας των 100 ms, ο αλγόριθμος συγκρίνει την τρέχουσα τιμή (π.χ. στροφές κινητήρα) με την αποθηκευμένη. Εντολή προς τη βιβλιοθήκη LVGL για ανανέωση του συγκεκριμένου οπτικού στοιχείου δίνεται αυστηρά και μόνο εάν εντοπιστεί μαθηματική διαφορά. Αν οι στροφές παραμένουν σταθερές, ο επεξεργαστής δεν ξοδεύει χρόνο για την επανασχεδίαση των τμημάτων της δυναμικής μπάρας ένδειξης στροφών.
2. **Μηχανισμός Αργού Κύκλου (Slow-Tick):** Ορισμένες φυσικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία του ψυκτικού υγρού, παρουσιάζουν πολύ αργό ρυθμό μεταβολής. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει έναν μετρητή υποδιαίρεσης, επιτρέποντας την ανανέωση αυτών των παραμέτρων μόνο κάθε 500 ms. Έτσι εξαλείφεται ο ενοχλητικός οπτικός θόρυβος της συνεχούς εναλλαγής δεκαδικών ψηφίων, βελτιώνοντας την εργονομία του οδηγού.



Σχήμα 6-1. Λογική περιοδικής ανανέωσης της γραφικής διεπαφής χρήστη και αλγόριθμος ελέγχου καταστάσεων "Dirty-Check"

6.5 Πλοήγηση και χειρισμός πλήκτρων

Η διάδραση με το σύστημα εκτελείται μέσω τεσσάρων μηχανικών διακοπών. Επειδή τα μηχανικά ελάσματα κατά την επαφή τους αναπηδούν (bouncing), δημιουργώντας πολλαπλούς ψευδείς ηλεκτρικούς παλμούς, ο STM32 εφαρμόζει μια διαδικασία τεσσάρων σταδίων (IDLE, DEBOUNCING, PRESSED, RELEASED):

- **IDLE (Αδράνεια):** Σε αυτή την αρχική κατάσταση αναμονής, το σύστημα παρακολουθεί συνεχώς την είσοδο του διακόπτη. Όσο δεν ανιχνεύεται καμία μηχανική επαφή (μεταβολή της τάσης) παραμένει αδρανές.
- **DEBOUNCING (Αποθορυβοποίηση):** Όταν η τάση της ψηφιακής εισόδου μεταβληθεί, το σύστημα περνάει στην κατάσταση DEBOUNCING και ξεκινά έναν χρονομετρητή (timer) 25 ms.
- **PRESSED (Επικυρωμένο Πάτημα):** Αν μετά την πάροδο αυτού του χρονικού περιθωρίου η τάση παραμένει σταθερή, ο αλγόριθμος επικυρώνει το πάτημα (μετάβαση στο PRESSED) και στέλνει την εντολή στον κεντρικό ελεγκτή ESP32.
- **RELEASED (Απελευθέρωση):** Όταν ο χρήστης αφήσει το πλήκτρο και η τάση αρχίσει να επανέρχεται στην αρχική της τιμή, το σύστημα μεταβαίνει σε αυτή την κατάσταση. Εφαρμόζεται εκ νέου μια σύντομη χρονοκαθυστέρηση για την απόσβεση των μηχανικών αναπηδήσεων κατά την απομάκρυνση των ελασμάτων και τέλος ο αλγόριθμος επιστρέφει στην κατάσταση IDLE, έτοιμος να καταγράψει το επόμενο πάτημα.

Στο επίπεδο της γραφικής διεπαφής (ESP32), η πλοήγηση διαχειρίζεται μέσω μιας ανεξάρτητης λογικής μηχανής: κατά την πίεση των πλήκτρων UP/DOWN, το "ενεργό" κελί (focus) μετατοπίζεται στις αντίστοιχες συντεταγμένες της οθόνης. Προκειμένου ο χρήστης να αντιλαμβάνεται άμεσα τη θέση του, το εκάστοτε επιλεγμένο κελί αλλάζει δυναμικά χρώμα. Όταν πιεστεί το πλήκτρο ENTER, το σύστημα αλλάζει την κατάσταση του κελιού σε "Επεξεργασία" (Edit Mode), παρέχοντας παράλληλα οπτική ανατροφοδότηση με νέα αλλαγή χρώματος. Σε αυτή τη φάση, τα ίδια πλήκτρα (UP/DOWN) πλέον προσθέτουν ή αφαιρούν μαθηματικές μονάδες από τη μεταβλητή, ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζονται όρια μεγίστου/ελαχίστου (clamping) για την αποτροπή εισαγωγής άκυρων τιμών.

6.6 Έλεγχος υπερπλήρωσης (Boost Control) και αλγόριθμοι λειτουργίας

Η διαχείριση της πίεσης υπερπλήρωσης αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες αλγοριθμικές λειτουργίες του συστήματος, καθώς η ακρίβειά της καθορίζει άμεσα την απόδοση και την ασφάλεια του κινητήρα. Η ρύθμιση της πίεσης επιτυγχάνεται ηλεκτρονικά μέσω μιας ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας τριών θυρών (3-port solenoid valve).

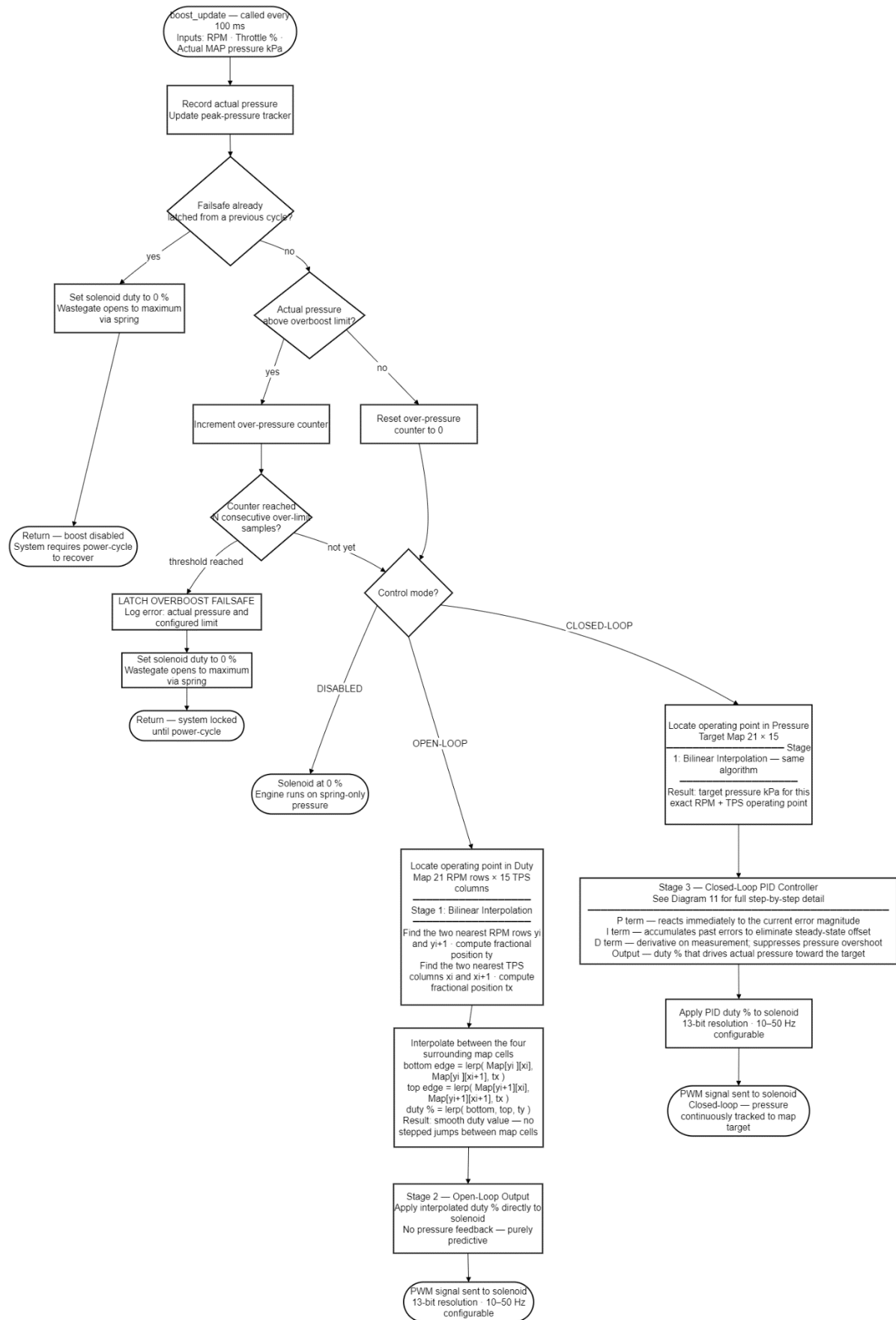
Η βαλβίδα παρεμβάλλεται στη γραμμή που συνδέει την πολλαπλή εισαγωγής με τον πνευματικό ενεργοποιητή του wastegate. Ουσιαστικά, η βαλβίδα αναλαμβάνει να εκτονώνει σκόπιμα και ελεγχόμενα την πίεση (ή την υποπίεση) της γραμμής προς την ατμόσφαιρα. Εκτονώνοντας τον αέρα στην ατμόσφαιρα αποτρέπει την πίεση από το να φτάσει στον ενεργοποιητή του wastegate. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πορτάκι του wastegate να διατηρείται τελείως κλειστό σε πολύ μεγαλύτερες πιέσεις από αυτές που θα επέτρεπε φυσιολογικά η μηχανική σκληρότητα του ελατηρίου του. Το λογισμικό ελέγχει αυτή τη βαλβίδα εξάγοντας ένα σήμα Παλμοδοτικής Διαμόρφωσης (PWM) υψηλής ανάλυσης 13-bit, με δυναμικά ρυθμιζόμενη συχνότητα λειτουργίας από 10 έως 50 Hz.

Όπως αποτυπώνεται στα αντίστοιχα Διαγράμματα Ροής (Σχήμα 6.2 και Σχήμα 6.3), η αρχιτεκτονική του ελέγχου δομείται σε τέσσερα λογικά στάδια:

