

Μελέτη του πρωτοκόλλου UBSPD με μικροελεγκτή STM32

Φωτόπουλος Στέφανος

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Αριστείδης Ευθυμίου

Ιωάννινα, Σεπτέμβριος 2024



**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧ. Η/Υ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ**

**DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE & ENGINEERING
UNIVERSITY OF IOANNINA**

Ευχαριστίες

Ευχαριστίες προς κάθε ενδιαφερόμενο (προαιρετικό κεφάλαιο).

Ημερομηνία

Συγγραφέας

Περίληψη

Η μελέτη αυτή περιγράφει την ανάπτυξη ενός προγράμματος σε γλώσσα C για έναν μικροελεγκτή STM32, το οποίο επιτρέπει τη ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας σε 5V, 9V και 12V χρησιμοποιώντας ένα joystick. Το πρόγραμμα αξιοποιεί το πρωτόκολλο USB Power Delivery (USBPD) για τη διαπραγμάτευση της απαιτούμενης τάσης με το τροφοδοτικό. Ανάλογα με την επιλεγμένη τάση, ενεργοποιείται ένα αντίστοιχο LED για να υποδεικνύει τη λειτουργία του συστήματος. Για παράδειγμα, το πάτημα του κεντρικού κουμπιού select του joystick επιλέγει 5V, προς τα κάτω 9V, και προς τα αριστερά 12V, ενώ κάθε επιλογή συνοδεύεται από την ενεργοποίηση ενός διαφορετικού LED.

Η ορθή λειτουργία του προγράμματος μπορεί να επαληθευτεί μέσω του εργαλείου STMCubeMonitor, το οποίο παρέχει αναλυτικά traces και διαγνωστικά μηνύματα. Αυτό επιτρέπει τον έλεγχο και την επιβεβαίωση της σωστής διαπραγμάτευσης της τάσης και της γενικότερης συμπεριφοράς του συστήματος.

Αυτή η εφαρμογή επιδεικνύει τη δυνατότητα των μικροελεγκτών STM32 να διαχειρίζονται δυναμικά τις απαιτήσεις ισχύος μέσω του USBPD, ενώ παρέχει ένα απλό και αποτελεσματικό περιβάλλον χρήστη με τη χρήση ενός joystick και LED.

Λέξεις Κλειδιά: USBPD, STM32, Μικροελεγκτής

Abstract

This study describes the development of a program in C language for an STM32 microcontroller, which allows the adjustment of the power supply voltage to 5V, 9V, and 12V using a joystick. The program utilizes the USB Power Delivery (USBPD) protocol to negotiate the required voltage with the power supply. Depending on the selected voltage, a corresponding LED is activated to indicate the system's operation. For example, pressing the select button of the joystick activates 5V, downwards 9V, and to the left 12V, with each selection accompanied by the activation of a different LED.

The correct operation of the program can be verified using the STMCubeMonitor tool, which provides detailed traces and diagnostic messages. This allows for checking and confirming the proper negotiation of the voltage and the overall behavior of the system.

This application demonstrates the capability of STM32 microcontrollers to dynamically manage power requirements through USBPD, while providing a simple and effective user environment using a joystick and LED.

Keywords: USBPD, STM32, Microcontroller

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1. Λίγα λόγια σχετικά με το USBPD.....	1
1.1 Τι Είναι το USB Power Delivery;	1
1.1.1 Ιστορικό	1
1.1.2 Ορολογία.....	2
1.1.3 Πρότυπο USBPD.....	3
1.2 Απαιτήσεις και Τυπικές Εφαρμογές για USB Type-C και USB Power Delivery	5
1.2.1 Advanced Mode.....	5
1.2.2 PD Adoption	5
1.2.3 Smooth Transition.....	6
1.2.4 Εισαγωγή στους Μικροελεγκτές STM32: Χαρακτηριστικά και Δυνατότητες...	8
1.3 Πλεονεκτήματα Χρήσης της Τεχνολογίας USB Type-C και Power Delivery σε Ενσωματωμένα Συστήματα.....	8
1.3.1 Πλεονεκτήματα της Διπλής Λειτουργίας (Dual Role Technology)	9
1.3.2 Αυξημένη Ισχύς.....	9
1.3.3 Ενεργοποίηση Εναλλακτικών Τρόπων (Alternate Modes) και Ασφάλεια.....	9
1.3.4 Αυθεντικοποίηση και Ασφάλεια σε STM32 Μικροελεγκτές.....	10
Κεφάλαιο 2. Αρχιτεκτονική USBPD και μικροελεγκτή	12
2.1 Αρχιτεκτονική του Συστήματος USBPD	12
2.1.1 Δομή και Λειτουργία του USBPD Sink σε STM32.....	12
2.2 Επεξήγηση TCPD και ADC.....	14
2.2.1 Ανάλυση και Εφαρμογές του TCPD για USB Type-C Προστασία.....	14
2.2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά και Θέση.....	15
2.2.3 Περιγραφή και ανάλυση του ADC.....	16
2.2.4 Τύποι ADC.....	17
2.2.5 Εφαρμογή ADC σε Μικροελεγκτές STM32	17
2.2.6 Προηγμένες Λειτουργίες ADC στο STM32	18
2.2.7 Εφαρμογές των ADC	19

2.3	Σύνδεσμοι και Διαμόρφωση των Pins του USB Type-C.....	19
2.3.1	Περιγραφή της Βιβλιοθήκης της ST και του Υπολοίπου Firmware	21
2.4	PDO και RDO στο USB Power Delivery	21
2.4.1	Διάγραμμα Ροής.....	25
2.5	Αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή STM32G474RE MCU.....	26
2.5.1	JP1-USBPD.....	28
2.5.2	B2 Joystick και 4 User LEDs.....	28
2.5.3	STM32CubeMonitor: Εργαλείο Παρακολούθησης και Βελτιστοποίησης Εφαρμογών STM32.....	29
Κεφάλαιο 3. Προγραμματιστική Ανάλυση.....		31
3.1	Γενική Περιγραφή του Κώδικα	31
3.1.1	Λειτουργία MX_GPIO_Init.....	31
3.1.2	Εξήγηση Νημάτων.....	31
3.1.3	Debounce Problem	32
3.1.4	Δημιουργία σημαφόρων.....	33
3.1.5	Έλεγχος Δυνατοτήτων και Αίτημα Μεταβολής Ισχύος.....	33
Κεφάλαιο 4. Πειραματική Αξιολόγηση.....		34
4.1	Διαδικασία για την Διπλωματική Εργασία.....	34
4.2	Ανάλυση και Επεξήγηση Traces για USB Power Delivery.....	38
4.2.1	Μηνύματα των Traces.....	38
4.2.2	Συμπέρασμα.....	40
4.3	Φαινόμενο Υπέρβασης Τάσης σε Συστήματα USB Power Delivery.....	40
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά.....		42
5.1	Υλοποίηση και Επαλήθευση της Λειτουργικότητας	42
5.2	Επιπλέον Λειτουργίες.....	43
5.2.1	Χρήση του Programmable APDO.....	43
5.2.2	Χρήση Ακριβέστερης Πηγής/Ακριβέστερου Μετρητή.....	44
5.3	Τι έμαθα από τη Διπλωματική Εργασία.....	44

Κεφάλαιο 1. Λίγα λόγια σχετικά με το USBPD

1.1 Τι Είναι το USB Power Delivery;

Το USB Power Delivery (USBPD) είναι ένα νέο πρότυπο που επεκτείνει τις δυνατότητες παροχής ισχύος των USB 2.0 και USB 3.1. Η τεχνολογία αυτή, χρησιμοποιώντας τον σύνδεσμο Type-C™, επιτρέπει την παροχή ισχύος έως και 100W, καθιστώντας δυνατή την τροφοδοσία συσκευών που δεν μπορούσαν να λειτουργήσουν με την παροχή ισχύος του συμβατικού USB, όπως φορητοί υπολογιστές. Επιπλέον, επιτρέπει τη γρήγορη φόρτιση των κινητών συσκευών, μειώνοντας τον χρόνο φόρτισης.

Η επικοινωνία USBPD πραγματοποιείται μεταξύ δύο συνδεδεμένων συσκευών και η βέλτιστη τάση και το ρεύμα καθορίζονται αυτόματα μετά από διαπραγμάτευση μιας συμφωνίας παροχής ισχύος. Η επικοινωνία υλοποιείται μέσω της νέας καθιερωμένης ειδικής γραμμής CC, επιτρέποντας τη λειτουργία της ανεξάρτητα από τη συμβατική επικοινωνία USB. Επιπλέον, παρέχεται υποστήριξη για τον έλεγχο εναλλακτικών λειτουργιών (Alternate Mode) για τη διαχείριση σημάτων βίντεο, εξαλείφοντας την ανάγκη για ξεχωριστή θύρα βίντεο σε φορητούς υπολογιστές και άλλες συσκευές.

Συνοπτικά, αυτό το νέο πρότυπο είναι ικανό να μεταδίδει ισχύ, δεδομένα και σήματα βίντεο χρησιμοποιώντας ένα μόνο καλώδιο, προσφέροντας πρωτοφανή ευκολία και ευχρηστία, ενώ συμβάλλει στη διατήρηση του περιβάλλοντος, εξαλείφοντας την ανάγκη για ξεχωριστά καλώδια παροχής ισχύος και βίντεο.

1.1.1 Ιστορικό

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για μείωση των ηλεκτρονικών αποβλήτων σε πολλές περιοχές, όπως στην Ευρώπη, μέσω της χρήσης ή ανάπτυξης κοινών συνδέσεων και φορτιστών για ποικίλες ηλεκτρονικές συσκευές. Ως εκ τούτου, τα τελευταία πρότυπα συνδέσεων USB και μετάδοσης ισχύος που αναπτύχθηκαν από το USB Implementers Forum (USB-IF), συμπεριλαμβανομένων των USB Type-C, USB Power Delivery (μαζί με USB Superspeed), και το νέο πρότυπο DisplayPort Alternate Mode για τη μεταφορά βίντεο, κερδίζουν ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή ως πραγματική λύση all-in-one καλωδίου. Αυτή η λύση επιτρέπει την παράλληλη μετάδοση υψηλής ισχύος, δεδομένων υψηλής ταχύτητας, και ακόμη και βίντεο 4K

μέσω ενός μόνο καλωδίου USB. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για πολλαπλά ξεχωριστά καλώδια, προσφέροντας μεγαλύτερη ευκολία ενώ μειώνει την ακαταστασία και τα απόβλητα.

Συνδυάζοντας τον νέο σύνδεσμο Type-C, ο οποίος διαθέτει μικρότερο, αναστρέψιμο και περιστρεφόμενο σχεδιασμό, ανθεκτικό για φορητούς υπολογιστές αλλά λεπτό αρκετά για κινητά τηλέφωνα, με το USB PD που προσφέρει κλιμακούμενη ισχύ μέσω πολλαπλών λειτουργιών παροχής ισχύος, προκύπτει μια κοινή, μελλοντικά ασφαλής διεπαφή.

1.1.2 Ορολογία

- **Πρότυπο USB Type-C™** (Type-C™ Connector): Ορίζεται κάτω από το USB 3.1, το USB Type-C είναι ένα νέο πρότυπο υποδοχής (κοίλου συνδέσμου), βύσματος (κυρτού συνδέσμου) και καλωδίου με πιο συμπαγή, αναστρέψιμο σχεδιασμό. Σε αντίθεση με το προηγούμενο πρότυπο που απαιτούσε συνδέσμους Type B για συσκευές downstream και συνδέσμους Type A για συσκευές upstream, και τα δύο άκρα ενός καλωδίου Type-C είναι ίδια και οι απαιτήσεις ισχύος διαπραγματεύονται μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών για να καθοριστούν οι θύρες upstream και downstream (UFP και DFP), προσφέροντας μεγαλύτερη ευκολία και χρηστικότητα. Επιπλέον, το πρότυπο USB Power Delivery (USB-PD) επιτρέπει την μεταφορά μεγαλύτερης ισχύος μέσω των καλωδίων USB Type-C, βελτιώνοντας τη φόρτιση και την τροφοδοσία συσκευών με υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος.
- **USB Implementers Forum, Inc. (USB-IF)**: Ένας οργανισμός προώθησης προτύπων που ιδρύθηκε το 1995 για την υποστήριξη της δημιουργίας, διαχείρισης και υιοθέτησης προτύπων USB. Αυτή τη στιγμή, το USB-IF έχει πάνω από 800 εταιρείες μέλη και συνεχίζει να βοηθά στην προώθηση συσκευών συμβατών με USB στην αγορά.

Με την κατανόηση της τεχνολογίας USB Power Delivery και των πλεονεκτημάτων της, μπορούμε να ενσωματώσουμε αυτή τη σύγχρονη και αποδοτική τεχνολογία στα ενσωματωμένα συστήματά μας, εξασφαλίζοντας αυξημένη απόδοση, ευελιξία και φιλικότητα προς το περιβάλλον.

Η εικόνα 1 παρουσιάζει τα διαφορετικά προφίλ ισχύος του πρωτοκόλλου USB Power Delivery 2.0 / 3.0, τα οποία επιτρέπουν τη μεταφορά διάφορων επιπέδων ισχύος μέσω καλωδίων USB Type-C, καθιστώντας δυνατή την τροφοδοσία και φόρτιση συσκευών με διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις, από μικρές συσκευές όπως ακουστικά και smartphones έως μεγαλύτερες συσκευές όπως laptops και docking stations.

USB Power Delivery 2.0 / 3.0				
USB PD profile	Voltage	Current	Power	Examples of devices
1	5 V	0.1 - 3 A	0.5 - 15 W	wireless earphones, smartphone, wireless mouse,
2	9 V	1.67 - 3 A	15 - 27 W	camera, drone, smartphone
3	15 V	1.8 - 3 A	27 - 45 W	tablet, laptop notebook, docking station
4	20 V	2.25 - 3 A 3 - 5 A *	45 - 100 W	gaming laptop, LCD screen, docking station

Εικόνα 1

1.1.3 Πρότυπο USBPD

Η τεχνολογία USB Type-C® Power Delivery, σε συνδυασμό με τον νέο αναστρέψιμο USB Type-C® σύνδεσμο, προσφέρει μια ενιαία πλατφόρμα σύνδεσης που μεταφέρει όλες τις απαραίτητες γραμμές: USB 2.0, USB 3.x, και τροφοδοσία ενέργειας.

Ο USB Type-C® σύνδεσμος υποστηρίζει αρχικά ισχύ έως 15 W (5 V @ 3 A), ενώ μπορεί να επεκταθεί έως 100 W (έως 20 V @ 5 A) με την προαιρετική δυνατότητα USB Power Delivery. Μέσω του πρωτοκόλλου power delivery, επιτρέπεται η διαπραγμάτευση ισχύος έως 100 W για την τροφοδοσία ή τη φόρτιση του εξοπλισμού που συνδέεται με μια θύρα USB, με στόχο τη μείωση των καλωδίων και των συνδέσεων, καθώς και τη χρήση καθολικών φορτιστών.