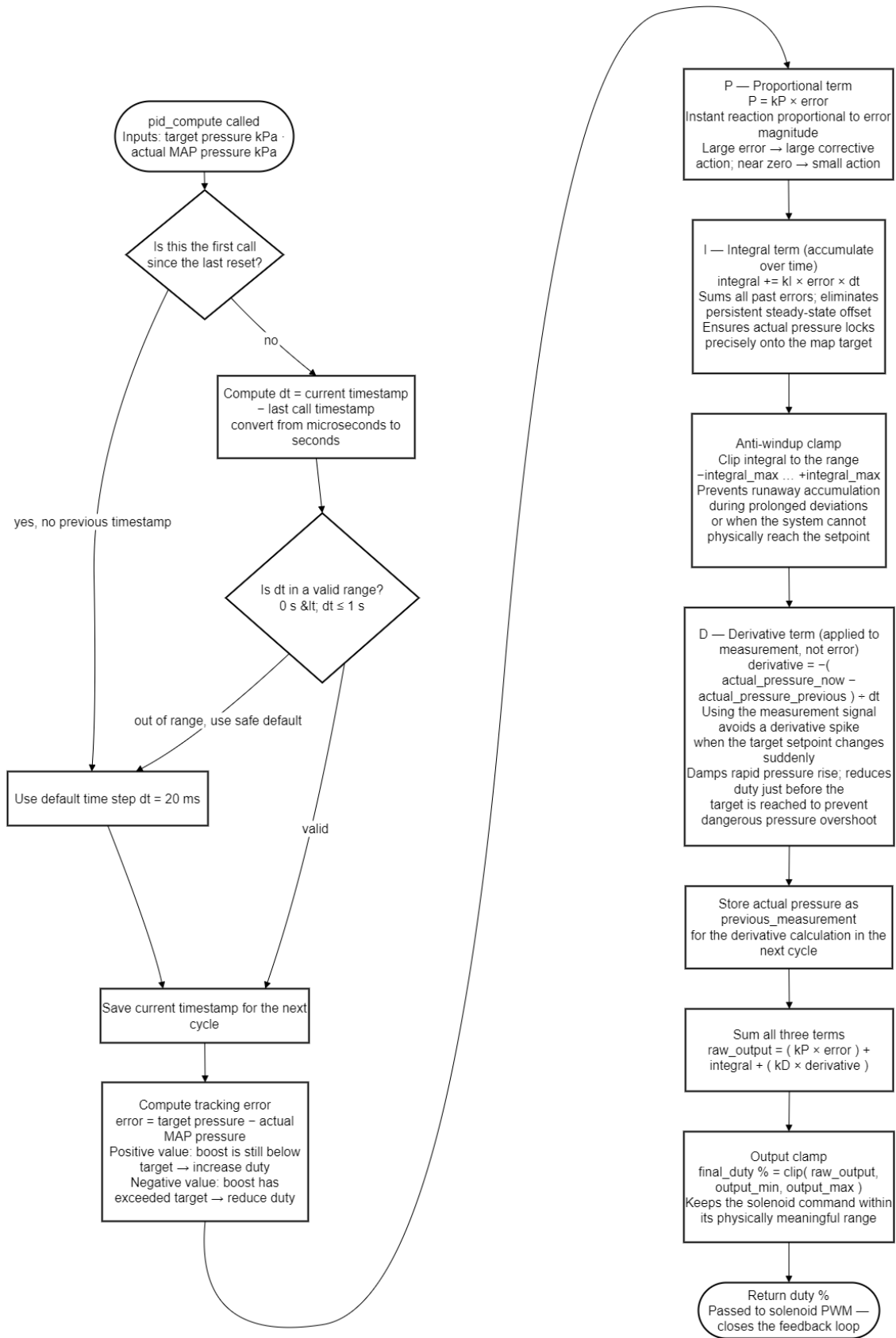
1. **Λογική Διγραμμικής Παρεμβολής (Bilinear Interpolation):** Η βασική λειτουργία του συστήματος βασίζεται στην άντληση δεδομένων από δύο τρισδιάστατους πίνακες (χάρτες) μεγέθους 21x15 κελιών. Ο άξονας X αντιπροσωπεύει τις Στροφές Κινητήρα (RPM) και ο άξονας Y το ποσοστό πατήματος του πεντάλ γκαζιού (TPS). Κατά την οδήγηση ο κινητήρας λειτουργεί διαρκώς σε ενδιάμεσες δεκαδικές τιμές που δεν συμπίπτουν ακριβώς με τα προκαθορισμένα κελιά του πίνακα. Το διάγραμμα ροής περιγράφει τον αλγόριθμο διγραμμικής παρεμβολής που εκτελείται σε αυτή την περίπτωση. Το λογισμικό δεν στρογγυλοποιεί την τιμή, αλλά εντοπίζει τα τέσσερα πιο κοντινά κελιά γύρω από το τρέχον σημείο λειτουργίας του κινητήρα και στη συνέχεια υπολογίζει έναν σταθμισμένο μέσο όρο βάσει της απόστασης του σημείου από το κάθε κελί. Αυτό παράγει μια απολύτως ομαλή μετάβαση τιμών, αποτρέποντας απότομα скалоπάτια και τραντάγματα κατά την επιτάχυνση του οχήματος.
2. **Λειτουργία Ανοιχτού Βρόχου (Open-Loop / Feedforward):** Στην κατάσταση ανοιχτού βρόχου το σύστημα λειτουργεί αμιγώς προβλεπτικά, χωρίς να ελέγχει το τελικό αποτέλεσμα. Εφαρμόζοντας τη λογική της παρεμβολής πάνω στον χάρτη Duty Map, εξάγεται το βασικό ποσοστό λειτουργίας της βαλβίδας το οποίο κυμαίνεται από 0% έως 100%. Σε συνθήκες ρελαντί ή πολύ χαμηλού φορτίου το duty cycle μπορεί να είναι σε ποσοστό 0%. Σε αυτή την περίπτωση η βαλβίδα μένει ανενεργή και δεν εκτονώνει αέρα στην ατμόσφαιρα και ο κινητήρας λειτουργεί με τη χαμηλή εργοστασιακή πίεση του μηχανικού ελατηρίου του ενεργοποιητή. Αντιθέτως σε συνθήκες πλήρους επιτάχυνσης (τέρμα γκάζι σε υψηλές στροφές), ο αλγόριθμος ρυθμίζεται σε μεγάλα ποσοστά (π.χ. 85-93%). Σε αυτή την περίπτωση, η βαλβίδα εκτονώνει σχεδόν όλο τον αέρα στην ατμόσφαιρα, κρατώντας το wastegate ερμητικά κλειστό για την παραγωγή μέγιστης πίεσης.
3. **Λειτουργία Κλειστού Βρόχου (Closed-Loop / PID Controller):** Για να ταυτιστεί η πραγματική πίεση με την επιθυμητή, ενεργοποιείται ο κλειστός βρόχος (όπως φαίνεται στο *Διάγραμμα Ροής Ελεγκτή PID* στο Παράρτημα). Εδώ, η λογική της παρεμβολής εφαρμόζεται στον δεύτερο χάρτη τον Pressure Target Map, ο οποίος υποδεικνύει διαρκώς στο σύστημα ποια είναι η πίεση-στόχος που ζητάει ο οδηγός. Σε κάθε κύκλο του βρόχου (loop), το λογισμικό διαβάζει την πραγματική πίεση από τον αισθητήρα MAP και υπολογίζει το σφάλμα (δηλαδή τη διαφορά, Στόχος μείον Πραγματικότητα). Ο αλγόριθμος PID αναλαμβάνει να μηδενίσει αυτό το σφάλμα μέσω τριών παραμέτρων:
 - **Ο Αναλογικός όρος (P):** Αντιδρά άμεσα και επιθετικά, αυξάνοντας τη δράση της βαλβίδας όταν το σφάλμα είναι μεγάλο.
 - **Ο Ολοκληρωτικός όρος (I):** Αθροίζει συνεχώς τα μικρά, επίμονα σφάλματα παρελθόντος χρόνου. Αναλαμβάνει να κλείσει τη μόνιμη (στατική) απόκλιση, κλειδώνοντας ακριβώς στην πίεση στόχο.
 - **Ο Παραγωγικός όρος (D):** Λειτουργεί ως αμορτισέρ φρένο. Παρακολουθεί το πόσο γρήγορα ανεβαίνει η πίεση και ελαττώνει τη δράση της βαλβίδας λίγο πριν επιτευχθεί ο στόχος, αποτρέποντας την επικίνδυνη στιγμιαία υπερύψωση (overshoot) της πίεσης. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου PID προστίθεται στο ποσοστό του πίνακα ανοιχτού βρόχου, συνθέτοντας την τελική εντολή που αποστέλλεται στη βαλβίδα.
4. **Μηχανισμός Ασφαλείας (Overboost Failsafe):** Για την προστασία του κινητήρα όπως απεικονίζεται διάγραμμα ροής, υπάρχει ένας ανεξάρτητος ελεγκτής ασφαλείας. Εάν για οποιονδήποτε λόγο η πραγματική πίεση ξεπεράσει το καθορισμένο όριο (Overboost Limit), το λογισμικό παρεμβαίνει ακαριαία αγνοώντας τους χάρτες και τον PID και μηδενίζει το σήμα της βαλβίδας (0%). Μόλις το σήμα γίνει μηδέν, η βαλβίδα σταματά να εκτονώνει τον αέρα στην

Κεφάλαιο 6

ατμόσφαιρα, οπότε όλη η παραγόμενη πίεση οδεύει κατευθείαν στον μηχανικό ενεργοποιητή ανοίγοντας το wastegate στο μέγιστο, λειτουργώντας δηλαδή μηχανικά μέσω του ελατηρίου του ενεργοποιητή. Το σύστημα κλειδώνει σε αυτή την κατάσταση ασφαλείας και απαιτεί επανεκκίνηση του συστήματος για να επιτρέψει ξανά στη λειτουργία ελέγχου υπερπλήρωσης.



Σχήμα 6-2. Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου ελέγχου υπερπλήρωσης (Boost Control Flowchart) και εναλλαγής καταστάσεων βρόχου

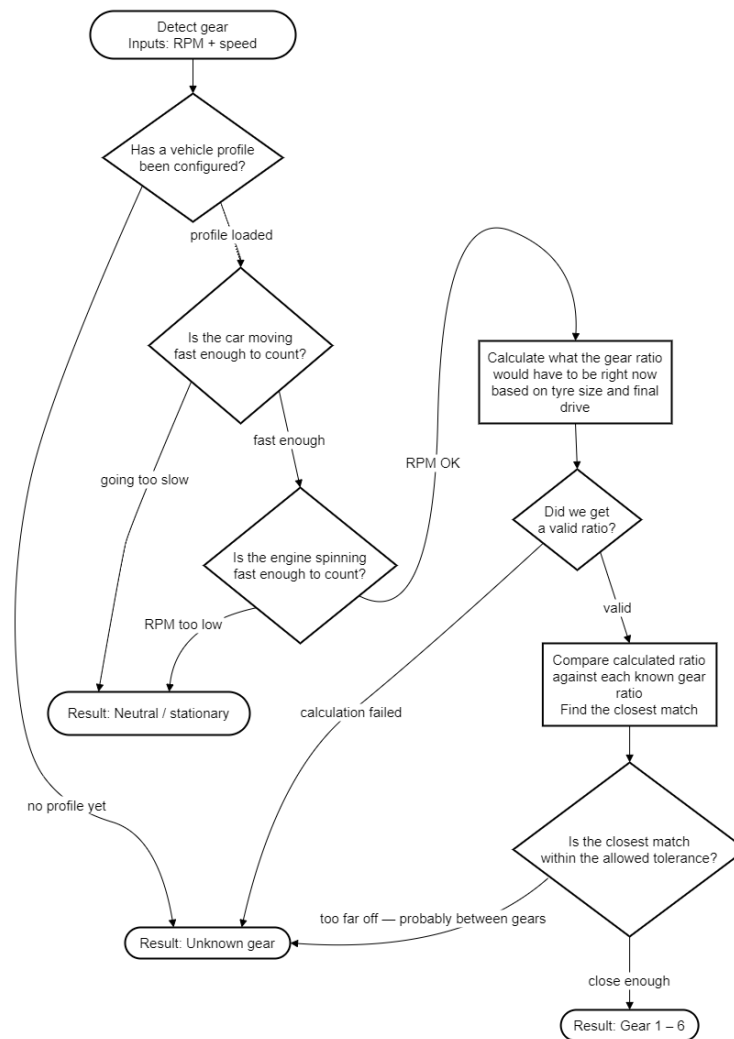


Σχήμα 6-3. Διάγραμμα ροής του ελεγκτή PID για τον υπολογισμό του σφάλματος και την παραγωγή του σήματος PWM (PID Controller Flow)

6.7 Ανίχνευση σχέσης κιβωτίου

Η προβολή της τρέχουσας ταχύτητας (Gear Detection) δεν βασίζεται σε φυσικούς αισθητήρες στο σασμάν, αλλά σε έναν αλγόριθμο κινηματικής εξίσωσης, ο οποίος συνδυάζει τα δεδομένα των στροφών του κινητήρα και του GPS. Τα μαθηματικά βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

1. **Υπολογισμός στροφών τροχού (Wheel RPM):** Η ταχύτητα του GPS (σε km/h) μετατρέπεται σε μέτρα ανά λεπτό. Διαιρώντας την με την εξωτερική περίμετρο του ελαστικού (που έχει εισαγάγει ο οδηγός), προκύπτουν οι πραγματικές στροφές περιστροφής των κινητήριων τροχών.
2. **Αναγωγή στον άξονα εξόδου του κιβωτίου:** Ο αλγόριθμος πολλαπλασιάζει το Wheel RPM με τον Λόγο Τελικής Μετάδοσης (Final Drive Ratio / Βήμα διαφορικού). Αυτό μας δίνει τις στροφές εξόδου του κιβωτίου (Transmission RPM).
3. **Υπολογισμός Σχέσης (Ratio):** Διαιρώντας τις Στροφές Κινητήρα (Engine RPM) με το Transmission RPM, εξάγεται ο τρέχων, στιγμιαίος λόγος μετάδοσης.
4. Τέλος, ο αλγόριθμος εκτελεί μια σειριακή αναζήτηση (iterative loop). Συγκρίνει τον υπολογισμένο λόγο με τις προ-αποθηκευμένες εργοστασιακές σχέσεις του αυτοκινήτου που έχουν εισαχθεί μέσω του μενού. Αν η διαφορά τους είναι μικρότερη από ένα όριο ανοχής (π.χ. $\pm 10\%$ για την απόσβεση του ολισθήματος του συμπλέκτη), ο αλγόριθμος ταυτοποιεί τη σχέση και την προβάλλει στην οθόνη. Εάν η ταχύτητα του οχήματος πλησιάζει το μηδέν (πέφτοντας κάτω από ένα ελάχιστο προκαθορισμένο όριο), το σύστημα επιστρέφει αυτόματα την ένδειξη «N» (Νεκρά). Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο πως η ανίχνευση και προβολή της νεκράς δεν βασίζεται αποκλειστικά στην ακινητοποίηση του οχήματος. Ακόμη και όταν το αυτοκίνητο βρίσκεται εν κινήσει, το σύστημα ελέγχει διαρκώς τον κινηματικό λόγο. Εάν ο αλγόριθμος υπολογίσει βάσει των τρεχουσών στροφών του κινητήρα σε συνάρτηση με την ταχύτητα έναν λόγο μετάδοσης ο οποίος δεν αντιστοιχεί σε καμία από τις καταχωρημένες σχέσεις του κιβωτίου εντός των ορίων ανοχής (όπως συμβαίνει για παράδειγμα όταν το όχημα ρολάρει με αποσυμπλεγμένη ταχύτητα και τον κινητήρα να έχει πέσει στο ρελαντί), το λογισμικό αναγνωρίζει την απουσία μηχανικής εμπλοκής και προβάλλει εξίσου την ένδειξη «N».



Σχήμα 6-4. Αλγόριθμος κινηματικής εξίσωσης για την αυτόματη ανίχνευση και προβολή της τρέχουσας σχέσης κιβωτίου ταχυτήτων (Gear Detection)

6.8 Odometer και shift-light

Ο υπολογισμός των διανυθέντων χιλιομέτρων (Οδόμετρο) υλοποιείται μέσω αριθμητικής ολοκλήρωσης. Καθώς το GPS αναφέρει τη στιγμιαία ταχύτητα σε m/s με συχνότητα 10 Hz (κάθε 0.1 δευτερόλεπτα), ο αλγόριθμος πολλαπλασιάζει την ταχύτητα με το χρονικό βήμα, εξάγοντας την απόσταση που διανύθηκε σε αυτό το δέκατο του δευτερολέπτου. Αυτό το μικρό μέγεθος προστίθεται ασταμάτητα σε έναν δεκαδικό αθροιστή μεταβλητής στη μνήμη RAM.

Αντίστοιχα, ο μηχανισμός του **Shift-light** είναι ένας αλγόριθμος συγκριτή. Στον κεντρικό βρόχο των 100 ms, εάν η μεταβλητή των στροφών RPM υπερβεί το όριο Shift_Threshold που έχει καθοριστεί, το αντίστοιχο λογικό bit στο πακέτο επικοινωνίας ESP32 προς STM32 αλλάζει σε 1. Ο STM32 λαμβάνει το πακέτο, αξιολογεί τη συνθήκη και στέλνει ψηφιακά τα απαραίτητα bytes (χρώμα RGB: 255, 0, 0) στο πρωτόκολλο επικοινωνίας των LED (WS2812B), με αποτέλεσμα να ανάψουν ακαριαία.

6.9 Αποθήκευση ρυθμίσεων (NVS Persistence)

Η διατήρηση των ρυθμίσεων του οδηγού βασίζεται στο σύστημα NVS (Non-Volatile Storage) του μικροελεγκτή ESP32-S3. Τα δεδομένα οργανώνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες μόνιμης αποθήκευσης:

- **Διαμόρφωση Οχήματος (Vehicle Config):** Αποθηκεύονται 11 βασικές παράμετροι, όπως η περιφέρεια του ελαστικού, η τελική σχέση μετάδοσης, ο αριθμός των ταχυτήτων (4-6), η ελάχιστη ταχύτητα, το ποσοστό ανοχής στροφών (RPM tolerance %) και οι επιμέρους σχέσεις μετάδοσης (σχέσεις 1-6).
- **Χάρτες Ελέγχου Πίεσης (Boost Maps):** Ο χάρτης ανοιχτού βρόχου (open-loop duty map) και ο χάρτης στόχου πίεσης (closed-loop pressure target map), μεγέθους 21x15 κελιών ο καθένας.
- **Γενικές Ρυθμίσεις (Settings):** Αποθηκεύονται επιλογές όπως οι στροφές ενεργοποίησης του shift-light, η ενεργοποίηση του boost control, οι παράμετροι ελέγχου PID (K_p , K_i , K_d) και η συχνότητα λειτουργίας του boost control.
- **Οδόμετρο (Odometer):** Η συνολική διανυθείσα απόσταση.

Η πρόκληση κατά την αποθήκευση είναι η προστασία της μνήμης flash, η οποία διαθέτει περιορισμένο κύκλο ζωής διαγραφών/εγγραφών (wear out). Ο αλγόριθμος προστασίας υπαγορεύει ότι το σύστημα δεν εκτελεί εγγραφή στο NVS κατά τη διάρκεια της πλοήγησης ή της συνεχούς μεταβολής μιας τιμής (π.χ. αυξάνοντας το όριο στροφών ανά 100 RPM). Οι αλλαγές καταχωρούνται μόνο στην προσωρινή μνήμη RAM. Η ρουτίνα μόνιμης αποθήκευσης ενεργοποιείται αυστηρά υπό δύο συνθήκες:

- **Για τις ρυθμίσεις του μενού (και τους χάρτες):** Μόνο όταν η μηχανή καταστάσεων του μενού ανιχνεύσει πίεση του πλήκτρου "BACK", σηματοδοτώντας την οριστική ολοκλήρωση της παραμετροποίησης από τον χρήστη.
- **Για το Οδόμετρο:** Όταν ο αθροιστής της RAM ξεπεράσει την τιμή των 1000 μέτρων οπότε και μεταφέρεται 1 ακέραιο χιλιόμετρο στη flash μνήμη, μηδενίζοντας παράλληλα το ακέραιο μέρος του τοπικού αθροιστή.

Αυτό διασφαλίζει ότι το σύστημα ανακτά αυτόματα όλες τις εξατομικευμένες ρυθμίσεις στην επόμενη εκκίνηση, προστατεύοντας ταυτόχρονα το υλικό από πρόωρη φθορά.

6.10 Επίλογος

Συμπερασματικά, το λογισμικό του παρόντος συστήματος συνιστά έναν πολύπλοκο μηχανισμό που γεφυρώνει με επιτυχία το υλικό επίπεδο με τον τελικό χρήστη. Όπως αναλύθηκε στα επιμέρους υποκεφάλαια, η δημιουργία ενός λειτουργικού περιβάλλοντος απαίτησε την εφαρμογή έξυπνων τεχνικών ανανέωσης των γραφικών για την αποφυγή υπερφόρτωσης των μικροελεγκτών. Παράλληλα, η μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη επιτεύχθηκε μέσω της ενσωμάτωσης μαθηματικών αλγορίθμων, όπως ο ελεγκτής PID για την ακριβή ρύθμιση της πίεσης υπερπλήρωσης και η κινηματική ανάλυση για την ανεύρεση της ταχύτητας του κιβωτίου. Μέσω της αυστηρής διαχείρισης των καταχωρήσεων στην NVS μνήμη και της ασφαλούς αλληλεπίδρασης με τα πλήκτρα, το σύστημα αποδεικνύει την αξιοπιστία του. Τελικά, οι αλγόριθμοι αυτοί δεν απεικονίζουν απλώς δεδομένα, αλλά μετασχηματίζουν τα ηλεκτρικά σήματα σε αξιοποιήσιμη γνώση, προσφέροντας στον οδηγό απόλυτο και δυναμικό έλεγχο της συμπεριφοράς του οχήματος.

Κεφάλαιο 7ο: Δοκιμές, αποτελέσματα και αξιολόγηση

7.1 Εισαγωγή

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης του υλικού (hardware) και της ανάπτυξης του λογισμικού (software), σειρά έχει η δοκιμή και επαλήθευση ορθής λειτουργίας. Η διαδικασία των δοκιμών δεν περιορίστηκε σε εργαστηριακό περιβάλλον αλλά αντιθέτως, το σύστημα εγκαταστάθηκε πλήρως σε ένα πραγματικό αγωνιστικό αυτοκίνητο, όπου δοκιμάστηκαν σε πραγματικές συνθήκες πίστας σχεδόν όλες οι επιμέρους λειτουργίες του. Μοναδική εξαίρεση αποτέλεσε το υποσύστημα ελέγχου υπερπλήρωσης (Boost Control), το οποίο δεν στάθηκε δυνατό να δοκιμαστεί σε καμία από τις δύο συνθήκες, ούτε στο όχημα ούτε στο εργαστήριο. Για την αξιολόγηση χωρίστηκε το σύστημα σε επιμέρους ενότητες, ξεκινώντας από τη σταθερότητα του υλικού, προχωρώντας στα επίπεδα επικοινωνίας και καταλήγοντας στην αξιολόγηση της εμπειρίας του τελικού χρήστη.

7.2 Δοκιμές τροφοδοσίας και PCB

Οι δοκιμές στο όχημα αλλά και στο εργαστήριο, επικεντρώθηκαν στην ικανότητα της πλακέτας να παρέχει απολύτως σταθερή τάση και προστασία στην είσοδο. Συγκεκριμένα:

- **Προστασία Ανάστροφης Πολικότητας (Smart Diode):** Δοκιμάστηκε η εσκεμμένη αναστροφή σύνδεση της τάσης εισόδου. Ο ελεγκτής LM74610-Q1 ανίχνευσε την αρνητική τάση και έκλεισε ακαριαία το N-Channel MOSFET (CSD19538Q2), αποτρέποντας την καταστροφή των εξαρτημάτων, ενώ επιβεβαιώθηκε η πρακτικά μηδενική παραγωγή θερμότητας από το κύκλωμα προστασίας κατά την κανονική λειτουργία στο όχημα.
- **Συμπεριφορά σε Cold-Cranking (κρύα εκκίνηση):** Προσομοιώθηκε η βύθιση της τάσης της μπαταρίας στα 5.5V κατά την κρύα εκκίνηση του κινητήρα. Ο ελεγκτής LM5175 (4-Switch Buck-Boost) μετέβη άψογα σε λειτουργία ανύψωσης (boost), διατηρώντας τη γραμμή των 12V απολύτως σταθερή στα 12,04V συγκεκριμένα, η οποία είναι και η πραγματική τάση εξόδου σε κανονική λειτουργία. Έτσι αποτράπηκε οποιαδήποτε ανεπιθύμητη επανεκκίνηση των μικροελεγκτών και η οθόνη παρέμεινε ενεργή την ώρα της εκκίνησης.

7.3 Δοκιμές γραφικής διεπαφής

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών της γραφικής διεπαφής στον κεντρικό μικροελεγκτή ESP32-S3, εντοπίστηκε ένα σημαντικό ζήτημα διαχείρισης επεξεργαστικών πόρων. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι σε συνθήκες χαμηλών στροφών του κινητήρα, ο φόρτος του επεξεργαστή (CPU load) κυμαινόταν σε χαμηλά και απολύτως ασφαλή επίπεδα (20% - 25%). Αντιθέτως, κατά την επιτάχυνση και την άνοδο των στροφών του κινητήρα, ο φόρτος παρουσίαζε ραγδαία αύξηση αγγίζοντας το 100%.

Έπειτα από ανάλυση της συμπεριφοράς του λογισμικού, διαπιστώθηκε πως η αιτία του προβλήματος εντοπιζόταν στη δυναμική γραφική μπάρα των στροφών. Το λογισμικό έδινε εντολή επανασχεδίασης (rendering) της μπάρας για κάθε νέα τιμή στροφών που λαμβανόταν, έστω και οριακά διαφορετική. Αυτή η άσκοπα υψηλή συχνότητα οπτικής ανανέωσης προκαλούσε υπερφόρτωση στη διεργασία των γραφικών. Το ζήτημα επιλύθηκε οριστικά με την εφαρμογή του αλγορίθμου ελέγχου καταστάσεων (η προαναφερθείσα τεχνική της λανθάνουσας μνήμης ελέγχου / Dirty-Check). Μέσω αυτής της λογικής, το rendering ενεργοποιείται πλέον υπό αυστηρούς όρους, δίνοντας εντολή σχεδίασης αποκλειστικά και μόνο όταν εντοπίζεται ουσιώδης οπτικά αντιληπτή μεταβολή στη μαθηματική τιμή του εκάστοτε στοιχείου. Ύστερα από αυτή τη βελτιστοποίηση του κώδικα, ο μέγιστος φόρτος του επεξεργαστή ακόμη

και στο ανώτατο όριο στροφών του κινητήρα περιορίστηκε στο 60%, εξαλείφοντας πλήρως τα φαινόμενα οπτικής καθυστέρησης και την υπερφόρτωση του μικροελεγκτή.

Πέραν του συγκεκριμένου ζητήματος, η συνολική αλληλεπίδραση με τη διεπαφή κρίθηκε εξαιρετικά σταθερή. Δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα κατά την πλοήγηση μεταξύ των οθονών απεικόνισης ή κατά την περιήγηση στο μενού των ρυθμίσεων, η οποία διεξαγόταν άμεσα και απρόσκοπτα. Ομοίως, η διαδικασία αποθήκευσης των νέων τιμών στη μόνιμη μνήμη (NVS) εκτελέστηκε με απόλυτη αξιοπιστία. Ωστόσο, σε επίπεδο εργονομίας, καταγράφηκε μια πρακτική δυσκολία όσον αφορά την παραμετροποίηση του ελεγκτή υπερπλήρωσης. Λόγω του μεγάλου μεγέθους και του πλήθους των κελιών που απαρτίζουν τους πίνακες του Boost Control (όπως ο χάρτης ανοιχτού βρόχου), η διαδικασία της χειροκίνητης περιήγησης και της τροποποίησης του κάθε κελιού ξεχωριστά μέσω των φυσικών πλήκτρων της συσκευής αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρονοβόρα.

7.4 Δοκιμές επικοινωνίας K-line

Η επικοινωνία με τον εργοστασιακό εγκέφαλο (ECU) του αγωνιστικού οχήματος μέσω του πρωτοκόλλου BMW DS2 αξιολογήθηκε σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Αν και το φυσικό επίπεδο συγχρονισμού λειτούργησε ομαλά, κατά την αρχική φάση των δοκιμών προέκυψαν σημαντικά προβλήματα στην αποκωδικοποίηση και κλιμάκωση των λαμβανόμενων δεδομένων τα οποία έχρηζαν άμεσης επίλυσης:

- **Σφάλμα κλιμάκωσης στροφών κινητήρα (RPM):** Αρχικά, ο μαθηματικός υπολογισμός των στροφών ήταν εσφαλμένος. Χαρακτηριστικά, όταν ο κινητήρας βρισκόταν σε κατάσταση ρελαντί λειτουργώντας στις περίπου 720 στροφές/λεπτό, το σύστημα διάβαζε από την K-line και εμφάνιζε λανθασμένα την τιμή 110. Το ζήτημα λύθηκε με τον εντοπισμό και την εφαρμογή της σωστής μαθηματικής κλιμάκωσης (scaling) επί των ακατέργαστων (raw) bytes του πακέτου.
- **Λανθασμένη ένδειξη θερμοκρασίας ψυκτικού (Coolant Temp):** Η ένδειξη της θερμοκρασίας του ψυκτικού υγρού εμφανιζόταν μόνιμα στην οθόνη στους -48°C. Έπειτα από έλεγχο της δομής του κώδικα, διαπιστώθηκε πως το λογισμικό εξήγαγε λανθασμένο byte (λάθος offset) από το συνολικό πακέτο απάντησης της ECU. Με τη διόρθωση της θέσης του byte, η ανάγνωση της θερμοκρασίας αποκαταστάθηκε.
- **Μετατροπή θέσης πεταλούδας γκαζιού (TPS):** Διαπιστώθηκε πως η τιμή του αισθητήρα TPS μεταδιδόταν από την ECU σε μοίρες γωνίας ανοίγματος και όχι στο αναμενόμενο ποσοστό επί τοις εκατό (%). Όπως αναλύθηκε από τις δοκιμές, η μηχανική πεταλούδα στο τέρμα πατημένο γκάζι άνοιγε περίπου στις 70.6. Προκειμένου η ένδειξη να είναι σωστή στην οθόνη, βρέθηκαν οι μέγιστες μοίρες και ο κώδικας τροποποιήθηκε ώστε να διαιρεί την τιμή με το 70.6, κλιμακώνοντας έτσι το αποτέλεσμα ορθά σε ποσοστό 0-100%.
- **Εσφαλμένη αντιστοίχιση θερμοκρασίας λαδιού (Oil Temp):** Στα πρώτα λεπτά λειτουργίας, η ένδειξη της θερμοκρασίας λαδιού φαινόταν αληθοφανής. Ωστόσο, ύστερα από ώρα λειτουργίας του κινητήρα όπου η θερμοκρασία θα έπρεπε να είχε αυξηθεί σημαντικά, η τιμή παρέμενε καθηλωμένη γύρω στους 50°C, κάτι το οποίο δεν είναι φυσιολογικό. Ύστερα από έλεγχο, διαπιστώθηκε πως αντί για το byte της θερμοκρασίας λαδιού, διαβαζόταν λανθασμένα η τιμή θερμοκρασίας εισερχόμενου αέρα (Intake Air Temp - IAT). Επαναπροσδιορίζοντας τον σωστό δείκτη μνήμης στο πακέτο, το πρόβλημα επιλύθηκε.