Η δυνατότητα power delivery επεκτείνει τις προηγούμενες προδιαγραφές τροφοδοσίας (USB 2.0, BC 1.2, κλπ.). Ο σύνδεσμος Type-C φέρνει ένα νέο σήμα σε σύγκριση με τα προηγούμενα καλώδια USB: τις γραμμές CC (control channel). Σε αυτές τις γραμμές, με ταχύτητα 300 Kbit/s, το πρωτόκολλο power delivery παρέχει τη δυνατότητα ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των δύο συνδεδεμένων συσκευών. Τα μηνύματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Μηνύματα Ελέγχου: Χρησιμοποιούνται για την εγκαθίδρυση και τη συντήρηση της επικοινωνίας, όπως η διαπραγμάτευση της τάσης και του ρεύματος.
- Μηνύματα Δεδομένων: Περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των συσκευών, τις δυνατότητες ισχύος, καθώς και άλλα δεδομένα που μπορεί να είναι απαραίτητα για την ομαλή λειτουργία.
- Μηνύματα Εκτελέσιμα: Δίνουν εντολές για συγκεκριμένες δράσεις, όπως η ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση της τροφοδοσίας.

Τι είναι το VBUS στο USB Power Delivery

Το VBUS είναι η κύρια γραμμή τροφοδοσίας σε ένα καλώδιο USB, η οποία μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τη μία συσκευή στην άλλη. Χρησιμοποιείται για να παρέχει τάση στους συνδεδεμένους συσκευές και αποτελεί μέρος του συστήματος που υποστηρίζει την τροφοδοσία και τη φόρτιση μέσω USB. Στο πλαίσιο του USB Power Delivery, το VBUS μπορεί να ρυθμιστεί σε διαφορετικά επίπεδα τάσης για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των συνδεδεμένων συσκευών.

Χαρακτηριστικά Power Delivery

Η δυνατότητα power delivery συνοδεύεται από ένα πρωτόκολλο που παρέχει δυνατότητες σε πραγματικό χρόνο:

- Αλλαγή ρόλου τροφοδοσίας: Επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή του ποιος παρέχει το VBUS, ανεξάρτητα από το ρόλο δεδομένων USB.
- Αλλαγή ρόλου δεδομένων USB: Επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή του ρόλου δεδομένων USB, αντικαθιστώντας το OTG (On-The-Go) από τις προηγούμενες προδιαγραφές USB.
- Μεταφορά μηνυμάτων πιστοποίησης: Επιτρέπει την πιστοποίηση της συνδεδεμένης συσκευής.
- Επιλογή "Alternate Mode": Επιτρέπει τη χρήση των γραμμών super-speed του USB 3.0 για τη μεταφορά βίντεο (DisplayPort ή HDMI).
- Ενημέρωση λογισμικού (firmware update): Επιτρέπει την ενημέρωση του λογισμικού των συνδεδεμένων συσκευών.
- Ανταλλαγή πληροφοριών μπαταρίας: Επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της μπαταρίας.

Για τον καθορισμό του ρόλου τροφοδοσίας, πρέπει να παρουσιαστεί ένας αντιστάτης pull-up/down στις γραμμές CC, ώστε η αλλαγή του ρόλου τροφοδοσίας να αντικατοπτρίζεται από την ενημερωμένη αντίσταση στις γραμμές CC (Περισσότερες πληροφορίες για αυτό το θέμα μπορούν να βρεθούν στο [AN5225]). Όταν χρησιμοποιείται ένα "παραδοσιακό καλώδιο" (π.χ. Type-A σε Type-C), για να συμμορφωθεί με τις προδιαγραφές, διαθέτει έναν ενσωματωμένο αντιστάτη. Δεδομένου ότι το Type-A/B δεν διαθέτει γραμμή CC στον σύνδεσμο, ο ρόλος τροφοδοσίας καθορίζεται από τον αντιστάτη pull-up/down στο βύσμα.

Αυτή η τεχνολογία ενσωματώνει όλες τις απαραίτητες δυνατότητες για τη βέλτιστη διαχείριση και μεταφορά δεδομένων και ενέργειας μέσω του USB Type-C, καθιστώντας την ιδανική για τη σύγχρονη ψηφιακή εποχή.

USB 2.0	5 V	500 mA	Default Current, based on definitions in the base specifications
USB 3.1	5 V	900 mA	Default Current, based on definitions in the base specifications
USB BC 1.2	5 V	Up to 1.5 A	Legacy charging
USB Type-C® @ 1.5 A	5 V	1.5 A	Supports high power devices
USB Type-C® @ 3.0 A	5 V	3 A	Supports higher power devices
USB-PD	Configurable up to 20 V	Configurable up to 5 A	Directional control and power level management

Εικόνα 2

1.2 Απαιτήσεις και Τυπικές Εφαρμογές για USB Type-C και USB Power Delivery

1.2.1 Advanced Mode

Το Advanced Mode αναφέρεται σε ένα εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης USB Type-C, το οποίο υποστηρίζει προηγμένες δυνατότητες μεταφοράς δεδομένων και ενέργειας. Στο συγκεκριμένο mode, οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν είτε ως συσκευές είτε ως κεντρικοί κόμβοι (hosts), επιτρέποντας την αμφίδρομη επικοινωνία και τη διανομή ενέργειας. Αυτό σημαίνει ότι μια συσκευή μπορεί να λειτουργεί τόσο ως πηγή (source) όσο και ως καταναλωτής (sink) ενέργειας, με δυνατότητα διαχείρισης υψηλών τάσεων και ρευμάτων. Η ευελιξία αυτή επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας και την υποστήριξη περισσότερων εφαρμογών.

Κύριες Απαιτήσεις

- Διπλή Λειτουργία Δεδομένων (Dual Role Data): Υποστήριξη τόσο για λειτουργία συσκευής όσο και για λειτουργία υπολογιστή (device/host).
- Διπλή Λειτουργία Ισχύος (Dual Role Power): Υποστήριξη τόσο για κατανάλωση όσο και για παροχή ισχύος (sink, source).
- Ρόλος Καταναλωτή (Sink): Υποστήριξη τάσης V_{bus} από 5V έως 48V.
- Ρόλος Παροχέα Ισχύος (Source): Μέγιστη τάση V_{bus} 5V.

Τυπικές Εφαρμογές

Οι τυπικές εφαρμογές για το προχωρημένο μοντέλο περιλαμβάνουν συσκευές με διπλή λειτουργία, όπως φορητοί υπολογιστές, smartphones, και άλλες φορητές συσκευές που μπορούν να λειτουργούν τόσο ως καταναλωτές όσο και ως παροχείς ισχύος.

1.2.2 PD Adoption

Το PD Adoption αφορά την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου USB Power Delivery (USB PD), το οποίο επιτρέπει την ασφαλή και δυναμική διανομή ενέργειας μέσω του USB Type-C. Το USB PD επιτρέπει τη διαπραγμάτευση της τάσης και του ρεύματος μεταξύ των συσκευών, διασφαλίζοντας την παροχή της απαιτούμενης ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε συσκευής. Αυτό προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία και ασφάλεια κατά τη φόρτιση και την τροφοδοσία συσκευών, επιτρέποντας ταυτόχρονα την ενεργοποίηση εναλλακτικών λειτουργιών (Alternate Modes) που επεκτείνουν τις δυνατότητες του USB Type-C πέρα από τη μεταφορά δεδομένων και ενέργειας.

Κύριες Απαιτήσεις

- Ρόλος Καταναλωτή και Παροχέα Ισχύος (Sink/Source): Υποστήριξη τάσης Vbus από 5V έως 48V, με μέγιστη ένταση ρεύματος 5A.
- Πρωτόκολλο USB PD: Απαιτείται για τη διαχείριση της ισχύος και των εναλλακτικών λειτουργιών.
- Ενεργοποίηση Εναλλακτικής Λειτουργίας (Alternate Mode): Δυνατότητα μεταφοράς ιδιόκτητων σημάτων, όπως DisplayPort και HDMI.

Παραδείγματα Εφαρμογών

Οι τυπικές εφαρμογές περιλαμβάνουν συσκευές όπως φορητές κονσόλες παιχνιδιών, εργαλεία, drones, και power banks. Αυτές οι συσκευές εκμεταλλεύονται την αυξημένη ισχύ και τις επιπλέον δυνατότητες που προσφέρει το πρωτόκολλο USB PD. Μέσω του USBPD γίνεται αυτόματη ανίχνευση των απαιτήσεων ισχύος των συνδεδεμένων συσκευών και παροχή έως και 100W και παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων και σημάτων βίντεο.

Πέρα από τις παραπάνω εφαρμογές, το USB Power Delivery μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε:

- Φορητούς Υπολογιστές: Χρήση μιας μόνο θύρας για τροφοδοσία, μεταφορά δεδομένων και σύνδεση με εξωτερικές οθόνες.
- Επαγγελματικές Οθόνες: Τροφοδοσία και σύνδεση βίντεο με έναν μόνο σύνδεσμο.
- Σταθμούς Εργασίας και Δοκιμαστικά Κέντρα: Απλοποίηση της σύνδεσης και της τροφοδοσίας πολλαπλών συσκευών.
- Αυτοκίνητα: Φόρτιση και σύνδεση κινητών συσκευών και tablets μέσω μιας μόνο θύρας.

1.2.3 Smooth Transition

Το Smooth Transition αναφέρεται στην ομαλή μετάβαση από τα παραδοσιακά πρότυπα USB στα πιο σύγχρονα πρότυπα USB Type-C, χωρίς την απαίτηση υποστήριξης του πρωτοκόλλου USB PD. Αυτό το mode επικεντρώνεται στην υποστήριξη βασικών λειτουργιών USB Type-C, όπως η μεταφορά δεδομένων και η φόρτιση σε χαμηλές τάσεις, διασφαλίζοντας την απλότητα και τη συμβατότητα με υπάρχοντες εξοπλισμούς. Η απουσία περίπλοκων πρωτοκόλλων διαπραγμάτευσης καθιστά αυτό το mode ιδανικό για βασικές εφαρμογές, όπου οι απαιτήσεις για ισχύ και λειτουργικότητα είναι περιορισμένες.








Κύριες Απαιτήσεις

- Διπλή Λειτουργία Δεδομένων (Dual Role Data): Υποστήριξη τόσο για λειτουργία συσκευής όσο και για λειτουργία υπολογιστή.
- Vbus: Σταθερή τάση 5V.
- Ρόλος Παροχέα Ισχύος (Source): Μέγιστη τάση Vbus 5V.

Τυπικές Εφαρμογές

Οι τυπικές εφαρμογές σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνουν βασικές συσκευές όπως φορητοί εκτυπωτές, μνήμες USB, και άλλες συσκευές που χρησιμοποιούν απλά τη λειτουργία USB Type-C χωρίς την ανάγκη για αυξημένη ισχύ ή προηγμένες λειτουργίες.

- Φορητοί Εκτυπωτές: Απλή τροφοδοσία και μεταφορά δεδομένων μέσω ενός μόνο καλωδίου.
- Μνήμες USB και Εξωτερικοί Δίσκοι: Απλοποιημένη συνδεσιμότητα και τροφοδοσία.
- Συσκευές Internet of Things (IoT): Συνδυασμός τροφοδοσίας και δεδομένων σε μικρές και χαμηλής ισχύος συσκευές.
- Φορητά Συστήματα Πληρωμών: Παροχή ισχύος και μεταφορά δεδομένων σε συσκευές POS.

Main requirements		Typical applications		
		Sink	Dual Role	Source
Advanced mode				
Advanced use-case	<ul style="list-style-type: none">✓ Dual Role Data (device/host)✓ Dual Role Power (sink, source)✓ Sink (Vbus = 5V to 48V)✓ Source Vbus = 5V max			
PD adoption				
PD enabled	<ul style="list-style-type: none">✓ Sink/source (Vbus = 5V to 48V, 5A Max)✓ USB PD protocol needed✓ Alternate Mode activation			
Smooth transition				
Type-C only (no PD)	<ul style="list-style-type: none">✓ Dual Role Data (device/host)✓ Vbus = 5V✓ Source Vbus = 5V max			
				

Εικόνα 3

1.2.4 Εισαγωγή στους Μικροελεγκτές STM32: Χαρακτηριστικά και Δυνατότητες

Οι μικροελεγκτές STM32 είναι μια οικογένεια μικροελεγκτών βασισμένων στον πυρήνα ARM Cortex-M, που παράγονται από την εταιρεία STMicroelectronics. Αυτοί οι μικροελεγκτές προσφέρουν υψηλή απόδοση, ευελιξία και ενεργειακή αποδοτικότητα, καθιστώντας τους ιδανικούς για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από βιομηχανικά συστήματα και ιατρικές συσκευές μέχρι καταναλωτικά ηλεκτρονικά και αυτοκινητοβιομηχανία. Οι STM32 μικροελεγκτές διαθέτουν πλούσιο σετ περιφερειακών και προηγμένες δυνατότητες διαχείρισης ισχύος, υποστηρίζοντας παράλληλα μια μεγάλη ποικιλία από πρωτόκολλα επικοινωνίας.

Οι μικροελεγκτές STM32 υποστηρίζουν επίσης ευρεία γκάμα πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως I2C, SPI, UART, USB, CAN και Ethernet, προσφέροντας ευελιξία στις διασυνδέσεις και διευκολύνοντας τη σύνδεση με άλλες συσκευές και αισθητήρες. Επιπλέον, περιλαμβάνουν δυνατότητες αναλογικής-προς-ψηφιακή και ψηφιακής-προς-αναλογική μετατροπής, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση και επεξεργασία αναλογικών σημάτων. Αυτό καθιστά τους STM32 ιδανικούς για εφαρμογές που απαιτούν επεξεργασία σημάτων, όπως αυτοματισμοί και ρομποτική.

Εκτός από τη διαχείριση των τυπικών χαρακτηριστικών της εφαρμογής σας, οι STM32 MCUs με ενσωματωμένο περιφερειακό USB PD επιτρέπουν τον έλεγχο των γραμμών διαμόρφωσης και επικοινωνίας (CC lines) του USB-C, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά τη σύνδεση με μια συσκευή USB Type-C. Επιπλέον, μεταφέρουν τα μηνύματα του πρωτοκόλλου USB Power Delivery.

Έτοιμα παραδείγματα υλικού και λογισμικού είναι διαθέσιμα για την υλοποίηση της τεχνολογίας USB-C και Power Delivery σε οποιοδήποτε ενσωματωμένο σύστημα, επιταχύνοντας έτσι την ανάπτυξη και την εισαγωγή στην αγορά.