7.5 Δοκιμές UART STM32–ESP32

Ο διάυλος επικοινωνίας μεταξύ ESP32 και STM32 δοκιμάστηκε για την αντοχή του σε υψηλό φόρτο δεδομένων εν κινήσει, με ρυθμό μετάδοσης 115200 baud. Για την αυστηρή επαλήθευση της σταθερότητας του διαύλου, αξιοποιήθηκε η θύρα USB του κεντρικού ελεγκτή ESP32-S3 μέσω της οποίας εξάγονταν διαγνωστικά μηνύματα (debug prints) κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Συγκεκριμένα, το λογισμικό είχε ρυθμιστεί ώστε με τη λήψη κάθε νέου πακέτου να υπολογίζει και να εκτυπώνει στη σειριακή κονσόλα υπολογιστή την ακριβή χρονική διαφορά από το ακριβώς προηγούμενο μήνυμα. Μέσω αυτής της πρακτικής μεθόδου επιβεβαιώθηκε πειραματικά ότι το πακέτο κειμένου μορφής CSV λαμβανόταν και αποκωδικοποιούνταν επιτυχώς σε πραγματικό χρόνο, απολύτως σταθερά 10 φορές το δευτερόλεπτο (10 Hz), ενημερώνοντας ακαριαία τον κεντρικό επεξεργαστή. Δεν παρατηρήθηκαν υπερχειλίσεις μνήμης (buffer overflows) ή αποσυγχρονισμός στη ροή των δεδομένων.

7.6 Δοκιμές Wideband Controller

Για τη δοκιμή του Wideband Controller αρχικά πραγματοποιήθηκε η φυσική εγκατάσταση του αισθητήρα οξυγόνου ευρέος φάσματος (Bosch LSU 4.9) στην εξάτμιση του αγωνιστικού οχήματος και ολοκληρώθηκε η καλωδίωσή του με η συσκευή.



Εικόνα 7-1. Εγκατάσταση αισθητήρα οξυγόνου στο αγωνιστικό όχημα

Κατά την αρχική φάση των δοκιμών, ωστόσο, παρουσιάστηκε ένα κρίσιμο πρόβλημα. Παρόλο που γινόταν λήψη πακέτων μέσω του διαύλου CAN, ολόκληρο το σύστημα κατέρρεε και δεν γινόταν απεικόνιση της τιμής της αναλογίας αέρα-καυσίμου (AFR). Για την αποσφαλμάτωση του προβλήματος συνδέθηκε παράλληλα στη γραμμή του CAN ένα διαγνωστικό εργαλείο μετατροπής CAN-to-USB, το οποίο επέτρεπε την παρακολούθηση της κίνησης του δικτύου σε πραγματικό χρόνο στον υπολογιστή. Εκεί παρατηρήθηκε ένα παράδοξο φαινόμενο. Όσο το εργαλείο CAN-to-USB βρισκόταν συνδεδεμένο στον διάυλο, η συσκευή λειτουργούσε άψογα και η τιμή AFR προβαλλόταν κανονικά στην οθόνη. Μόλις το διαγνωστικό αποσυνδεόταν, το σύστημα κολλούσε εκ νέου.

Για να εντοπιστεί η ρίζα του προβλήματος, τροποποιήθηκε σταδιακά ο κώδικας του ESP32 ώστε να εξάγει μηνύματα αποσφαλμάτωσης (debug prints) μέσω της θύρας USB, εκτυπώνοντας τα πακέτα CAN που λάμβανε ακριβώς τη στιγμή που η συσκευή σταματούσε να λειτουργεί. Από την ανάλυση αυτών των μηνυμάτων διαπιστώθηκε πως το ίδιο ακριβώς πακέτο λαμβανόταν και επαναλαμβανόταν με εξαιρετικά γρήγορο ρυθμό, προκαλώντας υπερχειλίση στο δίκτυο και εξαντλώντας πλήρως τους επεξεργαστικούς πόρους του συστήματος.

Η ανάλυση του πρωτοκόλλου CAN οδήγησε στο εξής συστηματικό συμπέρασμα: Αρχικά, ο ελεγκτής TWAI του ESP32-S3 είχε ρυθμιστεί εσκεμμένα σε κατάσταση Listen-Only Mode. Λόγω αυτής της ρύθμισης, το ESP32 λάμβανε τα πακέτα αλλά δεν εξέπεμπε το απαραίτητο σήμα επιβεβαίωσης λήψης (Acknowledge - ACK) πίσω στον εξωτερικό ελεγκτή wideband. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πρωτοκόλλου CAN, όταν ένας πομπός δεν λαμβάνει ACK από κάποιον δέκτη, θεωρεί ότι η μετάδοση απέτυχε λόγω σφάλματος και αναμεταδίδει το μήνυμα ακαριαία και συνεχόμενα. Δεδομένου ότι δεν υπήρχε καμία άλλη ενεργή συσκευή στο δίκτυο CAN ικανή να απαντήσει με ACK, το κανάλι πλημμύριζε από άσκοπες αναμεταδόσεις. Το σύστημα λειτουργούσε κανονικά όταν ήταν συνδεδεμένο το εργαλείο USB-to-CAN, διότι το συγκεκριμένο εργαλείο λειτουργούσε ως ενεργός κόμβος και παρείχε τα ζητούμενα ACK στον ελεγκτή rusEFI.

Το πρόβλημα επιλύθηκε οριστικά αλλάζοντας τη διαμόρφωση του TWAI από Listen-Only σε Normal Mode. Αυτό επέτρεψε στον ESP32 τη σωστή εκπομπή των πακέτων επιβεβαίωσης (ACK), σταθεροποιώντας τον δίαυλο και μετρώντας πλέον με απόλυτη ακρίβεια την αναλογία αέρα-καυσίμου του κινητήρα. Τέλος, επικυρώθηκε επιτυχώς και ο μηχανισμός ασφαλείας λογισμικού: όταν προσομοιώθηκε εσκεμμένη αποσύνδεση του καλωδίου του CAN, ο αλγόριθμος αναμονής (timeout) των 5 δευτερολέπτων λειτούργησε άψογα, μεταβαίνοντας σε ασφαλή κατάσταση και εμφανίζοντας την ένδειξη σφάλματος του αισθητήρα στην οθόνη.

7.7 Δοκιμές GPS και αισθητήρων

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών στο όχημα, ο δευτερεύων μικροελεγκτής (STM32) απέδειξε την απόλυτη αξιοπιστία του ως μονάδα συλλογής δεδομένων. Το λογισμικό διαμόρφωσε επιτυχώς τον δέκτη GPS ώστε να παρέχει ανανεώσεις με συχνότητα 10 Hz. Κατά την επιτάχυνση του οχήματος, η στιγμιαία ταχύτητα υπολογιζόταν με εξαιρετική ακρίβεια, γεγονός που επέτρεψε στον αλγόριθμο να ανιχνεύσει αξιόπιστα και σε πραγματικό χρόνο την επιλεγμένη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων. Επιπρόσθετα, ο μηχανισμός αποθορυβοποίησης (Debounce) των πλήκτρων πλοήγησης λειτούργησε άψογα, εξαλείφοντας πλήρως τα ψευδή πατήματα (bouncing) σε κάθε πάτημα πλήκτρων.

Ωστόσο εντοπίστηκε ένα λειτουργικό ζήτημα που σχετίζεται με την ψυχρή εκκίνηση (cold start) του συστήματος GPS. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι σε ορισμένες περιοχές ο δέκτης απαιτούσε σημαντικό χρόνο προκειμένου να δεσμεύσει επαρκή αριθμό δορυφόρων και να παράγει έγκυρο στίγμα (GPS fix). Ως άμεση συνέπεια αυτής της καθυστέρησης, κατά τα πρώτα στάδια της διαδρομής το σύστημα αδυνατούσε να καταγράψει τη διανυθείσα χιλιομετρική απόσταση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα ο ψηφιακός οδομετρητής (odometer) της οθόνης να παρουσιάζει αναπόφευκτη απόκλιση, χάνοντας τη χιλιομετρική απόσταση που είχε διανύσει το όχημα μέχρι την επιτυχή λειτουργία του δέκτη.

7.8 Δοκιμές Boost Control

Όπως προαναφέρθηκε, το ψηφιακό σύστημα ενσωματώθηκε και δοκιμάστηκε με απόλυτη επιτυχία σε πραγματικό αγωνιστικό αυτοκίνητο. Ωστόσο, το συγκεκριμένο όχημα δοκιμών διέθετε ατμοσφαιρικό κινητήρα (δεν ήταν εξοπλισμένο με σύστημα υπερσυμπιεστή - turbo).

Επιπλέον, πέραν της απουσίας κατάλληλου οχήματος, δεν κατέστη δυνατή ούτε η εργαστηριακή δοκιμή (bench testing) του ελεγκτή υπερπλήρωσης. Η έλλειψη του απαραίτητου φυσικού και πνευματικού εξοπλισμού εξομοίωσης όπως μια πραγματική βαλβίδα εκτόνωσης καυσαερίων (wastegate) και μια πηγή παραγωγής ελεγχόμενης πίεσης, εμπόδισε την πρακτική αξιολόγηση της παραγωγής του σήματος PWM και της φυσικής οδήγησης βαλβίδας πίεσης.

Κατά συνέπεια, η λειτουργικότητα του αλγορίθμου Διγραμμικής Παρεμβολής, η δυναμική συμπεριφορά του ελεγκτή PID στο πεδίο του χρόνου και ο βρόχος ασφαλείας (Overboost Failsafe) παρέμειναν στο επίπεδο του θεωρητικού σχεδιασμού (hardware) και της συγγραφής του λογισμικού (software), χωρίς να είναι δυνατή η πειραματική τους επικύρωση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

7.9 Αξιολόγηση ως προς τις αρχικές απαιτήσεις

Τα αποτελέσματα των δοκιμών, οι οποίες διεξήχθησαν σε πραγματικές συνθήκες εντός του αγωνιστικού οχήματος, επιβεβαίωσαν την ορθότητα της επιλεγμένης κατανομής αρχιτεκτονικής (Dual-MCU). Όπως φάνηκε στην πράξη, το σύστημα ανταποκρίθηκε πλήρως στις αυστηρές απαιτήσεις του μηχανοκίνητου αθλητισμού. Ο κεντρικός μικροελεγκτής ESP32-S3, αξιοποιώντας το περιβάλλον FreeRTOS, διαχειρίστηκε επιτυχώς το απαιτητικό υπολογιστικό φορτίο της γραφικής διεπαφής (LVGL) και τον πολύπλοκο συντονισμό των πρωτοκόλλων επικοινωνίας (CAN, K-line). Παράλληλα, ο συνεπεξεργαστής STM32F401RE λειτούργησε ως ένα σταθερό, ντετερμινιστικό επίπεδο υλικού (hardware front-end), διασφαλίζοντας την αδιάλειπτη και ακριβή συλλογή των δεδομένων από τους αισθητήρες και το GPS. Οι αρχικές προδιαγραφές που είχαν τεθεί για ελάχιστο χρόνο εκκίνησης, υψηλή εργονομία, καθώς και απόλυτη ηλεκτρομαγνητική ανθεκτικότητα (EMI) κάτω από τον έντονο ηλεκτρικό θόρυβο του αγωνιστικού κινητήρα, ικανοποιήθηκαν με απόλυτη επιτυχία.



Εικόνα 7-2. Λειτουργία συσκευής εγκατεστημένη σε αγωνιστικό όχημα

7.10 Περιορισμοί

Παρά την επιτυχή ολοκλήρωση και την αποδεδειγμένη λειτουργικότητα της διάταξης, κατά τη φάση των δοκιμών και την ανάλυση των αποτελεσμάτων αποτυπώθηκαν ορισμένοι τεχνικοί περιορισμοί και ιδιαιτερότητες του συστήματος:

- **Χρόνος Ψυχρής Εκκίνησης GPS (Cold-Start):** Κατά την αρχική ενεργοποίηση της συσκευής, ο δέκτης GNSS απαιτεί ένα μεταβαλλόμενο χρονικό διάστημα (από μερικά δευτερόλεπτα έως και λεπτά, ανάλογα με τη γεωγραφική κάλυψη και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες) για τη δέσμευση επαρκούς αριθμού δορυφόρων και την επίτευξη έγκυρου στίγματος (GPS fix). Στο συγκεκριμένο μεσοδιάστημα, οι λειτουργίες που παρουσιάζουν άμεση εξάρτηση από το σήμα GPS, όπως η προβολή της ταχύτητας και ο αλγόριθμος ανίχνευσης της σχέσης του κιβωτίου ταχυτήτων, παραμένουν προσωρινά εκτός λειτουργίας. Παράλληλα, ο ψηφιακός οδομετρητής παρουσιάζει αναπόφευκτη απόκλιση από την πραγματική τιμή, καθώς η διανυθείσα απόσταση κατά τα πρώτα στάδια της διαδρομής μέχρι ο δέκτης να επιτύχει λήψη έγκυρου στίγματος δεν καταγράφεται από το σύστημα.
- **Boost Control:** Δεδομένου ότι το αγωνιστικό όχημα που χρησιμοποιήθηκε ως πλατφόρμα δοκιμών πεδίου διέθετε ατμοσφαιρικό κινητήρα, δεν κατέστη δυνατή η πρακτική αξιολόγηση του υποσυστήματος Boost Control σε πραγματικές συνθήκες. Παρόλο που η αρχιτεκτονική του λογισμικού (αλγόριθμος Διγραμμικής Παρεμβολής και δομή PID) έχει αναπτυχθεί, δεν επαληθεύτηκε η ορθή λειτουργία της.
- **Χειροκίνητη Παραμετροποίηση Πινάκων μέσω Διεπαφής Χρήστη:** Λόγω του μεγάλου μεγέθους και του πλήθους των κελιών που απαρτίζουν τους τρισδιάστατους χάρτες του Boost Control (πίνακες ανοιχτού και κλειστού βρόχου διάστασης 21x15 κελιών), η διαδικασία της χειροκίνητης περιήγησης και της τροποποίησης του κάθε κελιού ξεχωριστά αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρονοβόρα. Η αποκλειστική χρήση των τεσσάρων φυσικών πλήκτρων πλοήγησης της συσκευής (ENTER, UP, DOWN, BACK) περιορίζει την ευελιξία του χρήστη να κάνει γρήγορες αλλαγές.
- **Περιορισμός Κύκλων Ζωής Μνήμης Flash:** Η εσωτερική μη πτητική μνήμη (Non-Volatile Storage) του μικροελεγκτή ESP32-S3 διαθέτει περιορισμένο κύκλο ζωής διαγραφών και εγγραφών. Ο περιορισμός αυτός επέβαλε την ανάπτυξη ειδικών αλγορίθμων προστασίας, όπως η αποκλειστική εγγραφή των δεδομένων του οδομέτρου αυστηρά ανά 1 διανυθέν χιλιόμετρο και η αποκλειστική καταχώρηση των ρυθμίσεων στη μνήμη RAM κατά τη διάρκεια της πλοήγησης, ώστε να αποφευχθεί η πρόωρη hardware υποβάθμιση του υλικού από συνεχείς εγγραφές.