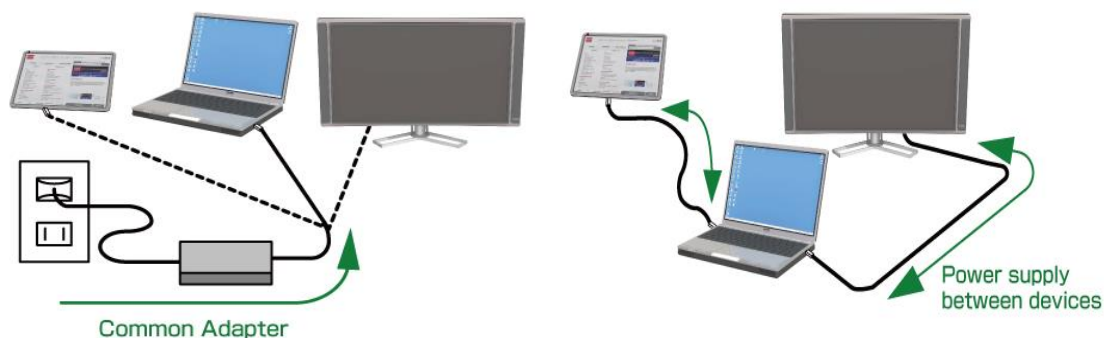
Οι λύσεις STM32 για USB-C συμμορφώνονται με τις προδιαγραφές του συστήματος διεπαφής USB Type-C (UCSI) σε αρχιτεκτονικές βασισμένες σε Windows ή Linux, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα-σε-τσιπ (SoC), έναν επεξεργαστή εφαρμογών ή μια συσκευή STM32 MPU ως κύριο επεξεργαστή.

1.3 Πλεονεκτήματα Χρήσης της Τεχνολογίας USB Type-C και Power Delivery σε Ενσωματωμένα Συστήματα

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας USB Type-C και Power Delivery σε ενσωματωμένα συστήματα παρέχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως αυξημένη ισχύς, δυνατότητες διπλής λειτουργίας, ενεργοποίηση εναλλακτικών τρόπων και βελτιωμένη προστασία. Οι STM32 MCUs, σε συνδυασμό με τις λύσεις της ST, παρέχουν στους προγραμματιστές τα εργαλεία και τους πόρους για να υλοποιήσουν αυτές τις τεχνολογίες με ασφάλεια και ευελιξία.

1.3.1 Πλεονεκτήματα της Διπλής Λειτουργίας (Dual Role Technology)

Η τεχνολογία Dual Role επιτρέπει τη μετάδοση ενέργειας και δεδομένων σε αμφίδρομη κατεύθυνση (όπως βλέπουμε στην Εικόνα 4 [ROH2]). Ανάλογα με την περίπτωση χρήσης, μπορείτε να ορίσετε και να αλλάξετε τον ρόλο τροφοδοσίας από καταναλωτή σε παροχέα (sink to source) και/ή τον ρόλο δεδομένων USB από συσκευή σε υπολογιστή και αντίστροφα. Το πρωτόκολλο USB PD ελέγχει τη διαχείριση των εναλλαγών ρόλων ενέργειας και δεδομένων.



Εικόνα 4

1.3.2 Αυξημένη Ισχύς

Το πρωτόκολλο USB PD μπορεί να διαπραγματευτεί μέχρι 100W για ταχύτερη επαναφόρτιση των φορητών συσκευών σας ή απλά για την τροφοδοσία της εφαρμογής σας σε υψηλότερη τάση (από 5 έως 48V). Αυτό απλοποιεί τον σχεδιασμό σας, καθώς ο εξωτερικός φορτιστής USB PD που συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές αναλαμβάνει την πολυπλοκότητα και το σχετικό κόστος του μπλοκ μετατροπής ενέργειας.

1.3.3 Ενεργοποίηση Εναλλακτικών Τρόπων (Alternate Modes) και Ασφάλεια

Το πρωτόκολλο USB PD επιτρέπει την ενεργοποίηση εναλλακτικών τρόπων (AM). Τυπικές εφαρμογές, όπως οι μετατροπείς USB Type-C σε βίντεο, χρησιμοποιούν AM για τη μετάδοση ιδιόκτητων σημάτων, όπως DisplayPort, HDMI και Thunderbolt μέσω USB.

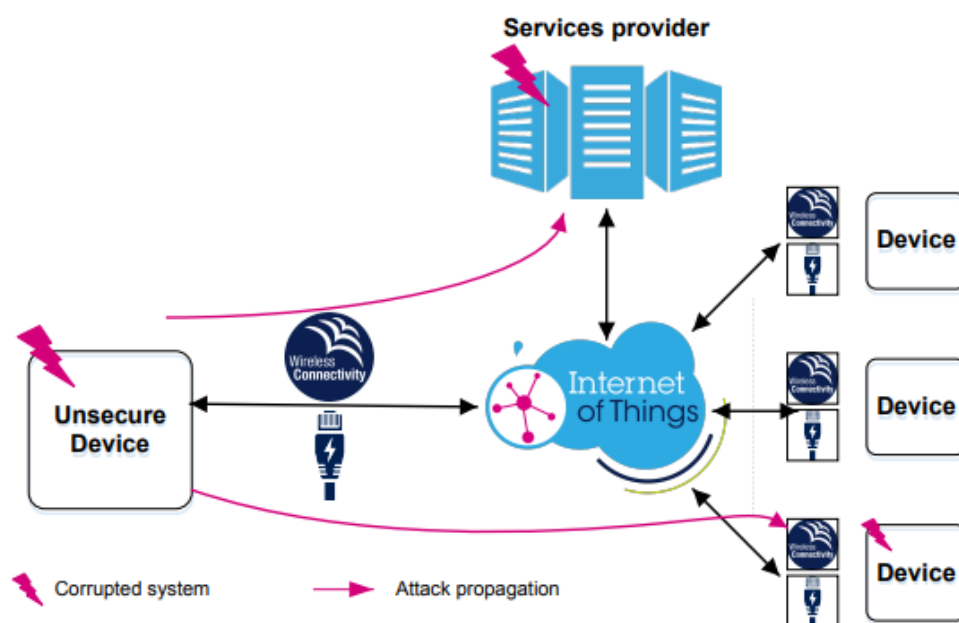
Το πρωτόκολλο USB PD εκτελεί αυθεντικοποίηση USB Type-C, η οποία διασφαλίζει την προστασία της επωνυμίας, την ασφαλή συνδεσιμότητα και την ασφαλή φόρτιση αναγνωρισμένων συσκευών.

1.3.4 Αυθεντικοποίηση και Ασφάλεια σε STM32 Μικροελεγκτές

Αυθεντικοποίηση και ασφάλεια αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για τη διασφάλιση της ακεραιότητας και της εμπιστευτικότητας σε συστήματα που χρησιμοποιούν STM32 μικροελεγκτές. Στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), όπου ένας μεγάλος αριθμός συσκευών είναι συνδεδεμένες, η σημασία της ασφάλειας αυξάνεται, καθώς οι συσκευές αυτές αποτελούν ελκυστικούς στόχους για επιθέσεις. Αυτή η ενότητα παρέχει μια ολοκληρωμένη ματιά στις βασικές αρχές της αυθεντικοποίησης και της ασφάλειας, τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές συστημάτων, και τις μεθόδους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διασφαλιστεί η προστασία των δεδομένων και των υπηρεσιών.

Απειλές και Επιθέσεις

Η αυθεντικοποίηση και η ασφάλεια απευθύνονται σε διάφορους τύπους απειλών που αντιμετωπίζουν οι μικροελεγκτές, όπως η κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας λογισμικού, η παραβίαση ιδιωτικών δεδομένων, και οι επιθέσεις υπηρεσιών. Οι επιτιθέμενοι συχνά εκμεταλλεύονται τα τρωτά σημεία των ενσωματωμένων συστημάτων για να αποκτήσουν πρόσβαση ή να προκαλέσουν βλάβες. Αυτή η ενότητα θα καλύψει παραδείγματα τυπικών επιθέσεων για να δείξει πώς οι επιτιθέμενοι εκμεταλλεύονται τις αδυναμίες. Η ασφάλεια στους μικροελεγκτές απαιτεί την προστασία του ενσωματωμένου λογισμικού, των δεδομένων και της λειτουργικότητας του συστήματος. Κρίσιμη είναι η προστασία δεδομένων όπως κρυπτογραφικών κλειδιών και προσωπικών δεδομένων, καθώς και η δυνατότητα αυθεντικοποίησης του κώδικα λογισμικού. Η ανάγκη για ασφάλεια αυξάνεται λόγω της δυνατότητας αντίστροφης μηχανικής σε επίθεση στον κώδικα, την πιθανότητα DoS επιθέσεων και την ευπάθεια των συνδεδεμένων συσκευών. Παρά την αδύναμη ασφάλεια κάθε συστήματος, είναι δυνατόν να δυσχερανθεί η επίθεση, ενώ η συνδεσιμότητα του IoT επιτρέπει επιθέσεις μέσω πρωτοκόλλων.


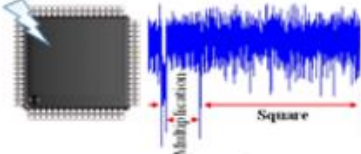
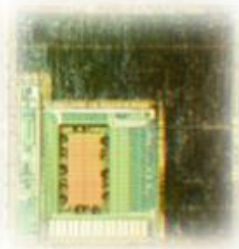


Εικόνα 5

Τύποι επιθέσεων

Οι επιθέσεις στους μικροελεγκτές κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες: λογισμικού, μη επεμβατικές υλικού και εισβολές στο υλικό. Οι επιθέσεις λογισμικού εκμεταλλεύονται ευπάθειες λογισμικού, όπως σφάλματα ή αδυναμίες πρωτοκόλλων, και μπορούν να εκτελεστούν απομακρυσμένα χωρίς φυσική πρόσβαση στη συσκευή. Αυτού του είδους οι επιθέσεις είναι συχνές και επαναλαμβανόμενες, με δυνητικά μεγάλες ζημιές. Από την άλλη πλευρά, οι επιθέσεις υλικού απαιτούν φυσική πρόσβαση και μπορεί να είναι είτε μη επεμβατικές, όπως η εκμετάλλευση διεπαφών MCU χωρίς καταστροφή της συσκευής, είτε εισβολικές, με καταστροφικές επιπτώσεις στο υλικό για την απόκτηση ευαίσθητων πληροφοριών.

Σημαντικός παράγοντας στην ασφάλεια είναι η αναγνώριση ότι καμία προστασία δεν είναι απόλυτη, καθώς είναι δυνατόν να εκμεταλλευτεί κάποιος αδυναμίες ακόμα και σε ένα προστατευμένο σύστημα. Η ανάπτυξη ασφαλών μηχανισμών ενημέρωσης λογισμικού είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της ασφάλειας με την πάροδο του χρόνου, ενώ η κατανόηση και προστασία από φυσικές μεθόδους επιθέσεων είναι εξίσου σημαντική για την αποτροπή ενδεχόμενων επιθέσεων.

Attacks types	Non-invasive	Semi-invasive	Invasive
			
Scope	Remote or local	Local board and device level	Local device level
Techniques	Software bugs Protocol weaknesses Trojan horse Eavesdropping	Debug port Power glitches Fault injection Side-channels analysis	Probing Laser FIB Reverse engineering
Cost/ expertise	From very low to high, depending on the security failure targeted	Quite low cost. Need only moderately sophisticated equipment and knowledge to implement.	Very expensive. Need dedicated equipment and very specific skills.
Objectives	Access to confidential assets (code and data). Usurpation Denial of service	Access to secret data or device internal behavior (algorithm).	Reverse engineering of the device (silicon intellectual property) Access to hidden hardware and software secrets (flash memory access)

Εικόνα 6

Κεφάλαιο 2. Αρχιτεκτονική USBPD και μικροελεγκτή

2.1 Αρχιτεκτονική του Συστήματος USBPD

Η υλοποίηση της τεχνολογίας USB Type-C και USB Power Delivery (USB PD) βασίζεται σε μια προηγμένη αρχιτεκτονική που επιτρέπει τον έλεγχο των γραμμών διαμόρφωσης και επικοινωνίας (CC lines) και τη διαχείριση των μηνυμάτων του πρωτοκόλλου USB PD. Στην παρούσα ανάλυση, παρουσιάζουμε τη δομή και τη λειτουργικότητα της αρχιτεκτονικής που χρησιμοποιεί τις μικροελεγκτικές μονάδες (MCUs) STM32 και τις συσκευές προστασίας θύρας TCPP0x.

2.1.1 Δομή και Λειτουργία του USBPD Sink σε STM32

Η αρχιτεκτονική του sink περιλαμβάνει τα εξής βασικά συστατικά μέρη:

Device Policy Manager (DPM)

Το DPM είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των πολιτικών ισχύος της συσκευής. Αποφασίζει πόση ενέργεια θα ζητηθεί από τον παροχέα και πώς θα διαχειριστεί την ενέργεια αυτή.

Sink Port

Ο Sink Port είναι το σημείο εισόδου της ενέργειας στη συσκευή. Περιλαμβάνει τα εξής υποσυστήματα:

- Policy Engine: Καθορίζει τις πολιτικές ισχύος και διαπραγματεύεται με τον παροχέα για τις παραμέτρους ισχύος.
- Protocol Layer: Υλοποιεί το πρωτόκολλο USB Power Delivery και διασφαλίζει την ορθή επικοινωνία μεταξύ της συσκευής sink και του παροχέα.
- Physical Layer: Διαχειρίζεται τα φυσικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης, συμπεριλαμβανομένων των σημάτων και των τάσεων που απαιτούνται για την επικοινωνία.

Power Sink

Το Power Sink είναι το τμήμα της συσκευής που λαμβάνει και διαχειρίζεται την παρεχόμενη ισχύ. Είναι υπεύθυνο για την αποθήκευση της ενέργειας (π.χ., φόρτιση μπαταρίας) ή για την άμεση χρήση της.

USB-C Port Control

Ο έλεγχος της θύρας USB-C διαχειρίζεται τις φυσικές συνδέσεις και την επικοινωνία με τον παροχέα, διασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία της θύρας.

Διαδικασία Λειτουργίας

Όταν μια συσκευή sink συνδέεται με έναν παροχέα μέσω USB Type-C, η διαδικασία λειτουργίας περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

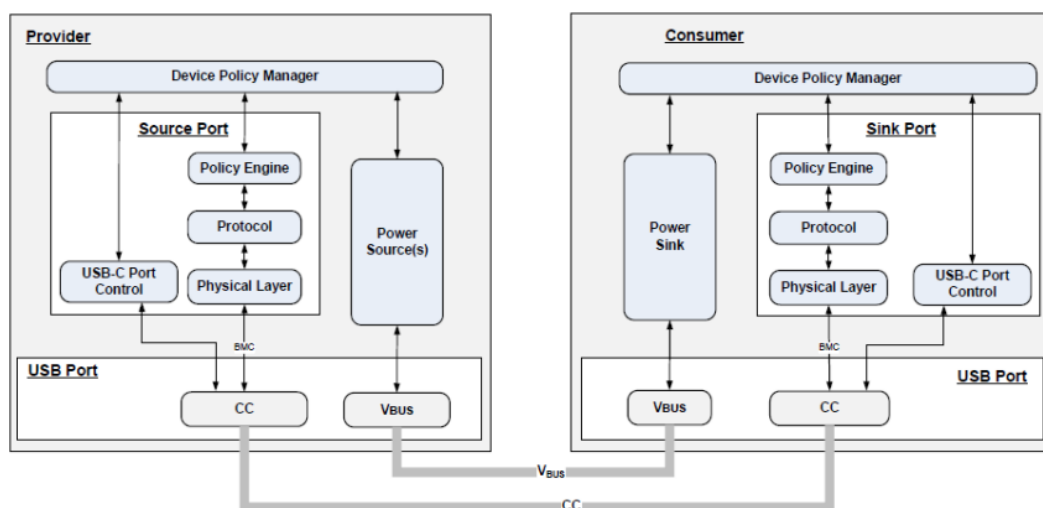
1. Αναγνώριση και Διαπραγμάτευση:
 - Αρχική Εγκατάσταση:
 - Το VBUS δίνει πάντα 5V αλλά συνήθως 200mA στην αρχή για λόγους ασφάλειας.
 - Οι pull-up και pull-down αντιστάσεις στα CC (Configuration Channels) καθορίζουν ποια συσκευή είναι source (παροχέας) και ποια sink (δέκτης).
 - Ξεκίνημα Διαπραγμάτευσης:
 - Ο sink αναγνωρίζει τη σύνδεση με τον παροχέα και ξεκινά τη διαπραγμάτευση των παραμέτρων ισχύος μέσω του Policy Engine.
 - Οι διαπραγματεύσεις πραγματοποιούνται μέσω των CC lines, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο USB Power Delivery (USB-PD).
2. Παροχή Ισχύος:
 - Ολοκλήρωση Διαπραγμάτευσης:
 - Μόλις ολοκληρωθεί η διαπραγμάτευση, ο παροχέας αρχίζει να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια στον sink. Οι τιμές ισχύος μπορεί να ρυθμιστούν ανάλογα με τις ανάγκες της συσκευής (π.χ. έως 100W).
 - Μεταφορά Ισχύος:
 - Η ενέργεια μεταφέρεται μέσω των VBUS και GND pins. Παράλληλα, η επικοινωνία συνεχίζεται μέσω των CC lines για την παρακολούθηση και ρύθμιση των παραμέτρων ισχύος.
3. Διαχείριση Ενέργειας:
 - Χρήση Ενέργειας:
 - Το Power Sink διαχειρίζεται την εισερχόμενη ενέργεια, είτε αποθηκεύοντάς την σε μπαταρία είτε χρησιμοποιώντας την άμεσα για τη λειτουργία της συσκευής.

- Ασφάλεια και Παρακολούθηση:
 - Οι συσκευές παρακολουθούν συνεχώς τις παραμέτρους ισχύος και προσαρμόζονται ανάλογα για να διασφαλίσουν την ασφαλή λειτουργία.

Λογισμικό και Χρήστης

- Βιβλιοθήκη USB-PD:
 - Παρέχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για τη διαπραγμάτευση και τη διαχείριση της ισχύος.
 - Ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει προ-υπάρχουσες λειτουργίες ή να επεκτείνει τη βιβλιοθήκη ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής.
- Κώδικας Χρήστη:
 - Ο χρήστης μπορεί να γράψει προσαρμοσμένο κώδικα για να καθορίσει συγκεκριμένες παραμέτρους λειτουργίας ή επιπλέον διαχειριστικές λειτουργίες για τη συσκευή του.

Figure 4. USB Power Delivery architecture



Εικόνα 7

2.2 Επεξήγηση TCPP και ADC

2.2.1 Ανάλυση και Εφαρμογές του TCPP για USB Type-C Προστασία

Το TCPP (Type-C Port Protection) αποτελεί μια σειρά από συνοδευτικά chips για τους μικροελεγκτές STM32 που προσφέρουν προστασία και ευκολία κατά την μετάβαση και τη χρήση USB Type-C συνδέσεων. Η σειρά TCPP παρέχει μια ολοκληρωμένη λύση προστασίας για USB Type-C συνδέσεις, προσφέροντας ανθεκτικότητα, ευελιξία σχεδίασης, και εξοικονόμηση κόστους. Είναι ιδανική για μια

ευρεία γκάμα εφαρμογών, διευκολύνοντας την ανάπτυξη και την προτυποποίηση. Οι σύγχρονες απαιτήσεις για ασφαλείς και αποδοτικές συνδέσεις κάνουν τα TCPP chips αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης τεχνολογίας.

2.2.2 Βασικά Χαρακτηριστικά και Θέση

Ο Type-C Port Protection (TCPP) είναι ένα σημαντικό στοιχείο για την προστασία των θυρών USB Type-C και την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας τους, ιδιαίτερα σε συσκευές που υποστηρίζουν USB Power Delivery (PD). Ο TCPP είναι ένας εξειδικευμένος ολοκληρωμένος κύκλωμα που προστατεύει το μικροελεγκτή και τα συνδεδεμένα εξαρτήματα από διάφορους κινδύνους, όπως υπέρταση, υπερρεύματα και ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις (ESD).

Λειτουργία και Χρησιμότητα του TCPP

Ο TCPP είναι υπεύθυνος για την προστασία και τη διαχείριση της θύρας USB Type-C, προσφέροντας διάφορες λειτουργίες:

- Προστασία Υπέρτασης (OVP): Ο TCPP προστατεύει τις γραμμές VBUS και CC από υπερβολικές τάσεις που μπορεί να προκαλέσουν ζημιές στα εξαρτήματα.
- Προστασία Υπερρεύματος (OCP): Προστατεύει από ρεύματα που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια, αποτρέποντας ζημιές στα κυκλώματα.
- Προστασία από Ηλεκτροστατικές Εκφορτίσεις (ESD): Παρέχει προστασία από ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις, σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61000-4-2.
- Διαχείριση Ρόλων Ισχύος: Ο TCPP μπορεί να διαχειριστεί τη δυναμική αλλαγή των ρόλων ισχύος (Source/Sink) σε πραγματικό χρόνο.
- Συμβατότητα με USB PD: Επιτρέπει την υποστήριξη του πρωτοκόλλου USB Power Delivery, το οποίο επιτρέπει την παράδοση έως και 100W ισχύος.

Θέση και Ενσωμάτωση του TCPP στον Μικροελεγκτή

Ο TCPP δεν είναι συνήθως ενσωματωμένος στον μικροελεγκτή, αλλά λειτουργεί ως εξωτερικό κύκλωμα που συνεργάζεται στενά με τον μικροελεγκτή για να διασφαλίσει την ομαλή λειτουργία της θύρας USB Type-C.

- Εξωτερικό Ολοκληρωμένο Κύκλωμα: Ο TCPP τοποθετείται εξωτερικά στον μικροελεγκτή και συνδέεται στις γραμμές VBUS, CC και στις άλλες απαραίτητες γραμμές της θύρας USB Type-C.
- Συνεργασία με τον Μικροελεγκτή: Ο TCPP συνεργάζεται με τον μικροελεγκτή για τη διαχείριση των ρόλων ισχύος και την προστασία των γραμμών. Ο μικροελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιεί πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως I2C ή SPI, για να επικοινωνεί με τον TCPP.
- Διαχείριση Ισχύος: Ο TCPP είναι υπεύθυνος για την ασφαλή ενεργοποίηση και απενεργοποίηση των γραμμών ισχύος, διασφαλίζοντας ότι η συσκευή παραμένει προστατευμένη από επικίνδυνες συνθήκες.

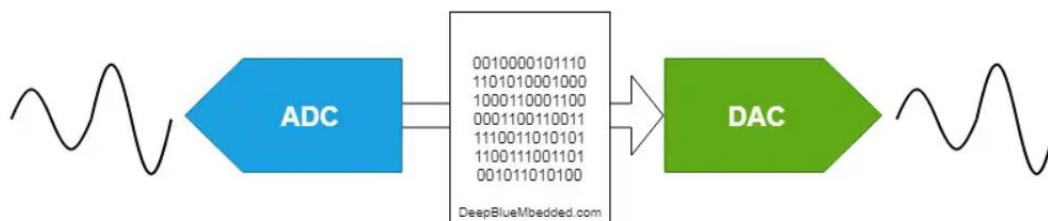
Σε συνδυασμό με τον μικροελεγκτή, ο TCPP εξασφαλίζει ότι η θύρα USB Type-C λειτουργεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, επιτρέποντας τη χρήση προηγμένων χαρακτηριστικών, όπως η γρήγορη φόρτιση και η μεταφορά δεδομένων υψηλής ταχύτητας. Ο μικροελεγκτής χειρίζεται την επικοινωνία και την πρωτόκολλο USB PD, ενώ ο TCPP παρέχει τις αναγκαίες προστασίες για να διασφαλίσει την ακεραιότητα και την ασφάλεια του συστήματος.

2.2.3 Περιγραφή και ανάλυση του ADC

Οι μετατροπείς Αναλογικού σε Ψηφιακό Σήμα (ADC) είναι βασικά στοιχεία των σύγχρονων ηλεκτρονικών, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ του αναλογικού κόσμου και των ψηφιακών συστημάτων. Χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από απλούς αισθητήρες έως πολύπλοκα συστήματα επεξεργασίας σήματος.

Ένας ADC μετατρέπει μια αναλογική είσοδο τάσης σε έναν αντίστοιχο ψηφιακό κώδικα εξόδου. Η διαδικασία μετατροπής περιλαμβάνει τη δειγματοληψία της αναλογικής εισόδου, την κβαντοποίηση της τιμής αυτής και την κωδικοποίησή της σε δυαδική μορφή. Οι ADC είναι ζωτικής σημασίας σε μια πληθώρα εφαρμογών, επιτρέποντας τη μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά δεδομένα που μπορούν να επεξεργαστούν από μικροελεγκτές και άλλα ψηφιακά συστήματα. Η κατανόηση της λειτουργίας τους και η βέλτιστη χρήση τους, ειδικά σε πλατφόρμες όπως οι STM32, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση και την αποδοτικότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων.

- Δειγματοληψία (Sampling): Ο ADC λαμβάνει περιοδικά δείγματα της αναλογικής τάσης εισόδου σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα. Η συχνότητα δειγματοληψίας (Sampling Rate) καθορίζει πόσα δείγματα λαμβάνονται ανά δευτερόλεπτο.
- Κβαντοποίηση (Quantization): Κάθε δειγματοληπτικό σημείο αντιστοιχίζεται σε μια διακριτή ψηφιακή τιμή. Η ανάλυση (Resolution) του ADC καθορίζει τον αριθμό των δυνατών ψηφιακών τιμών που μπορούν να παραχθούν, συνήθως εκφρασμένο σε bits.
- Κωδικοποίηση (Encoding): Η κβαντοποιημένη τιμή μετατρέπεται σε δυαδικό κώδικα και αποθηκεύεται σε ένα καταχωρητή εξόδου.



Εικόνα 8

2.2.4 Τύποι ADC

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ADC, καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής:

- Αναλογικός Συγκριτής με Αντίστροφη Αρίθμηση (Successive Approximation Register - SAR) ADC: Χρησιμοποιεί έναν διαδοχικό συγκριτή για να βρει την ψηφιακή τιμή που αντιστοιχεί στην αναλογική είσοδο με βάση μια δυαδική αναζήτηση.
- Μετατροπέας Σταθερού Ενδιάμεσου Σήματος (Sigma-Delta ADC): Χρησιμοποιεί την τεχνική της υπερδειγματοληψίας και της ψηφιακής φιλτραρίσματος για να επιτύχει υψηλή ανάλυση.
- Αντιστάθμιση Ζυγοστάθμισης (Flash ADC): Παρέχει τη γρηγορότερη μετατροπή συγκρίνοντας την αναλογική είσοδο με όλες τις δυνατές τιμές ταυτόχρονα, αλλά απαιτεί μεγάλο αριθμό συγκριτών.

2.2.5 Εφαρμογή ADC σε Μικροελεγκτές STM32

Ο Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC) είναι ένα από τα βασικά στοιχεία σε έναν μικροελεγκτή, καθώς επιτρέπει τη μετατροπή αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά δεδομένα που μπορούν να επεξεργαστούν από τον μικροελεγκτή. Η διαδικασία αυτή είναι κρίσιμη σε πολλές εφαρμογές όπου τα φυσικά σήματα, όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η ένταση φωτός και άλλα, είναι αρχικά αναλογικά.

Ο ADC λαμβάνει αναλογικά σήματα από εξωτερικούς αισθητήρες ή άλλες αναλογικές συσκευές και τα μετατρέπει σε ψηφιακές τιμές. Αυτές οι ψηφιακές τιμές μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν από το μικροελεγκτή για περαιτέρω επεξεργασία, ανάλυση ή αποθήκευση.

- Μετατροπή Σημάτων: Ο ADC λαμβάνει ένα αναλογικό σήμα και το δειγματοληπτεί περιοδικά, μετατρέποντάς το σε αντίστοιχες ψηφιακές τιμές.
- Ευαισθησία και Ακρίβεια: Η ανάλυση του ADC, συνήθως εκφραζόμενη σε bits (π.χ., 8-bit, 10-bit, 12-bit, κλπ.), καθορίζει την ακρίβεια της μετατροπής. Ένας 12-bit ADC μπορεί να παράγει 4096 διαφορετικές ψηφιακές τιμές.
- Χρησιμότητα: Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας, πιεσόμετρα, φωτόμετρα, και κάθε εφαρμογή που απαιτεί την παρακολούθηση αναλογικών παραμέτρων.

Θέση και Ενσωμάτωση του ADC στον Μικροελεγκτή

Ο ADC είναι συνήθως ενσωματωμένος στον ίδιο τον μικροελεγκτή. Αυτό σημαίνει ότι αποτελεί μέρος του ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) του μικροελεγκτή και δεν απαιτείται εξωτερικό εξάρτημα για τη λειτουργία του. Η ενσωμάτωση του ADC

απλοποιεί τον σχεδιασμό του κυκλώματος και μειώνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος.

- Ενσωματωμένος ADC: Σχεδόν όλοι οι σύγχρονοι μικροελεγκτές διαθέτουν έναν ή περισσότερους ενσωματωμένους ADC. Αυτοί οι ADC μπορούν να έχουν διαφορετικό αριθμό καναλιών, επιτρέποντας τη δειγματοληψία πολλαπλών αναλογικών σημάτων ταυτόχρονα.
- Σύνδεση με Αισθητήρες: Τα αναλογικά σήματα από τους αισθητήρες συνδέονται απευθείας στους ακροδέκτες του μικροελεγκτή που είναι συνδεδεμένοι με τον ADC. Ο μικροελεγκτής μπορεί να έχει συγκεκριμένους ακροδέκτες για κάθε κανάλι του ADC.
- Διαδικασία Μετατροπής: Ο μικροελεγκτής περιλαμβάνει εντολές και ρυθμίσεις που επιτρέπουν στον προγραμματιστή να ξεκινήσει τη διαδικασία δειγματοληψίας και να διαβάσει τις ψηφιακές τιμές που προκύπτουν από τη μετατροπή.