7.11 Επίλογος

Το παρόν κεφάλαιο συνόψισε την αυστηρή μεθοδολογία ελέγχου στην οποία υποβλήθηκε ο ψηφιακός πίνακας. Σε αντίθεση με πολλές πειραματικές διατάξεις, το σύστημα αποδείχθηκε απόλυτα λειτουργικό περνώντας από τον πάγκο του εργαστηρίου στην καμπίνα ενός πραγματικού αγωνιστικού αυτοκινήτου. Η επιτυχής διαχείριση της τηλεμετρίας, η άψογη συμπεριφορά των αλγορίθμων και η σταθερότητα του hardware υπό ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και θορύβου, καταδεικνύουν ότι η κατασκευή διαθέτει τα χαρακτηριστικά ενός βιομηχανικού προτύπου, ανοίγοντας παράλληλα τον δρόμο για τη μελλοντική πρακτική αξιοποίηση του ενσωματωμένου ελεγκτή.

Κεφάλαιο 8ο: Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις

8.1 Σύνοψη εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός προηγμένου, ενσωματωμένου συστήματος λήψης δεδομένων (data acquisition), απεικόνισης και ελέγχου υποσυστημάτων, ειδικά σχεδιασμένου για εφαρμογές στον μηχανοκίνητο αθλητισμό. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, υιοθετήθηκε μια κατανεμημένη αρχιτεκτονική Master-Slave με τη χρήση δύο ετερογενών μικροελεγκτών, του ESP32-S3 και του STM32F401RE. Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια ειδική τυπωμένη πλακέτα (PCB) που ενσωματώνει προηγμένα κυκλώματα προστασίας και σταθεροποίησης τάσης, ικανά να ανταπεξέλθουν στις ηλεκτρικές συνθήκες ενός οχήματος. Το σύστημα περιλαμβάνει μια έγχρωμη οθόνη TFT LCD (ανάλυσης 800x480), η οποία οδηγείται μέσω του πρωτοκόλλου RGB565 και της βιβλιοθήκης LVGL. Το λογισμικό του κύριου ελεγκτή βασίστηκε στο Λειτουργικό Σύστημα Πραγματικού Χρόνου FreeRTOS, ενώ υλοποιήθηκε η λήψη δεδομένων μέσω πρωτοκόλλων K-line (BMW DS2) και CAN bus (για τον αισθητήρα Wideband). Η τελική συσκευή ολοκληρώθηκε μηχανολογικά σε ένα προσαρμοσμένο περίβλημα από ABS, κατασκευασμένο με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης.

8.2 Κύρια συμπεράσματα

Από τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τις δοκιμές του συστήματος, εξάγονται τα ακόλουθα κύρια συμπεράσματα:

- **Επιτυχία της αρχιτεκτονικής Dual-MCU:** Ο διαχωρισμός των εργασιών απέδωσε τα μέγιστα. Ο κεντρικός μικροελεγκτής (ESP32-S3) ανταποκρίθηκε άριστα στον φόρτο της γραφικής διεπαφής και της διαχείρισης πρωτοκόλλων (CAN, K-line), ενώ ο συνεπεξεργαστής (STM32) λειτούργησε ως ακούρατος συλλέκτης δεδομένων (hardware front-end) από τους αναλογικούς αισθητήρες και το GPS, με απόλυτη χρονική συνέπεια.
- **Αξιοπιστία υλικού σε πραγματικές συνθήκες:** Τα κυκλώματα τροφοδοσίας προσέφεραν απόλυτη σταθερότητα. Το κύκλωμα «έξυπνης διόδου» (smart diode) και ο μετατροπέας Buck-Boost ανταπεξήλθαν εξαιρετικά κατά τις δοκιμές ανάστροφης πολικότητας και ψυχρής εκκίνησης (cold-cranking) του κινητήρα, διατηρώντας την τάση απολύτως σταθερή χωρίς να γίνει επανεκκίνηση στους μικροελεγκτές.
- **Βελτιστοποίηση λογισμικού γραφικών:** Η οπτική απεικόνιση απαίτησε έξυπνους αλγορίθμους. Η υλοποίηση του αλγορίθμου λανθάνουσας μνήμης (Dirty-Check) αποδείχθηκε κομβική, μειώνοντας τον φόρτο της CPU από το 100% στο 40% κατά τη λειτουργία της δυναμικής μπάρας στροφών του κινητήρα.
- **Ασφαλής διαχείριση πρωτοκόλλων επικοινωνίας:** Η επιτυχής λειτουργία του διαύλου CAN για τον Wideband Controller απαιτούσε τη μετάβαση από κατάσταση «Listen-Only» σε «Normal Mode», ώστε να εκπέμπονται τα απαραίτητα σήματα επιβεβαίωσης (ACK) και να αποτραπεί η υπερχειλίση του δικτύου. Παράλληλα, η επικοινωνία K-line απαίτησε ακριβή μαθηματική κλιμάκωση (scaling) των bytes για την ορθή απόδοση των τιμών.

8.3 Προτάσεις βελτίωσης

Δεδομένου ότι κάθε τεχνολογικό σύστημα επιδέχεται συνεχούς εξέλιξης, η παρούσα υλοποίηση θα μπορούσε να επεκταθεί με ορισμένες τροποποιήσεις και προσθήκες, με στόχο τη βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης και της συνολικής εμπειρίας του τελικού χρήστη. Ενδεικτικά προτείνονται τα εξής:

- **Πρακτική δοκιμή σε υπερτροφοδοτούμενο κινητήρα:** Η άμεση επόμενη επέκταση αποτελεί η δοκιμή της πλατφόρμας ελέγχου υπερπλήρωσης (Boost Control) και της συμπεριφοράς του ελεγκτή PID σε πραγματικό όχημα με σύστημα turbo (ή αντίστοιχη εργαστηριακή διάταξη), ώστε να επικυρωθεί πειραματικά η παραγωγή του σήματος PWM.
- **Ασύρματη παραμετροποίηση:** Για την επίλυση του προβλήματος της χρονοβόρας πλοήγησης στους χάρτες 21x15, προτείνεται η αξιοποίηση των ασύρματων πρωτοκόλλων (Wi-Fi/Bluetooth) που υπάρχουν ενσωματωμένα στον ESP32-S3. Συγκεκριμένα μια εφαρμογή για κινητά/tablet θα επέτρεπε τη γρήγορη ρύθμιση των χαρτών, παρακάμπτοντας τη χρονοβόρα διαδικασία χρήσης των φυσικών πλήκτρων.
- **Προσθήκη αισθητήρα IMU:** Η ενσωμάτωση ενός IMU (Inertial Measurement Unit), αποτελούμενο από επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο τριών αξόνων (π.χ. μέσω διασύνδεσης I2C ή SPI) θα επιτρέψει στο σύστημα να μετρά σε πραγματικό χρόνο τις δυναμικές καταπονήσεις και τις επιταχύνσεις (δυνάμεις G) που δέχεται το όχημα κατά την κίνησή του. Συγκεκριμένα, το IMU θα παρέχει ακριβή δεδομένα για τη διαμήκη επιτάχυνση (κατά το φρενάρισμα και την επιτάχυνση) καθώς και για την εγκάρσια/πλευρική επιτάχυνση (κατά τη διάρκεια των στροφών). Στο επίπεδο της γραφικής διεπαφής χρήστη, τα δεδομένα αυτά μπορούν να οπτικοποιηθούν δυναμικά στην οθόνη του οδηγού μέσω ενός οργάνου απεικόνισης, όπως ένα διάγραμμα τύπου G-Force Circle (ή bubble diagram). Στο διάγραμμα αυτό, μια κινούμενη κουκκίδα θα αποτυπώνει το μέγεθος και την κατεύθυνση των δυνάμεων G, προσφέροντας στον οδηγό άμεση και εύκολη εποπτεία των ορίων πρόσφυσης του οχήματος και της συμπεριφοράς των ελαστικών.
- **Υλοποίηση επικοινωνίας ECU μέσω διαύλου CAN και διαγνωστικών μηνυμάτων OBD2:** Μια άλλη ουσιαστική κατεύθυνση για τη μελλοντική αναβάθμιση του συστήματος είναι η επέκταση του κώδικα του λογισμικού, ώστε να υποστηρίζει την άντληση δεδομένων από την (ECU) όχι μόνο μέσω της γραμμής K-line, αλλά και απευθείας μέσω του διαύλου CAN bus, αξιοποιώντας το τυποποιημένο διαγνωστικό πρωτόκολλο OBD2. Παρόλο που η τρέχουσα υλοποίηση βασίζεται στο ιδιοπαγές πρωτόκολλο BMW DS2 για τη διασύνδεση με συγκεκριμένους εγκεφάλους, η συντριπτική πλειονότητα των σύγχρονων εργοστασιακών και aftermarket μονάδων ελέγχου χρησιμοποιεί πλέον τον δίαυλο CAN για τη διάγνωση και τη μεταφορά δεδομένων. Με την ανάπτυξη κατάλληλων ρουτινών λογισμικού για την αποστολή και λήψη αιτημάτων OBD2 (PID requests) μέσω του ενσωματωμένου περιφερειακού TWA1 του ESP32-S3, το σύστημα θα εξασφαλίσει συμβατότητα με πληθώρα διαφορετικών οχημάτων και κατασκευαστών. Επιπλέον, η μετάβαση στην ανάγνωση των δεδομένων μέσω CAN bus θα προσφέρει πολύ υψηλότερους ρυθμούς ανανέωσης και εύρος ζώνης σε σχέση με τη σειριακή σύνδεση χαμηλής ταχύτητας της K-line. Το hardware που αναπτύχθηκε στην εργασία είναι κατάλληλο για την επέκταση αυτή.
- **Ενσωμάτωση θύρας κάρτας μνήμης για τοπική καταγραφή δεδομένων (Data Logging):** Η επέκταση αυτή θα επιτρέψει την αδιάλειπτη καταγραφή των δεδομένων του οχήματος. Τα δεδομένα θα αποθηκεύονται αυτόματα με σταθερό ρυθμό δειγματοληψίας σε αρχεία μορφής CSV. Έτσι, ο χρήστης θα μπορεί να εξαγάγει εύκολα τα αρχεία σε υπολογιστή και, μέσω ειδικών

Κεφάλαιο 8

εφαρμογών ανάλυσης δεδομένων, να μελετά με ακρίβεια τη συμπεριφορά του οχήματος και να το βελτιστοποιεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- [1] H. M. Boland, M. I. Burgett, A. J. Etienne, and R. M. Stwalley Iii, “An Overview of CAN-BUS Development, Utilization, and Future Potential in Serial Network Messaging for Off-Road Mobile Equipment,” in *Technology in Agriculture*, F. Ahmad and M. Sultan, Eds., IntechOpen, 2021.
- [2] FreeRTOS.org, *FreeRTOS Reference Manual*, vol. 10.0.010.0.0. 2017.
- [3] Richard Barry, *Mastering the FreeRTOS TM Real Time Kernel: A Hands-On Tutorial Guide*, Pre-Release 161204 Edition. Real Time Engineers Ltd., 2016.
- [4] Sylvestre van Kappel, “Telemetry for the Formula Student,” Bachelor’s Thesis, Haute Ecole d’Ingénierie, HES-SO Valais-Wallis, 2023. [Online]. Available: <https://folia.unifr.ch>
- [5] K. H. Johansson, M. Törngren, and L. Nielsen, “Vehicle Applications of Controller Area Network,” in *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*, D. Hristu-Varsakelis and W. S. Levine, Eds., Boston, MA: Birkhäuser Boston, 2005, pp. 741–765.
- [6] A. Thomasson, “Wastegate Actuator Modeling and Tuning of a PID Controller for Boost Pressure Control,” Linköping University, 2009. [Online]. Available: <http://urn.kb.se>
- [7] N. Πασχάλης, “Λειτουργικό Σύστημα Πραγματικού Χρόνου (FreeRTOS) σε Μικροελεγκτή και Εφαρμογές,” Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2013. [Online]. Available: <https://pergamos.lib.uoa.gr>

Application Note

- [8] Texas Instruments, “TPS61169 Evaluation Module,” Nov. 2014.
- [9] Jason Layton, “Analog Sensor Measurement and Acquisition,” 2020

Data Sheet

- [10] TDK Corporation, “ACT1210D Series Automotive Signal Common Mode Filters,” ACT1210D datasheet.
- [11] Zhuhai Hongjiacheng Technology Co., Ltd, “BAT54S Surface Mount Schottky Barrier Rectifier,” BAT54S datasheet.
- [12] Texas Instruments, “CSD15571Q2 20-V N-Channel NexFET TM Power MOSFETs,” CSD15571Q2 datasheet, Aug. 2013.
- [13] Texas Instruments, “CSD17571Q2 30V N-Channel NexFET TM Power MOSFETs,” CSD17571Q2 datasheet, Jan. 2015.
- [14] Texas Instruments, “CSD19538Q2 100V N-Channel NexFET TM Power MOSFET,” CSD19538Q2 datasheet, Mar. 2024.
- [15] Espressif Systems, “ESP32-S3 Series Datasheet,” ESP32-S3 datasheet v2.2.
- [16] International Rectifier, “IRFZ44N Power MOSFET,” IRFZ44N datasheet, 2001.