Σε έναν τυπικό μικροελεγκτή όπως ο STM32, η διαδικασία της δειγματοληψίας και της μετατροπής περιλαμβάνει τη ρύθμιση του ADC, τη διαμόρφωση του DMA (Direct Memory Access) για την αυτόματη μεταφορά των δεδομένων, και τη χρήση διακοπών (interrupts) για την επεξεργασία των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια και αποδοτικότητα στη διαχείριση των αναλογικών σημάτων.

2.2.6 Προηγμένες Λειτουργίες ADC στο STM32

Οι μικροελεγκτές STM32 παρέχουν πολλές προηγμένες δυνατότητες για τους ADC, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για να βελτιστοποιήσουν την απόδοση και τη χρήση πόρων:

- Εκκίνηση με Σήματα Χρονοδιακόπτη: Οι ADC μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να εκκινούνται από εσωτερικά σήματα χρονοδιακόπτη, επιτρέποντας περιοδική δειγματοληψία χωρίς την ανάγκη επέμβασης του επεξεργαστή.
- Λειτουργία DMA (Direct Memory Access): Επιτρέπει τη μεταφορά των δεδομένων από τον ADC στη μνήμη χωρίς την επέμβαση του επεξεργαστή, αυξάνοντας την αποδοτικότητα.
- Ρύθμιση Εναλλαγής Ανάλυσης: Ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, μπορεί να επιλεγεί διαφορετική ανάλυση για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

2.2.7 Εφαρμογές των ADC

Οι ADC χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως:

- Αισθητήρες: Μετατροπή αναλογικών σημάτων από αισθητήρες σε ψηφιακά δεδομένα για επεξεργασία.
- Συστήματα Ελέγχου: Παρακολούθηση και έλεγχος αναλογικών παραμέτρων σε συστήματα αυτοματισμού.
- Επεξεργασία Σήματος: Ψηφιοποίηση αναλογικών σημάτων για επεξεργασία σε DSP (Digital Signal Processing).

2.3 Σύνδεσμοι και Διαμόρφωση των Pins του USB Type-C

Ο σύνδεσμος USB Type-C είναι ένας σύγχρονος σύνδεσμος που χρησιμοποιείται ευρέως σε σύγχρονες συσκευές για τη μεταφορά δεδομένων και την παροχή ενέργειας. Έχει αναστρέψιμο σχεδιασμό, που επιτρέπει τη σύνδεση με οποιονδήποτε προσανατολισμό, προσφέροντας ευκολία στη χρήση.

Διαμόρφωση Pins του USB Type-C

Τα βύσματα και οι υποδοχές USB Type-C έχουν 24 pins, τα οποία είναι οργανωμένα συμμετρικά ώστε να διασφαλίζεται η αναστρεψιμότητα των συνδέσεων. Η διάταξη των pins περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες:

Συμμετρικές Συνδέσεις:

Power Pins:

- VBUS: Χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας στη συσκευή.
- GND: Παρέχουν γείωση.

USB 2.0 Differential Pairs:

- D+ και D-: Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά δεδομένων USB 2.0.

Ασύμμετρες Συνδέσεις:

High-Speed Signal Paths:

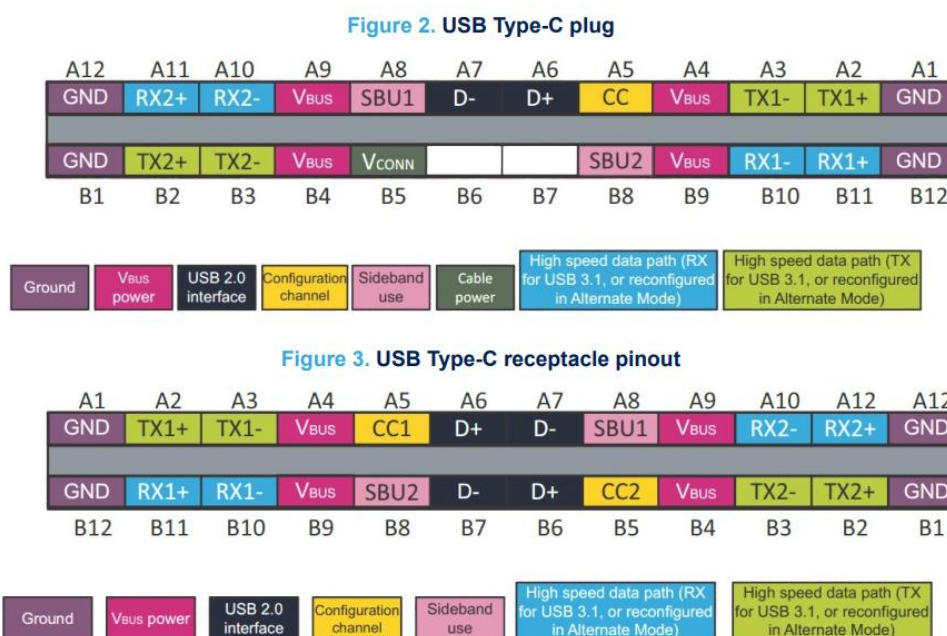
- TX1+, TX1-, RX1+, RX1- και TX2+, TX2-, RX2+, RX2-: Υποστηρίζουν ταχύτητες δεδομένων USB 3.1 και μπορούν να επαναδιαμορφωθούν σε εναλλακτική λειτουργία (Alternate Mode).

Configuration Channels (CC lines):

- CC1 και CC2: Χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη, διαμόρφωση και διαχείριση των χαρακτηριστικών του USB Type-C Power Delivery. Αυτά τα κανάλια είναι υπεύθυνα για τον προσδιορισμό του ρόλου της συσκευής (Host ή Device) και για την ενεργοποίηση της επικοινωνίας.

Sideband Use (SBU lines):

- SBU1 και SBU2: Χρησιμοποιούνται για αναλογικές λειτουργίες ήχου και άλλες εναλλακτικές λειτουργίες.



Εικόνα 9

Σημασία για τις Εφαρμογές Sink

Οι συσκευές sink (όπως φορητοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, και άλλα ηλεκτρονικά) χρησιμοποιούν την υποδοχή USB Type-C για να λαμβάνουν ενέργεια και δεδομένα. Η σωστή κατανόηση και χρήση της διαμόρφωσης των pins είναι κρίσιμη για την αποδοτική και ασφαλή λειτουργία αυτών των συσκευών.

2.3.1 Περιγραφή της Βιβλιοθήκης της ST και του Υπολοίπου Firmware

Η ανάπτυξη firmware για την υποστήριξη USB Type-C συνδέσεων απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένων βιβλιοθηκών και εργαλείων που παρέχονται από την STMicroelectronics.

Η βιβλιοθήκη STM32Cube περιλαμβάνει το λογισμικό X-CUBE-TCPP, το οποίο παρέχει όλες τις απαραίτητες λειτουργίες για την υποστήριξη και την προστασία των USB Type-C συνδέσεων. Αυτές οι λειτουργίες περιλαμβάνουν:

- Πρωτόκολλο USB Power Delivery (PD): Διαχείριση των διαπραγματεύσεων ισχύος μεταξύ της πηγής και του καταναλωτή.
- Προστασία γραμμών CC: Προστασία από υπέρταση και υπερένταση.
- ESD Προστασία: Προστασία από ηλεκτροστατική εκφόρτιση.

Διαχείριση των Διεργασιών

Για τον συντονισμό των διεργασιών που εκτελούνται παράλληλα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός Real-Time Operating System (RTOS). Το RTOS επιτρέπει την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών εργασιών, όπως:

- Ανίχνευση σύνδεσης/αποσύνδεσης καλωδίου
- Διαπραγμάτευση συμβολαίων ισχύος
- Παρακολούθηση τάσης και ρεύματος
- Εκτέλεση προστατευτικών μέτρων σε περίπτωση σφάλματος

Η επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων του συστήματος επιτυγχάνεται μέσω διαύλων όπως το I2C για την επικοινωνία μεταξύ του MPU και του PD Ctrl MCU. Το RTOS συντονίζει τις εντολές και τις αποκρίσεις μεταξύ των διαφόρων μονάδων, διασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία και την γρήγορη αντίδραση σε οποιαδήποτε αλλαγή κατάστασης.

2.4 PDO και RDO στο USB Power Delivery

Τα Power Data Objects (PDO) είναι δομές δεδομένων στο πρωτόκολλο USB Power Delivery (USB PD) που καθορίζουν τις δυνατότητες ισχύος μιας συσκευής. Τα PDO είναι υπεύθυνα για την παροχή των απαραίτητων πληροφοριών ώστε να διασφαλιστεί η σωστή και ασφαλής παροχή ενέργειας μεταξύ των συσκευών που είναι συνδεδεμένες μέσω USB Type-C.

Τύποι Power Data Objects (PDO)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι PDO που καθορίζουν διαφορετικά επίπεδα και τύπους παροχής ισχύος. Οι κυριότεροι τύποι είναι οι εξής:

1. Fixed Supply PDO

Τα Fixed Supply PDO καθορίζουν συγκεκριμένα επίπεδα τάσης και ρεύματος που μπορεί να παρέχει μια συσκευή παροχής (source). Οι τυπικές τάσεις για τα Fixed Supply PDO είναι (5V,9V,12V) στο δικό μας μικροελεγκτή.

Το εύρος του ρεύματος για τα Fixed Supply PDO είναι από 0A έως 5A. Κάθε συσκευή παροχής πρέπει να υποστηρίζει τουλάχιστον ένα Fixed Supply PDO με δυνατότητα λειτουργίας στα 5V, ώστε να εξασφαλίζεται η συμβατότητα με τις περισσότερες συσκευές.

2. APDO (Adjustable Power Data Object)

Το Adjustable Power Data Object (APDO) που επιτρέπει τη δυναμική ρύθμιση της εξόδου τάσης και ρεύματος της συσκευής παροχής. Τα κύρια χαρακτηριστικά του PPS APDO περιλαμβάνουν:

- **Ρυθμιζόμενη Τάση:** Η τάση μπορεί να ρυθμιστεί σε βήματα των 20mV.
- **Εύρος Τάσης:** 3.3V έως 11V.
- **Ρυθμιζόμενο Ρεύμα:** Το ρεύμα μπορεί να ρυθμιστεί σε ένα εύρος από 0A έως 5A.

Η δυνατότητα προγραμματισμού της τάσης και του ρεύματος επιτρέπει στις συσκευές να προσαρμόζουν την παροχή ισχύος στις ανάγκες τους σε πραγματικό χρόνο, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την ασφάλεια.

Λειτουργία των PDO

Η λειτουργία των PDO περιλαμβάνει τη διαπραγμάτευση και τη ρύθμιση της παροχής ισχύος μεταξύ της συσκευής παροχής (source) και της συσκευής καταναλωτή (sink). Η διαδικασία λειτουργίας περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Ανακάλυψη Δυνατοτήτων:

- Η συσκευή παροχής ανακοινώνει τα διαθέσιμα PDO στη συσκευή καταναλωτή μέσω του πρωτοκόλλου USB PD.

2. Διαπραγμάτευση και Ρύθμιση:

- Η συσκευή καταναλωτή ζητά τη ρύθμιση της παροχής ισχύος σύμφωνα με το επιλεγμένο PDO.
- Η συσκευή παροχής ρυθμίζει την έξοδο της ώστε να ανταποκρίνεται στα αιτήματα της συσκευής καταναλωτή.

3. Παρακολούθηση και Διαχείριση:

- Οι συσκευές συνεχίζουν να επικοινωνούν μέσω των Configuration Channels (CC) για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της παροχής ισχύος.
- Εάν χρειαστεί, οι συσκευές μπορούν να επαναδιαπραγματευτούν τα επίπεδα ισχύος.

Πλεονεκτήματα των PDO

Η χρήση των PDO στο USB Power Delivery προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα:

- **Συμβατότητα:** Εξασφαλίζει τη συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών συσκευών και φορτιστών.
- **Αποδοτικότητα:** Βελτιστοποιεί την αποδοτικότητα της παροχής ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες της συσκευής καταναλωτή.
- **Ασφάλεια:** Διασφαλίζει ότι οι συσκευές δεν θα λάβουν περισσότερη ισχύ από αυτή που μπορούν να διαχειριστούν, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερθέρμανσης και βλαβών.
- **Ευελιξία:** Παρέχει ευελιξία στη ρύθμιση της παροχής ισχύος, επιτρέποντας τη δυναμική προσαρμογή της στις ανάγκες της συσκευής.

Εξήγηση Request Data Objects (RDO)

Τα Request Data Objects (RDO) είναι δομές δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο USB Power Delivery (USB PD) για να καθορίσουν τις παραμέτρους ισχύος που ζητά μια συσκευή καταναλωτή (sink) από μια συσκευή παροχής (source). Τα RDO είναι ζωτικής σημασίας για τη διαπραγμάτευση και τη ρύθμιση της παροχής ισχύος μεταξύ των συνδεδεμένων συσκευών USB Type-C.

Δομή και Περιεχόμενο των RDO

Μόλις επιλεγεί το κατάλληλο SRC PDO, η συσκευή SNK δημιουργεί το αντίστοιχο Request Data Object (RDO). Το RDO περιλαμβάνει τα εξής πεδία:

- Index του επιλεγμένου SRC PDO
- Ρεύμα λειτουργίας
- Μέγιστο ρεύμα λειτουργίας

Τα πεδία αυτά συμπληρώνονται βάσει των χαρακτηριστικών του επιλεγμένου SRC PDO και των απαιτήσεων της συσκευής SNK.

Λειτουργία των RDO

Η λειτουργία των RDO περιλαμβάνει τα εξής βασικά βήματα:

1. Δημιουργία και Αποστολή του RDO

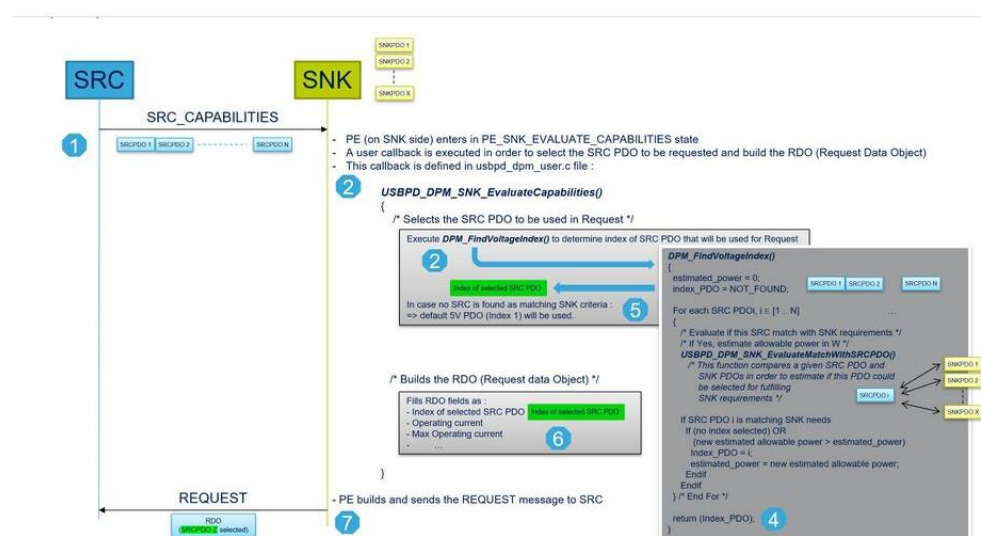
Η συσκευή sink δημιουργεί ένα RDO που περιγράφει τις παραμέτρους ισχύος που επιθυμεί. Το RDO αποστέλλεται στη συσκευή παροχής μέσω του πρωτοκόλλου USB PD. Αφού δημιουργηθεί το RDO, η PE κατασκευάζει το μήνυμα REQUEST και το αποστέλλει στη συσκευή SRC. Το μήνυμα αυτό περιλαμβάνει το RDO και καθορίζει τις παραμέτρους της ισχύος που ζητά η συσκευή SNK από τη συσκευή SRC.

2. Αξιολόγηση από τη Συσκευή Παροχής

Η συσκευή παροχής λαμβάνει το RDO και αξιολογεί αν μπορεί να παρέχει την ζητούμενη ισχύ σύμφωνα με τις παραμέτρους που καθορίζονται στο RDO. Αν μπορεί, ρυθμίζει την παροχή ισχύος σύμφωνα με το RDO. Η συνάρτηση USBPD_DPM_SNK_EvaluateCapabilities() εξετάζει τα SRC PDOs που έχουν παραληφθεί και προσδιορίζει ποιο από αυτά ταιριάζει καλύτερα στις απαιτήσεις της συσκευής SNK. Η αξιολόγηση αυτή γίνεται με βάση διάφορα κριτήρια, όπως η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς, η τάση λειτουργίας και το επιθυμητό ρεύμα. Αν δεν βρεθεί κάποιο PDO που να ταιριάζει απόλυτα, η συνάρτηση μπορεί να επιλέξει το προεπιλεγμένο PDO των 5V.

3. Διαχείριση και Παρακολούθηση

Αφού συμφωνηθούν οι παράμετροι, η συσκευή παροχής προσαρμόζει την έξοδο της για να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του RDO. Οι δύο συσκευές συνεχίζουν να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται την παροχή ισχύος, προσαρμόζοντας τις παραμέτρους αν χρειαστεί.



Εικόνα 10

2.4.1 Διάγραμμα Ροής

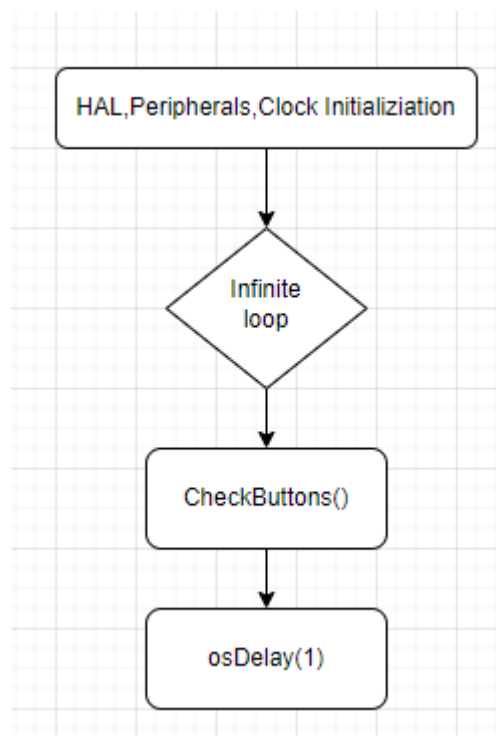
Η ανάπτυξη λογισμικού για την υποστήριξη των λειτουργιών USB Type-C σε μικροελεγκτές STM32 απαιτεί τη χρήση διαφόρων εργαλείων και βιβλιοθηκών που παρέχονται από την STMicroelectronics.

Διάγραμμα Ροής της Κύριας Λειτουργίας

Η κύρια λειτουργία (main) του αρχείου main.c περιλαμβάνει κλήσεις σε όλες τις λειτουργίες αρχικοποίησης για τη διαμόρφωση των περιφερειακών του μικροελεγκτή. Η δομή της κύριας λειτουργίας απεικονίζεται στην Εικόνα 11.

Η κύρια λειτουργία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

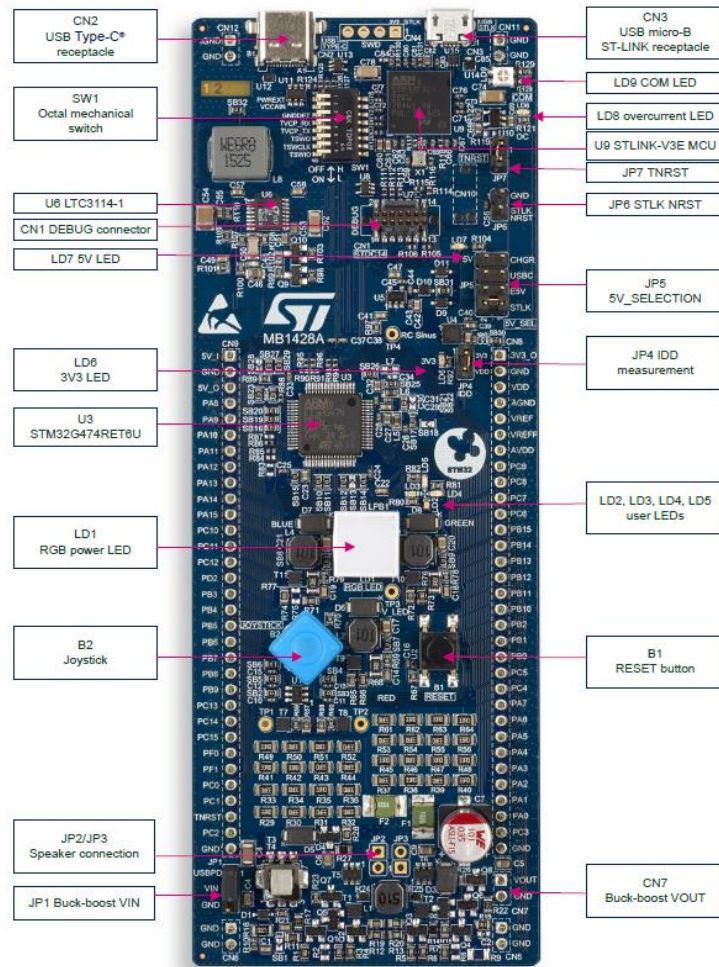
1. Αρχικοποίηση HAL, Περιφερειακών και Ρολογιού
 - Η συνάρτηση MX_ADC1_Init αρχικοποιεί το ADC1 του μικροελεγκτή, καθορίζοντας τις παραμέτρους του όπως τον ασύγχρονο διαιρέτη ρολογιού, την ανάλυση των 12 bit, τη στοίχιση δεδομένων, τον αριθμό των μετατροπών, τη λειτουργία συνεχούς μετατροπής και την ενεργοποίηση της μετατροπής μέσω λογισμικού. Επιπλέον, διαμορφώνει τη λειτουργία ανεξάρτητης πολυτροπίας και ορίζει τις παραμέτρους του καναλιού 8 για τακτική μετατροπή. Τέλος, ξεκινά τη βαθμονόμηση και την έναρξη του ADC.
 - Η συνάρτηση MX_DMA_Init ενεργοποιεί το ρολόι του ελεγκτή DMA και των διαύλων DMAMUX1 και DMA1, και ρυθμίζει τις προτεραιότητες και τις διακοπές για τα κανάλια 2, 3 και 6 του DMA1, επιτρέποντας τη χρήση του DMA για την αυτόματη μεταφορά δεδομένων χωρίς τη συνεχή παρέμβαση του CPU.
2. Βρόχος for()
 - Η κύρια λειτουργία εισέρχεται σε έναν ατέρμονα βρόχο, όπου εκτελούνται οι βασικές λειτουργίες του συστήματος.
3. Check Buttons()
 - Εάν η Check Buttons είναι αληθής, τότε ελέγγω ποιο από τα τρία κουμπιά πατήθηκε και καλώ την αντίστοιχη συνάρτηση έτσι ώστε να αλλάξω την τάση και να ανάψει το σωστό led.
4. Καθυστέρηση 1sec
 - Εισάγεται καθυστέρηση 1sec πριν την επανάληψη του ελέγχου.



Εικόνα 11

2.5 Αρχιτεκτονική του μικροελεγκτή STM32G474RE MCU

Η πλατφόρμα B-G474E-DPOW1 Discovery αποτελεί μια ψηφιακή λύση ισχύος και μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα επίδειξης και ανάπτυξης για τον μικροελεγκτή STM32G474RET6, βασισμένο στον πυρήνα Arm® Cortex®-M4 της STMicroelectronics. Αξιοποιώντας τα νέα χαρακτηριστικά του HRTimer, τα 96 Kbytes ενσωματωμένης μνήμης RAM, τις λειτουργίες μαθηματικού επιταχυντή και την υποστήριξη USB PD3.0 που προσφέρει ο STM32G474RET6, η πλατφόρμα B-G474E-DPOW1 Discovery βοηθά τους χρήστες να πρωτοτυπήσουν εφαρμογές ψηφιακής ισχύος, όπως μετατροπείς buck-boost, φωτισμό ισχύος LED RGB, ή ενισχυτές ήχου τάξης D, βασισμένες στη διεπαφή USB Type-C® 2.0 FS. Η πλατφόρμα B-G474E-DPOW1 Discovery δεν απαιτεί ξεχωριστή διεπαφή(probe),καθώς ενσωματώνει τον ενσωματωμένο αποσφαλματωτή και προγραμματιστή STLINK-V3E.

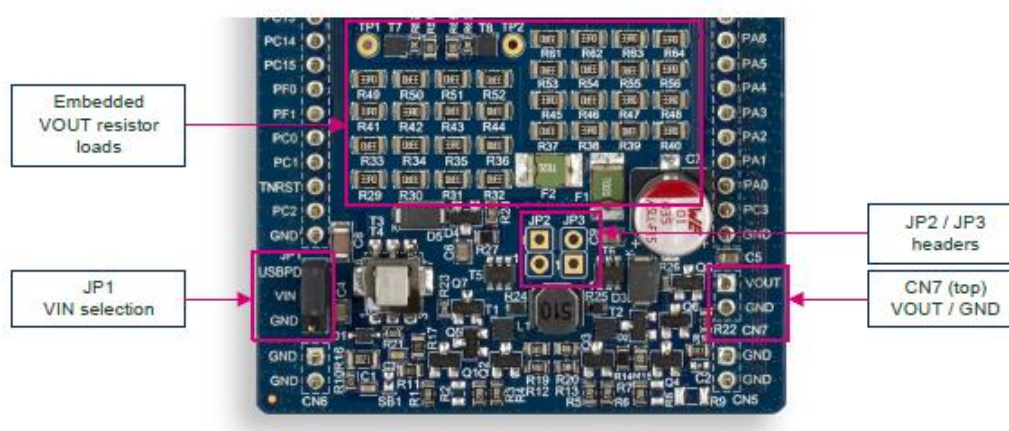


Εικόνα 12

Αυτός ο μικροελεγκτής προσφέρει ό,τι απαιτείται για να ξεκινήσουν οι χρήστες και να αναπτύξουν εφαρμογές. Τα χαρακτηριστικά υλικού της πλακέτας βοηθούν στην αξιολόγηση των εξής περιφερειακών: USB Type-C® συμβατό με USB PD3.0, αξιολόγηση HRTimer, ψηφιακή ισχύς για εφαρμογές buck-boost με ενισχυτή ήχου τάξης-D και φωτισμό ισχύος LED RGB. Χάρη στους δύο συνδεδεμένες επέκτασης 32 ακίδων με βήμα 2,54 mm, επιτρέπει επίσης στους χρήστες να το συνδέσουν σε μια πλακέτα breadboard. Ο ενσωματωμένος STLINK-V3E παρέχει έναν ενσωματωμένο αποσφαλματωτή και προγραμματιστή για τον μικροελεγκτή STM3.

2.5.1 JP1-USBPD

Ο σύνδεσμος JP1(Εικόνα 13) στη πλακέτα του μετατροπέα buck-boost είναι υπεύθυνος για την επιλογή της πηγής τάσης VIN. Προεπιλεγμένα, το JP1 επιλέγει την πηγή ισχύος από το φορτιστή USBPD_VBUS του USB Type-C CN3, επιτρέποντας την τροφοδοσία του μετατροπέα από το USBPD. Εάν ο χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει εξωτερική πηγή VIN, θα πρέπει να συνδέσει μια εξωτερική πηγή ισχύος στα σημεία VIN και GND του JP1, και να αφαιρέσει το jumper από το JP1. Η δυνατότητα επιλογής πηγής VIN μέσω του JP1 προσφέρει ευελιξία στον χρήστη για πειραματισμούς και ανάπτυξη, επιτρέποντας την εύκολη εναλλαγή μεταξύ της τροφοδοσίας από το USBPD και μιας εξωτερικής πηγής τάσης.

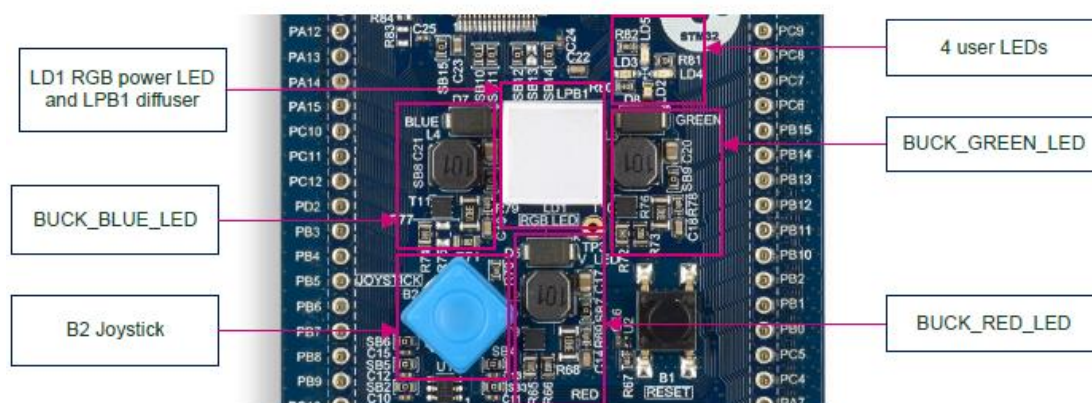


Εικόνα 13

2.5.2 B2 Joystick και 4 User LEDs

- ❖ **B2 Joystick:** Το B2 joystick στη πλακέτα του B-G474E-DPOW1 Discovery kit είναι ένα τετραθέσιο joystick με πλήκτρο επιλογής.
- ❖ **4 User LEDs:** Τα 4 user LEDs στη πλακέτα χρησιμοποιούνται ως ενδεικτικές λυχνίες κατάστασης. Αυτές οι λυχνίες μπορούν να προγραμματιστούν να υποδεικνύουν διάφορες καταστάσεις ή γεγονότα, ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Τα user LEDs παρέχουν μια οπτική ανατροφοδότηση στον χρήστη, διευκολύνοντας την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος και την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων ή αναγκών συντήρησης.