- [17] STMicroelectronics, “L9637 Monolithic Bus Driver with ISO 9141 Interface,” L9637 datasheet Rev 8, Sep. 2013.
- [18] Bosch Motorsport, “Lambda Sensor LSU 4.9,” Lambda Sensor LSU 4.9 datasheet.
- [19] Texas Instruments, “LM5175 42-V Wide VIN Synchronous 4-Switch Buck-Boost Controller,” LM5175 42-V datasheet, 2016.
- [20] Texas Instruments, “LM74610-Q1 Zero IQ Reverse Polarity Protection Smart Diode Controller,” LM74610-Q1 datasheet, Jun. 2016.
- [21] NXP Semiconductors, “MPXH6400A, 20 to 400 kPa, Absolute, Integrated Pressure Sensor,” MPXH6400A datasheet, 2017.
- [22] u-blox AG, “NEO-7 u-blox 7 GNSS Modules,” NEO-7 u-blox 7 GNSS Modules datasheet, 2014.
- [23] onsemi, “NSR0240V2 Schottky Barrier Diode,” NSR0240V2 datasheet.
- [24] Tech Public Electronics Co., Ltd., “PESD1CAN-UX-TP CAN Bus ESD Protection Diode,” PESD1CAN-UX-TP datasheet.
- [25] Lite-On Technology Corporation, “Photocoupler LTV-356T Series,” LTV-356T datasheet, Apr. 2018.
- [26] Tailor Pixels Technology Co., Ltd., “Product Specification Model: TTX050BHS-02 5.0” TFT Display Module (800×480),” TTX050BHS-02 5.0” TFT Display Module datasheet.
- [27] MAC Valves, Inc., “Series 35 Direct Solenoid and Solenoid Pilot Operated Valves Catalog,” Series 35 Direct Solenoid and Solenoid Pilot Operated Valves datasheet 35 Catalog.
- [28] Littelfuse, Inc., “SMCJ Series Surface Mount – 1500W TVS Diodes Datasheet,” SMCJ Series Surface Mount datasheet, Feb. 2025.
- [29] Vishay Siliconix, “SQD40N06-14L Automotive N-Channel 60 V (D-S) 175 °C MOSFET,” SQD40N06-14L datasheet, Aug. 2015.
- [30] Vishay General Semiconductor, “SS32, SS33, SS34, SS35, SS36 Surface-Mount Schottky Barrier Rectifier,” SS32, SS33, SS34, SS35, SS36 datasheet, Apr. 2020.
- [31] STMicroelectronics, “STM32F401xD STM32F401xE ARM Cortex-M4 32b MCU+FPU, 105 DMIPS, 512KB Flash/96KB RAM, 11 TIMs, 1 ADC, 11 communication interfaces,” STM32F401RET6 datasheet, Jan. 2015.
- [32] NXP Semiconductors, “TJA1051 High-Speed CAN Transceiver,” TJA1051 datasheet Rev. 9, Nov. 2017.
- [33] Texas Instruments, “UCCx732x Dual 4-A Peak High-Speed Low-Side Power-MOSFET Drivers,” UCCx732x datasheet.
- [34] STMicroelectronics, “USBLC6-2SC6Y Automotive Very Low Capacitance ESD Protection,” USBLC6-2SC6Y datasheet Rev 2, 2012.
- [35] WORLDSEMI CO., LIMITED, “WS2812B-2020 Intelligent Control LED Integrated Light Source,” WS2812B-2020 datasheet, 2020.
- [36] Torex Semiconductor Ltd, “XC6220 Series,” XC6220 Series datasheet.

[37] Texas Instruments, “TPS5430 3-A Wide Input Range Step-Down Converter,” TPS5430 3-A datasheet.

Internet Site

[38] “LVGL Documentation | LVGL Open.” Accessed: Jan. 01, 2026. [Online]. Available: <https://lvgl.io/docs/open/>

[39] “rusEFI Wideband Controller - Wiki.” Accessed: Jan. 01, 2026. [Online]. Available: <https://wiki.rusefi.com/rusefi-Wideband-Controller/>

[40] “DS2 K-line library for Arduino and ESP32” Accessed: Jan. 01, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/handmade0octopus/ds2>

[50] “Boost Control Plumbing – Get it right, save money.” Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.onpointdyno.com/boost-control-plumbing-get-it-right-save-money/>

Paper in Conference Proceedings

[41] W. Huang and G. Sheng, “Analysis and Research on UART Communication Protocol,” in 2024 4th Asia-Pacific Conference on Communications Technology and Computer Science (ACCTCS), Shenyang, China: IEEE, Feb. 2024, pp. 768–771.

[42] G. Kourtis and P. Kitsos, “Integrated CAN-Bus System: Advanced Data Visualization for Vehicle Performance Optimization,” in 2026 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET), Patras, Greece: IEEE, Apr. 2026, pp. 1–4.

[43] Choudhary, Vijay and Jacob, Mathew, “Smart Diode and 4-Switch Buck-Boost Provide Ultra High Efficiency, Compact Solution for 12-V Automotive Battery Rail,” in PCIM Europe 2016, 2016.

Journal Articles

[44] S. Halley, K. P. Ramaiyan, L. Tsui, and F. Garzon, “A review of zirconia oxygen, NO_x, and mixed potential gas sensors – History and current trends,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 370, p. 132363, Nov. 2022.

[45] Muneeswaran, A., “Automotive Diagnostics Communication Protocols Analysis – KWP2000, CAN, and UDS,” *OSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 20–31, 2015.

[46] H. Yang, Y. Wang, and R. Jia, “Dashboard Layout Effects on Drivers’ Searching Performance and Heart Rate: Experimental Investigation and Prediction,” *Front. Public Health*, vol. 10, p. 813859, Feb. 2022.

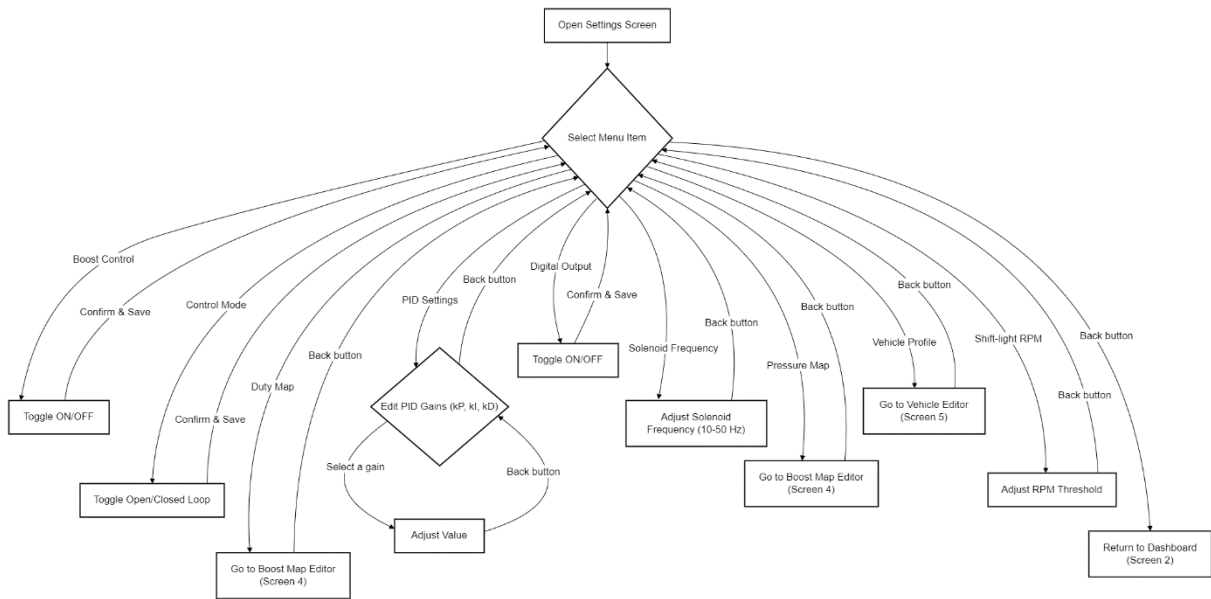
[47] X. Gong, Y. Wang, H. Chen, and Y. Hu, “Double Closed-Loop Controller Design for Boost Pressure Control of Turbocharged Gasoline Engines,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97333–97342, 2019.

[48] Gauri Mahajan, S.K Parchandekar, and Mohammad Tahir, “Implementation and Validation of K Line (ISO 9141) Protocol for Diagnostic Application,” *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 4, no. 7, pp. 708–713, 2017.

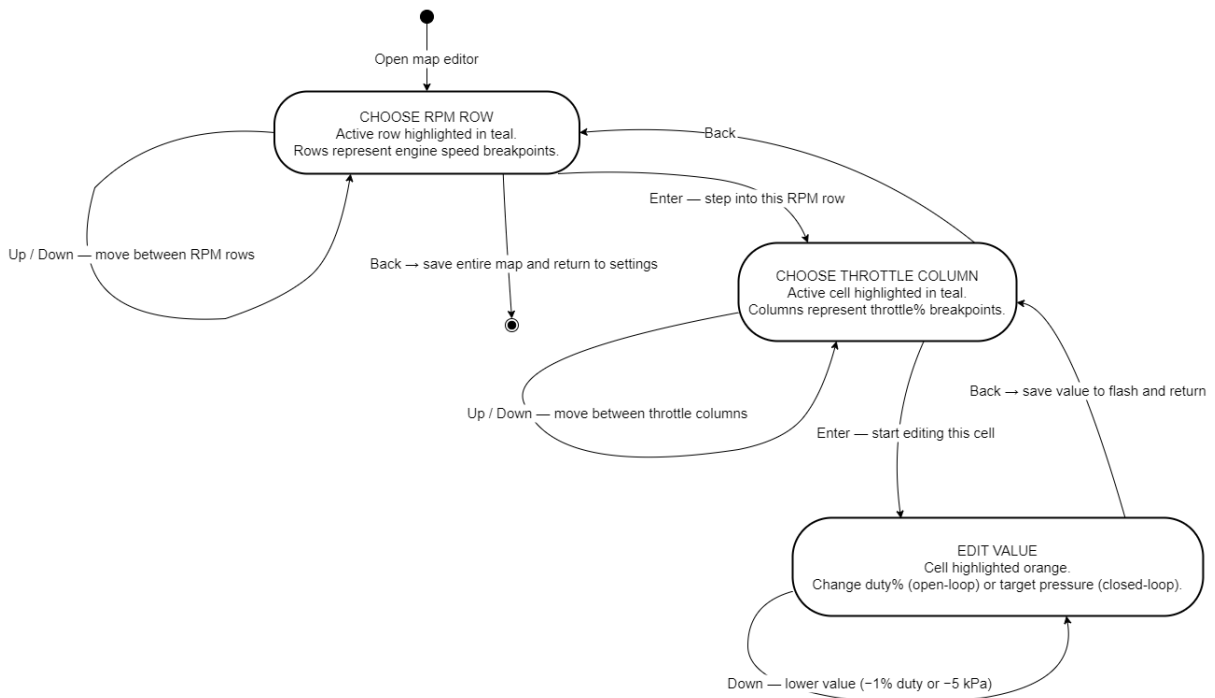
[49] Y. Liu and Z. Shen, “The effects of dashboard design form on driving information reading performance under different time pressures,” *Front Psychol*, vol. 16, p. 1635951, 2025.

[51] Vijay Choudhary, “Designing the front-end DC/DC conversion stage to withstand automotive transient”, 2017.

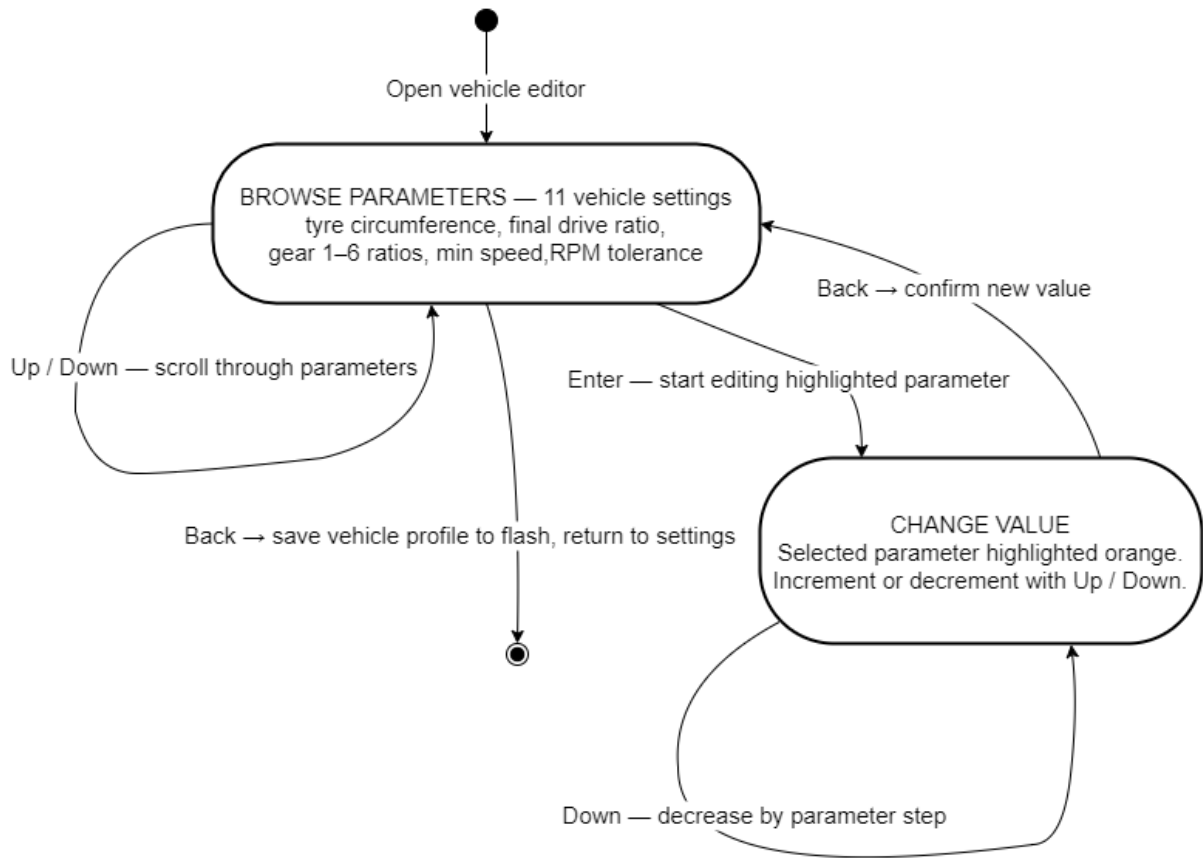
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : Διαγράμματα Ροής ESP32-S3