Αυτά τα δύο στοιχεία, το B2 joystick και τα 4 user LEDs, συνεισφέρουν σημαντικά στη διευκόλυνση του χρήστη κατά την ανάπτυξη και διαχείριση των εφαρμογών, προσφέροντας άμεση και ευέλικτη αλληλεπίδραση με το σύστημα και έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στη διεκπεραίωση της εργασίας.



Εικόνα 14

2.5.3 STM32CubeMonitor: Εργαλείο Παρακολούθησης και Βελτιστοποίησης Εφαρμογών STM32

Το STM32CubeMonitor αποτελεί μια οικογένεια εργαλείων που βοηθούν στην λεπτομερή ρύθμιση και διάγνωση των εφαρμογών STM32 σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την ανάγνωση και την απεικόνιση των μεταβλητών τους. Εκτός από τις εξειδικευμένες εκδόσεις (για ισχύ, RF, USB-PD), το ευέλικτο STM32CubeMonitor παρέχει έναν γραφικό επεξεργαστή ροής, επιτρέποντας την δημιουργία προσαρμοσμένων ταμπλό με απλό τρόπο, προσθέτοντας γρήγορα widgets όπως δείκτες, γραφήματα ράβδων και γραφικές παραστάσεις δεδομένων. Με μη παρεμβατική παρακολούθηση, το STM32CubeMonitor διατηρεί την πραγματική συμπεριφορά των εφαρμογών, συμπληρώνοντας άριστα τα παραδοσιακά εργαλεία αποσφαλμάτωσης για την εκτέλεση προφίλ εφαρμογών.

Βασικά Χαρακτηριστικά και Λειτουργίες

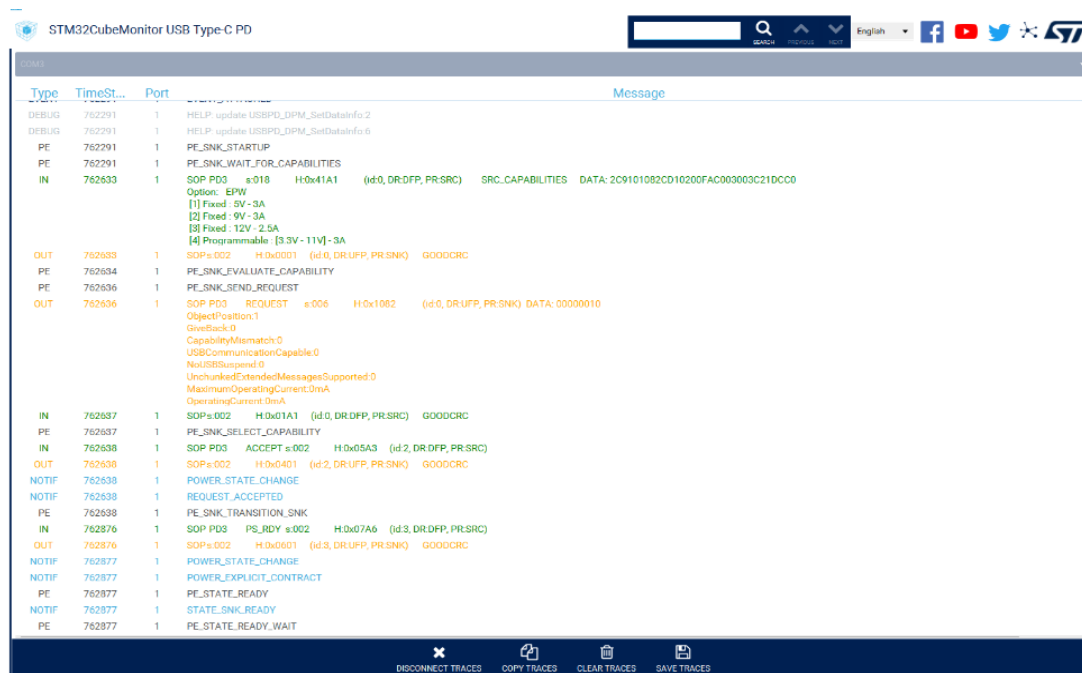
Γραφικός Επεξεργαστής Ροής: Το STM32CubeMonitor διαθέτει έναν γραφικό επεξεργαστή ροής που επιτρέπει την δημιουργία ταμπλό χωρίς την ανάγκη προγραμματισμού. Οι χρήστες μπορούν να προσθέτουν εύκολα widgets όπως δείκτες, γραφήματα ράβδων και plot για να παρακολουθούν τις μεταβλητές των εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο. Το συγκεκριμένο board δεν είναι συμβατό με αυτές τις λειτουργίες οπότε χρησιμοποιήθηκαν τα traces ως μέθοδος παρακολούθησης των αποτελεσμάτων.

Στους μικροελεγκτές, τα traces αναφέρονται στις καταγραφές των σημάτων ή των γεγονότων που παρακολουθούνται και καταγράφονται κατά τη λειτουργία του συστήματος. Αυτές οι καταγραφές βοηθούν στην ανάλυση και τον εντοπισμό σφαλμάτων, παρέχοντας πληροφορίες για την αλληλουχία των εντολών και την επικοινωνία μεταξύ των διάφορων περιφερειακών. Στην εικόνα, βλέπουμε μια σειρά από traces που αντιπροσωπεύουν διάφορα μηνύματα και γεγονότα που συμβαίνουν σε ένα σύστημα USB Power Delivery. Αυτές οι καταγραφές περιλαμβάνουν χρονικές σημάνσεις, θύρες επικοινωνίας και μηνύματα που ανταλλάσσονται, επιτρέποντας

στους μηχανικούς να αναλύσουν τη ροή δεδομένων και να διασφαλίσουν τη σωστή λειτουργία του συστήματος.

Ανάλυση και Παρακολούθηση Εφαρμογών: Το STM32CubeMonitor αναλύει τις πληροφορίες αποσφαλμάτωσης από το εκτελέσιμο αρχείο της εφαρμογής, προσφέροντας δύο τρόπους απόκτησης δεδομένων: άμεσος τρόπος απόκτησης και τρόπος στιγμιοτύπου. Παρέχει επίσης δυνατότητες ενεργοποίησης για εστίαση σε ενδιαφέρουσες συμπεριφορές της εφαρμογής.

Προσαρμοσμένη Οπτικοποίηση: Οι χρήστες μπορούν να διαμορφώσουν τα παράθυρα απεικόνισης με επιλογές όπως καμπύλες και πλαίσια, καθώς και μια μεγάλη ποικιλία widgets. Υπάρχει υποστήριξη για πολλαπλούς ανιχνευτές για την παρακολούθηση πολλαπλών στόχων ταυτόχρονα.



Εικόνα 15

Κεφάλαιο 3. Προγραμματιστική

Ανάλυση

3.1 Γενική Περιγραφή του Κώδικα

Ο κώδικας που παρουσιάζεται παρακάτω περιλαμβάνει τις λειτουργίες για την αρχικοποίηση των GPIO, την ανίχνευση και διαχείριση πατημάτων κουμπιών του joystick, καθώς και την ανάλογη ενεργοποίηση των LEDs και τη ρύθμιση των Power Delivery Object (PDO) για την αλλαγή της τάσης τροφοδοσίας μέσω του USB Power Delivery (USBPD). Οι τρεις υποστηριζόμενες τάσεις είναι 5V, 9V και 12V, και η εναλλαγή μεταξύ αυτών επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ενσωματωμένου joystick που συνδέεται με τον μικροεπεξεργαστή. Το μεσαίο κουμπί "Select" αντιστοιχεί σε τάση 5V και στο πρώτο σταθερό PDO του τροφοδοτικού και ανάβει το κόκκινο led φωτάκι, το κουμπί με το κάτω βέλος αντιστοιχεί σε τάση 9V και ανάβει το πράσινο led φωτάκι, ενώ το κουμπί με το αριστερό βέλος αντιστοιχεί σε τάση 12V και ανάβει το πορτοκαλί led φωτάκι.

3.1.1 Λειτουργία MX_GPIO_Init

Η συνάρτηση MX_GPIO_Init είναι υπεύθυνη για την αρχικοποίηση των GPIO pins που χρησιμοποιούνται για τα κουμπιά του joystick και τα LEDs. Οι αρχικοποιήσεις είναι απαραίτητες για την ορθή λειτουργία των Pins και έγιναν με την βοήθεια του STM32CubeIDE το οποίο είναι ένα interface της ST που μας δείχνει ποια pins αντιστοιχούν για κάθε component επάνω στον μικροελεγκτή μας.

3.1.2 Εξήγηση Νημάτων

Τα νήματα (threads) αποτελούν ένα θεμελιώδες στοιχείο στην ανάπτυξη πολυνηματικών εφαρμογών, επιτρέποντας την ταυτόχρονη εκτέλεση πολλαπλών εργασιών μέσα σε ένα πρόγραμμα. Στα συστήματα πραγματικού χρόνου, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στον ενσωματωμένο προγραμματισμό, η διαχείριση των νημάτων είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη αποτελεσματικότητας και ανταπόκρισης σε πραγματικό χρόνο.

Η δημιουργία νημάτων στο πλαίσιο της εφαρμογής μας υλοποιείται μέσω της συνάρτησης `osThreadCreate`, η οποία χρησιμοποιεί τους ορισμούς νημάτων για να καθορίσει τις παραμέτρους και τις προτεραιότητες των νημάτων. Ο ορισμός ενός νήματος γίνεται μέσω του μακροεντολής `osThreadDef`, το οποίο περιέχει τα εξής στοιχεία:

- Όνομα της συνάρτησης νήματος: Η συνάρτηση που θα εκτελείται από το νήμα.
- Προτεραιότητα του νήματος: Καθορίζει τη σειρά εκτέλεσης του νήματος σε σχέση με άλλα νήματα.
- Μέγεθος στοίβας: Καθορίζει το μέγεθος της μνήμης στοίβας που θα χρησιμοποιεί το νήμα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το κύριο νήμα που χρησιμοποιείται είναι το `defaultTask`, το οποίο λειτουργεί ως η βασική εργασία του συστήματος. Το `defaultTask` είναι υπεύθυνο για την αρχική εκκίνηση και τη διαχείριση των άλλων εργασιών, εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος και την κατανομή των πόρων.

Σκοπός και Διαχείριση των Άλλων Νημάτων

Εκτός από το `defaultTask`, το σύστημα μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα νήματα με εξειδικευμένους ρόλους. Κάθε νήμα έχει συγκεκριμένο σκοπό και λειτουργία, που μπορεί να περιλαμβάνει:

- Ανάγνωση αισθητήρων: Ένα νήμα είναι υπεύθυνο για τη συνεχή ανάγνωση δεδομένων από διάφορους αισθητήρες.
- Επεξεργασία δεδομένων: Άλλα νήματα επεξεργάζονται τα δεδομένα που συλλέγονται, εκτελώντας πολύπλοκους αλγόριθμους και υπολογισμούς.
- Επικοινωνία: Κάποια νήματα διαχειρίζονται την επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές ή το διαδίκτυο, εξασφαλίζοντας την ανταλλαγή δεδομένων και την αποστολή ειδοποιήσεων.

Η δημιουργία και η ορθή διαχείριση αυτών των νημάτων είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος. Η ομαλή συνεργασία μεταξύ των νημάτων εξασφαλίζει την άμεση ανταπόκριση σε εξωτερικά γεγονότα και την αποδοτική χρήση των πόρων του συστήματος.

3.1.3 Debounce Problem

Αρχικά, αντιμετωπίσα το πρόβλημα όπου το πάτημα ενός κουμπιού από το Joystick ήταν σαν να είχε πατηθεί 100 φορές. Για αυτόν τον λόγο, χρειάστηκε να χρησιμοποιήσω την ακόλουθη μέθοδο, η οποία ελέγχει πότε πατήθηκε τελευταία φορά κάποιο κουμπί. Η μεταβλητή `currentTime` αποθηκεύει την τρέχουσα χρονική στιγμή με τη χρήση της συνάρτησης `HAL_GetTick()`, η οποία επιστρέφει τον χρόνο σε χιλιοστά του δευτερολέπτου από την εκκίνηση του συστήματος. Ελέγχω αν έχει

περάσει αρκετός χρόνος από το τελευταίο πάτημα του κουμπιού. Αν η διαφορά είναι μικρότερη από την καθορισμένη καθυστέρηση `debounceDelay`, το πάτημα αγνοείται για να αποτραπεί το φαινόμενο του "debouncing". Ενημερώνεται η μεταβλητή `lastPressTime` με την τρέχουσα χρονική στιγμή `currentTime`, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον επόμενο έλεγχο `debounce`.

3.1.4 Δημιουργία σημαφόρων

Για κάθε κουμπί του joystick χρησιμοποιώ σημαφόρους για να εξασφαλίσω ότι η ακολουθία ενεργειών που πραγματοποιείται όταν το κουμπί πατιέται η κρίσιμη περιοχή θα εκτελεστεί μόνο μία φορά κάθε φορά που απαιτείται, αποτρέποντας παράλληλες εκτελέσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα ή καταστάσεις ανταγωνισμού.

3.1.5 Έλεγχος Δυνατοτήτων και Αίτημα Μεταβολής Ισχύος

❖ USBPD_DPM_SNK_EvaluateCapabilitiesPDO

Η συνάρτηση `USBPD_DPM_SNK_EvaluateCapabilitiesPDO` αναλύει τις δυνατότητες του δέκτη USB Power Delivery (USB PD). Αυτό σημαίνει ότι εξετάζει τα διαθέσιμα δεδομένα της πηγής σχετικά με την ικανότητα του να δεχτεί ισχύ από μια πηγή. Προετοιμάζει τα δεδομένα του αντικειμένου RDO (Request Data Object) που περιγράφουν τις απαιτήσεις ισχύος του δέκτη.

❖ USBPD_PE_Send_Request

Η συνάρτηση `USBPD_PE_Send_Request` χρησιμοποιείται για να στείλει ένα αίτημα μεταβολής ισχύος προς το δέκτη USB PD. Αυτό σημαίνει ότι αποστέλλει τα προετοιμασμένα δεδομένα RDO προς την πηγή, προκειμένου να επικοινωνήσει την επιθυμητή αλλαγή στην τροφοδοσία ισχύος, όπως έχει προσδιοριστεί από τον αποστολέα (source).

Με αυτόν τον τρόπο, οι δύο συναρτήσεις συνεργάζονται για να επιτρέψουν την ασφαλή και αποτελεσματική διαχείριση της μετάδοσης ισχύος μεταξύ πηγής και δέκτη μέσω του πρωτοκόλλου USB PD.