Σχήμα Α.1. Διάγραμμα πλοήγησης και διάταξης του κεντρικού μενού ρυθμίσεων (Οθόνη 3 - Settings)

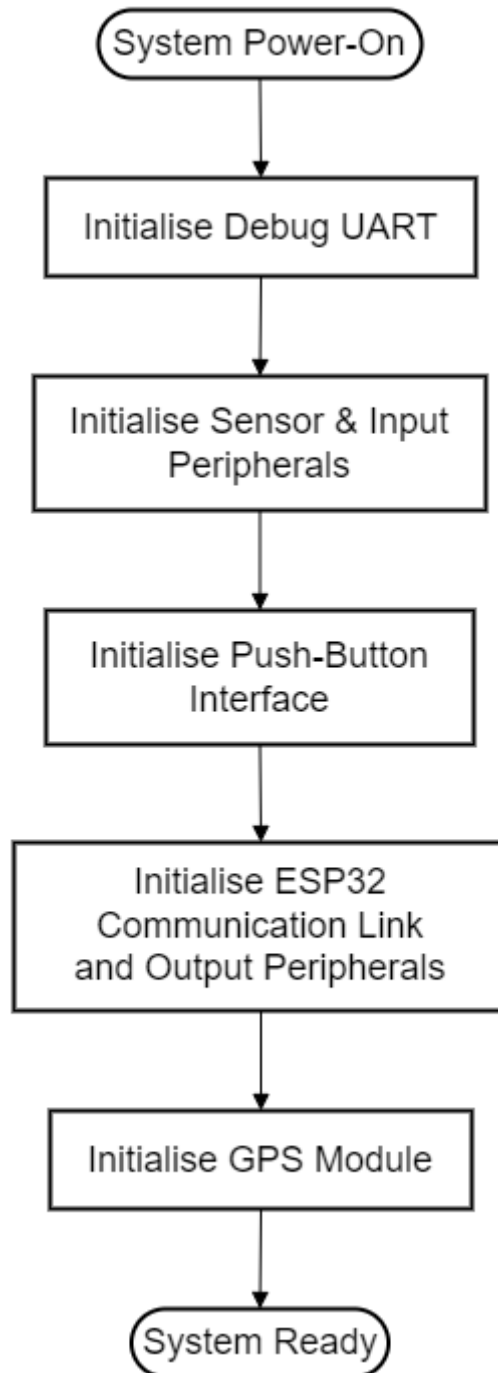


Σχήμα Α.2. Οθόνη παραμετροποίησης και επεξεργασίας πινάκων του συστήματος ελέγχου υπερπλήρωσης (Οθόνη 4 - Boost Map Editor)

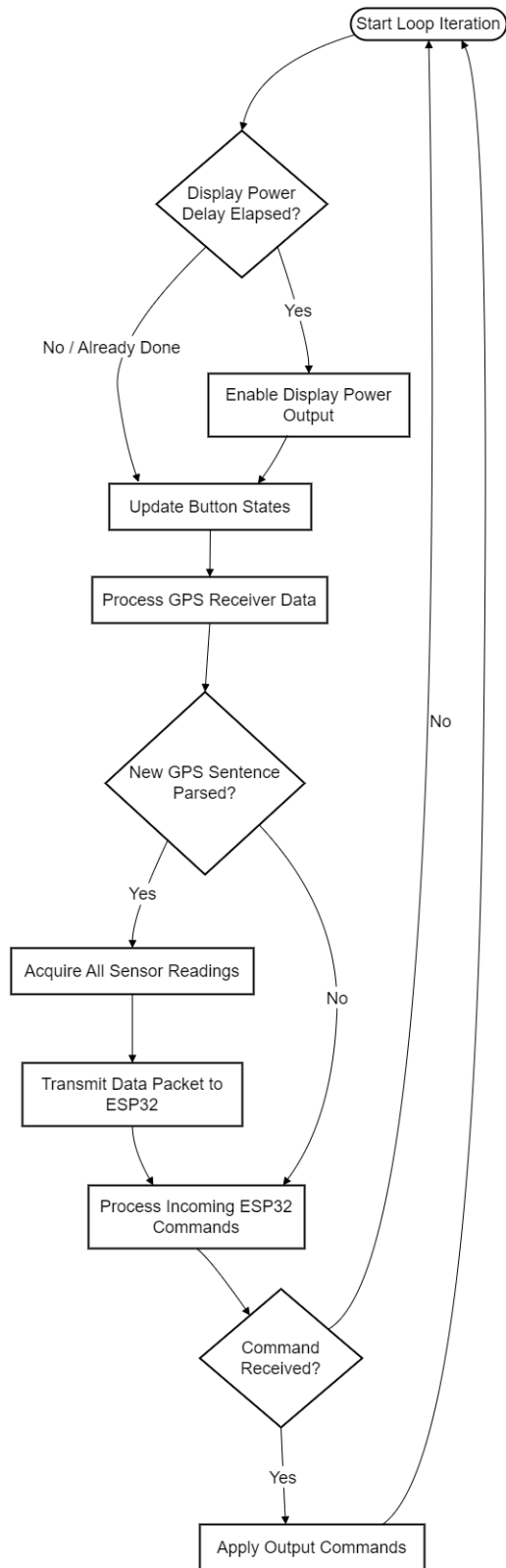


Σχήμα Α.3. Οθόνη διαμόρφωσης παραμέτρων οχήματος και σχέσεων μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων (Οθόνη 5 - Vehicle Config)

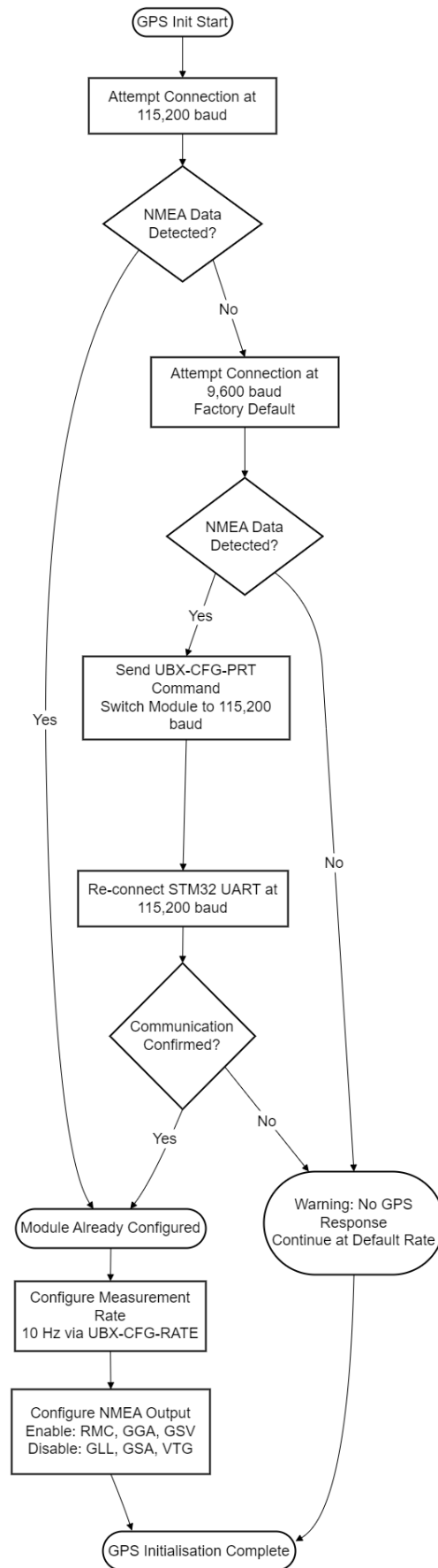
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Διαγράμματα Ροής Λογισμικού STM32F401RE



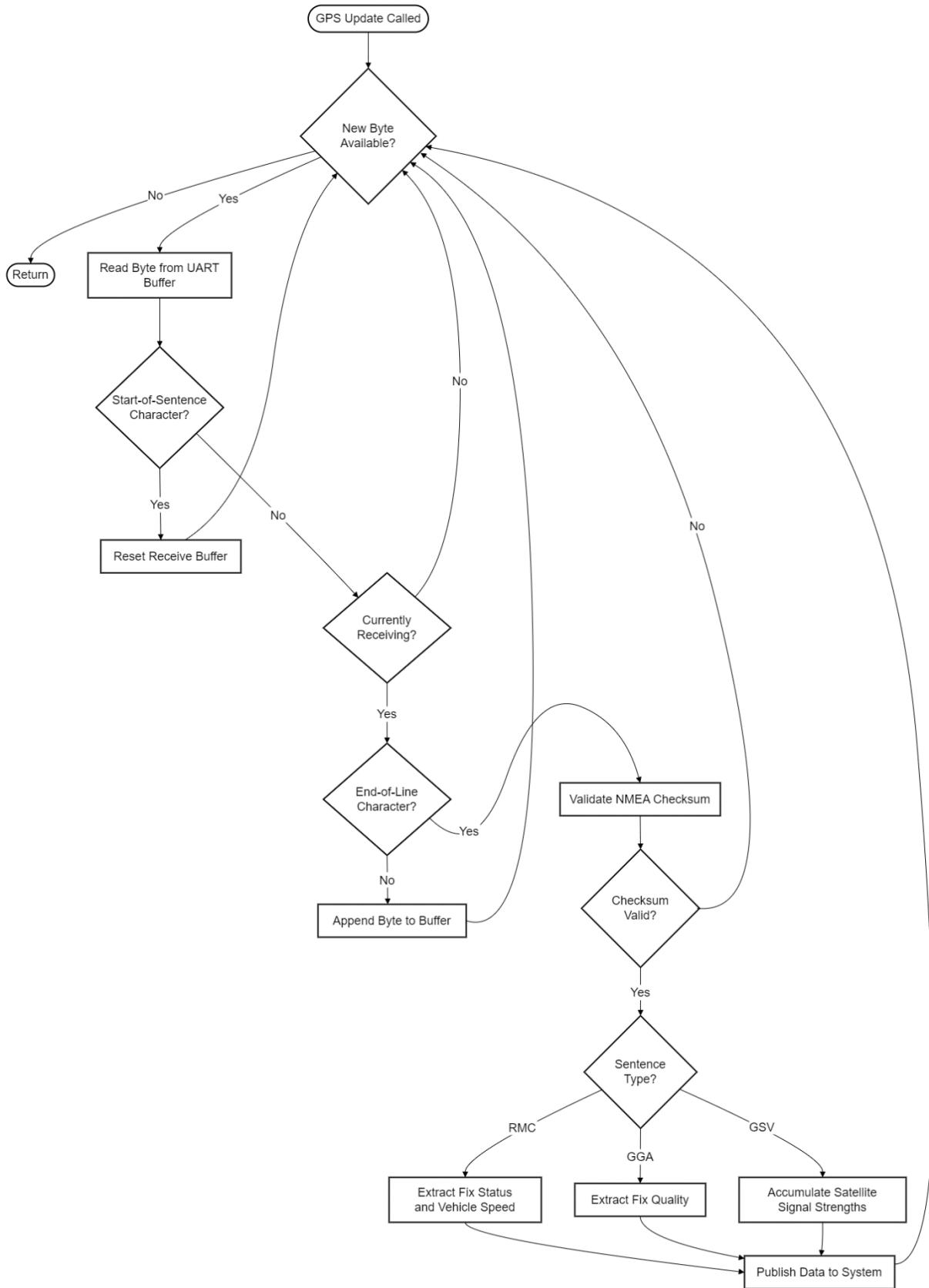
Σχήμα Β.1. Διάγραμμα ροής αρχικοποίησης συστήματος δευτερεύοντος μικροελεγκτή (System Initialisation)



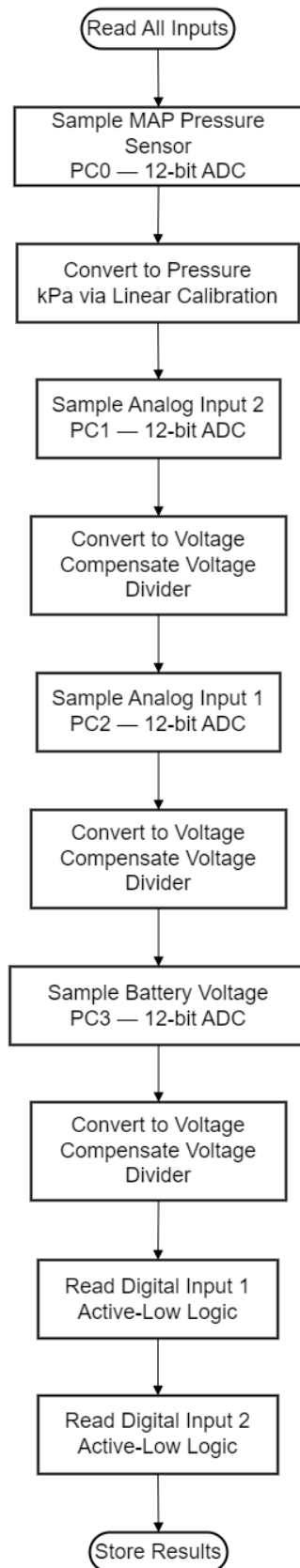
Σχήμα Β.2. Διάγραμμα κύριου βρόχου λειτουργίας (Main Loop Flowchart) του STM32



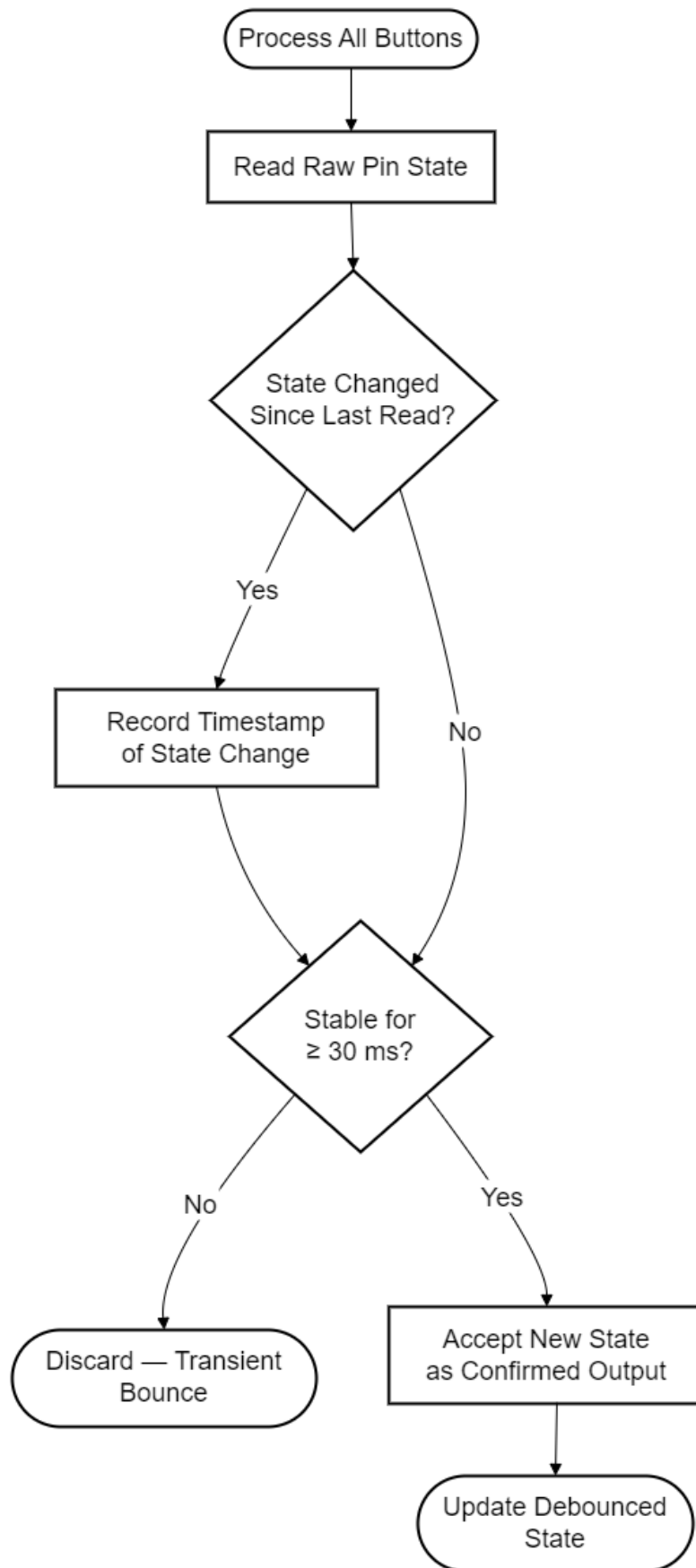
Σχήμα Β.3. Διάγραμμα ροής αρχικοποίησης και διαμόρφωσης δέκτη GPS (GPS Initialisation Flowchart)



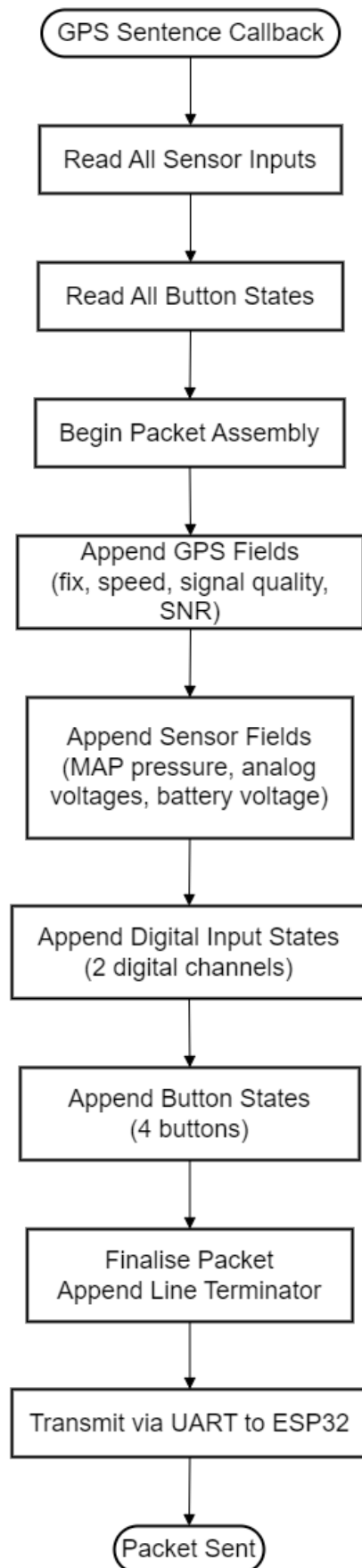
Σχήμα Β.4. Διάγραμμα επεξεργασίας δεδομένων GPS και αποκωδικοποίησης πρωτοκόλλου NMEA



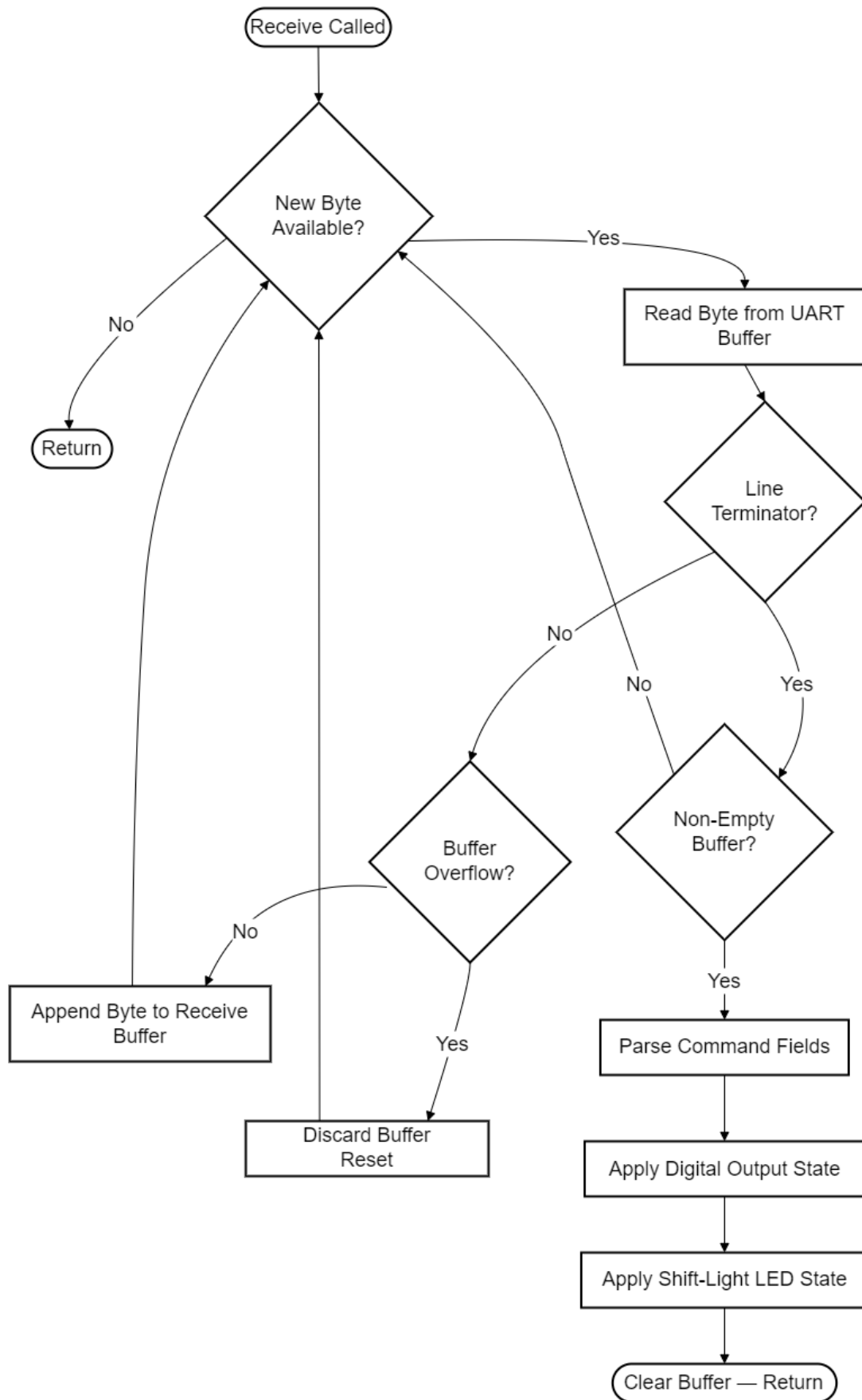
Σχήμα Β.5. Διάγραμμα λήψης και προεπεξεργασίας αναλογικών μετρήσεων αισθητήρων (Sensor Acquisition)



Σχήμα Β.6. Διάγραμμα μηχανής καταστάσεων αποθρομβοποίησης πλήκτρων (Debounce State Machine Flowchart)

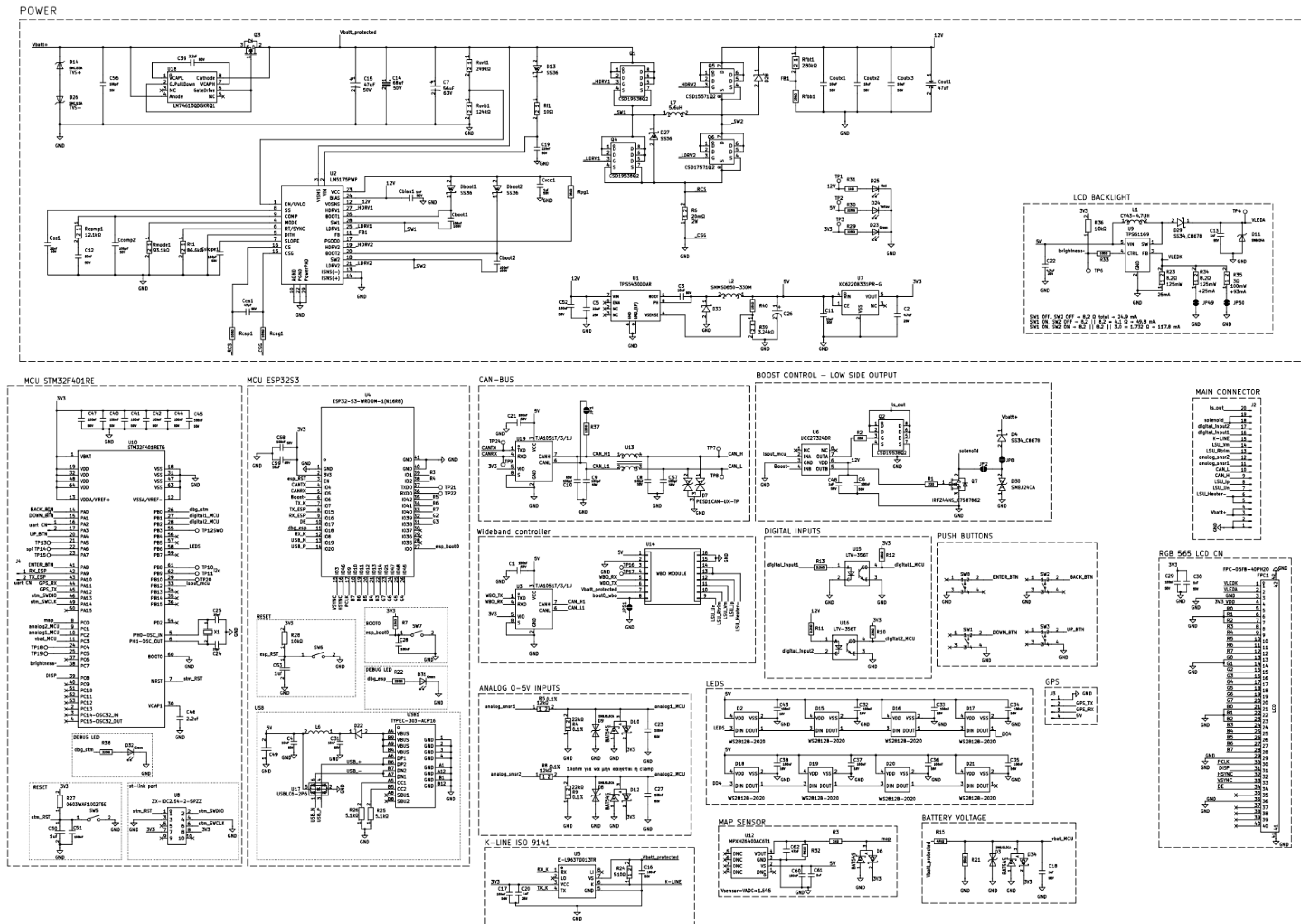


Σχήμα Β.7. Διάγραμμα μετάδοσης πακέτου δεδομένων (Data Packet Transmission) προς τον ESP32-S3



Σχήμα Β.8. Διάγραμμα λήψης και αποκωδικοποίησης εντολών ελέγχου από τον ESP32-S3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ C : Σχηματικό Διάγραμμα Τυπωμένης Πλακέτας (PCB Schematic)



Σχήμα C.1. Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος της πλακέτας