Κεφάλαιο 4. Πειραματική Αξιολόγηση

4.1 Διαδικασία για την Διπλωματική Εργασία

Η διπλωματική εργασία αφορά τη χρήση του πρωτοκόλλου USB Power Delivery (USBPD) για τη διαχείριση των ενεργειακών απαιτήσεων ενός συστήματος μέσω ενός κοινού φορτιστή τηλεφώνου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον έλεγχο των δυνατοτήτων τροφοδοσίας, τη διαχείριση επιλογών μέσω ενός joystick και την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με μετρήσεις από πολύμετρο.

Βήμα 0: Σύνδεση/Αποσύνδεση της τροφοδοσίας με τον μικροελεγκτή και έλεγχος μέσω του Monitor

Αφού συνδέσουμε τη συσκευή μας στον φορτιστή και στον υπολογιστή, επιλέγουμε την κατάλληλη θύρα από την επιλογή "Select Tracer Port", ορίζοντας το COM3. Για να επαληθεύσουμε τη σωστή επιλογή, αποσυνδέουμε το καλώδιο USB-C και αναμένουμε να δούμε το trace "Detach". Αυτή η ένδειξη επιβεβαιώνει ότι έχουμε επιλέξει την κατάλληλη θύρα. Όταν επανασυνδέσουμε το καλώδιο, θα έχουμε τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε όλες τις δυνατότητες (capabilities) που προσφέρει η συσκευή.

Βήμα 1: Χρήση USBPD και Καταγραφή Δυνατοτήτων Τροφοδοσίας

Αρχικά, χρησιμοποιούμε το σύστημα ως "sink" για τη λήψη ενέργειας από έναν κοινό φορτιστή τηλεφώνου. Συνδέουμε τη συσκευή στο φορτιστή και ελέγχουμε τα capabilities της τροφοδοσίας μέσω του STM32CubeMonitor. Οι τιμές για κάθε τάση είναι ορατές στις Power Data Objects (PDOs), οι οποίες εμφανίζουν τις διαθέσιμες τάσεις και ρεύματα που μπορεί να παρέχει ο φορτιστής. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε ότι υπάρχουν τέσσερα PDOs, εκ των οποίων τα τρία πρώτα είναι fixed(5,9,12V) και το τελευταίο να είναι Programmable από 3.3 ως 11V. Στην παρούσα εργασία ασχολήθηκα μόνο με fixed τιμές για την τροφοδοσία του μικροελεγκτή.

```
IN 762633 1 SOP_PD3 s:018 H:0x41A1 (id=0, DR:DFP, PR:SRC) SRC_CAPABILITIES DATA: 2C9101082CD10200FAC003003C21DCC0
Option: EPW
[1] Fixed : 5V - 3A
[2] Fixed : 9V - 3A
[3] Fixed : 12V - 2.5A
[4] Programmable : [3.3V - 11V] - 3A
```

Εικόνα 16

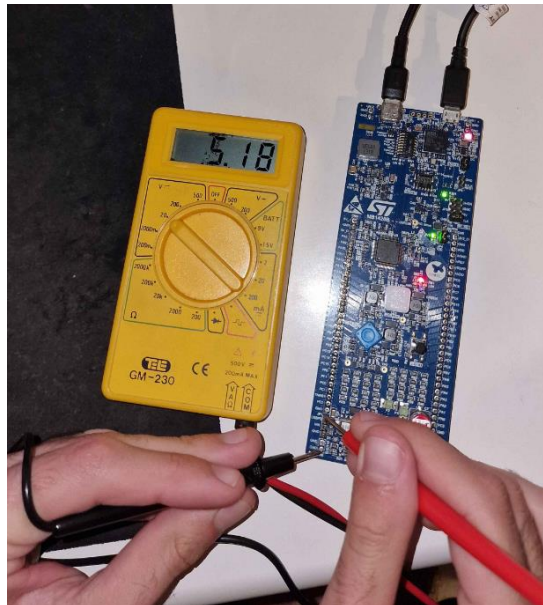
Βήμα 2: Χρήση Joystick για Επιλογή Τάσης

Από το joystick χρησιμοποιώ μόνο τρία κουμπιά: select, left arrow και down arrow. Κάθε κουμπί το έχω αντιστοιχίσει σε ένα από τα τέσσερα LEDs του χρήστη. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει ποια τάση θέλει να χρησιμοποιήσει από τις τρεις διαθέσιμες επιλογές:

- **Select Button:** Επιλογή της πρώτης τάσης 5V μέσω του select button από το joystick με user led το κόκκινο

DEBUG	203934	1	NOTIFICATION: Select Button is Pressed the Voltage is set to 5V
PE	203934	1	PE_SNK_SEND_REQUEST
OUT	203934	1	SOP PD3 REQUEST s:006 H:0x1482 (id:2, DR:UFP, PR:SNK) DATA: 00000010 ObjectPosition:1 GiveBack:0 CapabilityMismatch:0 USBCommunicationCapable:0 NoUSBSuspend:0 UnchunkedExtendedMessagesSupported:0 MaximumOperatingCurrent:0mA OperatingCurrent:0mA
IN	203935	1	SOPs:002 H:0x05A1 (id:2, DR:DFF, PR:SRC) GOODCRC
PE	203935	1	PE_SNK_SELECT_CAPABILITY
IN	203936	1	SOP PD3 ACCEPT s:002 H:0x01A3 (id:0, DR:DFF, PR:SRC)
OUT	203936	1	SOPs:002 H:0x0001 (id:0, DR:UFP, PR:SNK) GOODCRC
NOTIF	203936	1	POWER_STATE_CHANGE
NOTIF	203936	1	REQUEST_ACCEPTED
PE	203936	1	PE_SNK_TRANSITION_SNK
IN	204173	1	SOP PD3 PS_RDY s:002 H:0x03A6 (id:1, DR:DFF, PR:SRC)
OUT	204173	1	SOPs:002 H:0x0201 (id:1, DR:UFP, PR:SNK) GOODCRC
NOTIF	204173	1	POWER_STATE_CHANGE
NOTIF	204173	1	POWER_EXPLICIT_CONTRACT
PE	204173	1	PE_STATE_READY
NOTIF	204173	1	STATE_SNK_READY
PE	204173	1	PE_STATE_READY_WAIT

Εικόνα 17 Traces στο Monitor για 5V



Εικόνα 18 Επαλήθευση 5V με πολύμετρο

- **Down Arrow Button:** Επιλογή της τρίτης τάσης 9V μέσω του down arrow button από το joystick με user led το πράσινο

FL	442259	1	PE_STATE_READY_WAIT
DEBUG	442259	1	NOTIFICATION: Down Arrow Button is Pressed the Voltage is set to 9V
PE	442259	1	PE_SNK_SEND_REQUEST
OUT	442259	1	SOP PD3 REQUEST s:006 H:0x1482 (id:2, DR:UFP, PR:SNK) DATA: 01000020 ObjectPosition:2 GiveBack:0 CapabilityMismatch:0 USBCommunicationCapable:0 NoUSBSuspend:0 UnchunkedExtendedMessagesSupported:0 MaximumOperatingCurrent:10mA OperatingCurrent:0mA
IN	442260	1	SOP s:002 H:0x05A1 (id:2, DR:DFF, PR:SRC) GOODCRC
PE	442260	1	PE_SNK_SELECT_CAPABILITY
IN	442261	1	SOP PD3 ACCEPT s:002 H:0x0DA3 (id:6, DR:DFF, PR:SRC)
OUT	442261	1	SOP s:002 H:0x0C01 (id:6, DR:UFP, PR:SNK) GOODCRC
NOTIF	442261	1	POWER_STATE_CHANGE
NOTIF	442261	1	REQUEST_ACCEPTED
PE	442261	1	PE_SNK_TRANSITION_SNK
IN	442497	1	SOP PD3 PS_RDY s:002 H:0x0FA6 (id:7, DR:DFF, PR:SRC)
OUT	442497	1	SOP s:002 H:0x0E01 (id:7, DR:UFP, PR:SNK) GOODCRC
NOTIF	442498	1	POWER_STATE_CHANGE
NOTIF	442498	1	POWER_EXPLICIT_CONTRACT
PE	442498	1	PE_STATE_READY
NOTIF	442498	1	STATE_SNK_READY
PE	442498	1	PE_STATE_READY_WAIT

DISCONNECT TRACES
COPY TRACES
CLEAR TRACES
SAVE TRACES

Εικόνα 19 Traces στο Monitor για 9V



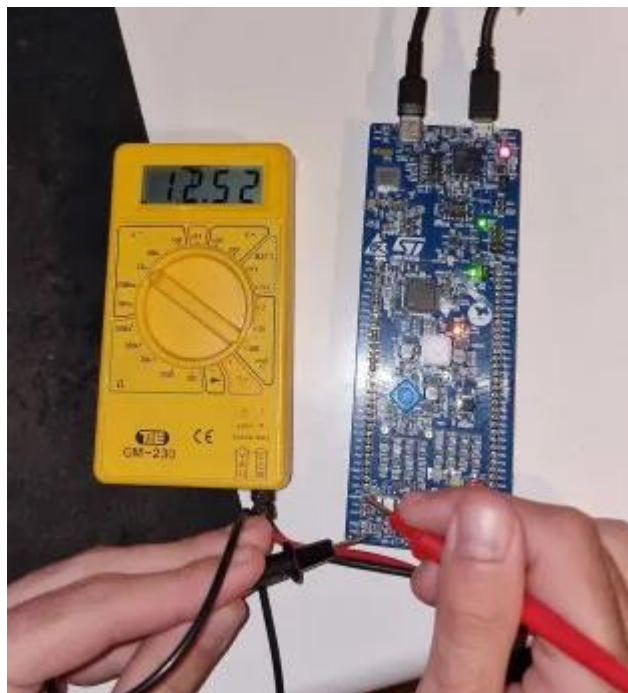
Εικόνα 20 Επαλήθευση 9V με πολύμετρο

- **Left Arrow Button:** Επιλογή της δεύτερης τάσης 12V μέσω του left arrow button από το joystick με user led το πορτοκαλί

DEBUG	558501	1	NOTIFICATION: Left Arrow Button is Pressed the Voltage is set to 12V
PE	558501	1	PE_SNK_SEND_REQUEST
OUT	558501	1	SOP_PD3 REQUEST s:006 H:0x1482 (id:2, DR:UFP, PR:SNK) DATA: 02000030 ObjectPosition:3 GiveBack:0 CapabilityMismatch:0 USBCommunicationCapable:0 NoUSBSuspend:0 UnchunkedExtendedMessagesSupported:0 MaximumOperatingCurrent:20mA OperatingCurrent:0mA
IN	558502	1	SOP_s:002 H:0x05A1 (id:2, DR:DFP, PR:SRC) GOODCRC
PE	558502	1	PE_SNK_SELECT_CAPABILITY
IN	558503	1	SOP_PD3 ACCEPT s:002 H:0x0DA3 (id:6, DR:DFP, PR:SRC)
OUT	558503	1	SOP_s:002 H:0x0C01 (id:6, DR:UFP, PR:SNK) GOODCRC
NOTIF	558503	1	POWER_STATE_CHANGE
NOTIF	558503	1	REQUEST_ACCEPTED
PE	558503	1	PE_SNK_TRANSITION_SNK
IN	558740	1	SOP_PD3 PS_RDY s:002 H:0x0FA6 (id:7, DR:DFP, PR:SRC)
OUT	558740	1	SOP_s:002 H:0x0E01 (id:7, DR:UFP, PR:SNK) GOODCRC
NOTIF	558740	1	POWER_STATE_CHANGE
NOTIF	558740	1	POWER_EXPLICIT_CONTRACT
PE	558740	1	PE_STATE_READY
NOTIF	558740	1	STATE_SNK_READY
PE	558740	1	PE_STATE_READY_WAIT

DISCONNECT TRACES
COPY TRACES
CLEAR TRACES
SAVE TRACES

Εικόνα 21 Traces στο Monitor για 12V



Εικόνα 22 Επαλήθευση 12V με πολύμετρο

Βήμα 3: Επιβεβαίωση Επιλογής Τάσης

Αφού ο χρήστης επιλέξει την επιθυμητή τάση μέσω του joystick, επιβεβαιώνουμε την επιλογή παρακολουθώντας τα traces στο STM32CubeMonitor. Το εργαλείο αυτό δείχνει τις αλλαγές στις τάσεις σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την επαλήθευση ότι η σωστή τάση έχει επιλεγεί και εφαρμόζεται στο σύστημα.

Επιπλέον, χρησιμοποιούμε ένα πολύμετρο για να μετρήσουμε την τάση στο σημείο USBPD που βρίσκεται στο JP1. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζουμε ότι η τάση που έχει επιλεγεί είναι ακριβής και ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Βήμα 4: Αλλαγή Τάσης από τον Χρήστη

Ο χρήστης μπορεί να συνεχίσει να αλλάζει την επιλεγμένη τάση χρησιμοποιώντας το joystick, χωρίς να επηρεάζεται η λειτουργικότητα της πλακέτας. Κάθε νέα επιλογή τάσης επαληθεύεται μέσω του STM32CubeMonitor και του πολύμετρου, διασφαλίζοντας ότι το σύστημα παραμένει σταθερό και λειτουργικό.

4.2 Ανάλυση και Επεξήγηση Traces για USB Power Delivery

Σε αυτό το τμήμα, θα αναλύσουμε την αλληλουχία των traces που παράγονται κατά τη διαδικασία επικοινωνίας μέσω USB Power Delivery (USB PD). Η παρακάτω ανάλυση περιλαμβάνει τα βήματα και τις ενέργειες που λαμβάνουν χώρα όταν η συσκευή Sink ζητά την αλλαγή τάσης από τη συσκευή Source.

4.2.1 Μηνύματα των Traces

Η πρώτη εγγραφή είναι ένα μήνυμα ειδοποίησης που ενημερώνει ότι το αριστερό κουμπί πατήθηκε και η τάση έχει ρυθμιστεί στα 5/9/12V αντίστοιχα. Αυτό το μήνυμα είναι υπαρκτό εκεί για σκοπούς debugging και επιβεβαιώνει ότι η ενέργεια του χρήστη (πάτημα κουμπιού) έχει καταγραφεί σωστά.

Η συσκευή Sink στέλνει ένα αίτημα προς τη συσκευή Source για αλλαγή της τάσης. Το αίτημα περιλαμβάνει τα παρακάτω δεδομένα:

PDO (Power Data Object): Ποιο από τα τρία διαθέσιμα pdo επιλέγεται
RDO (Request Data Object):

- ❖ ObjectPosition= Η θέση του rdo στα capabilities του φορτιστή
- ❖ Άλλες παραμέτρους όπως CapabilityMismatch, OperatingCurrent, MaximumOperatingCurrent οι οποίες αρχικοποιούνται αυτόματα από την επιλογή της τάσης

Η συσκευή Sink στην περίπτωση μας ο μικροελεγκτής επιλέγει τη δυνατότητα παροχής ενέργειας της συσκευής Source.

Η συσκευή Source αποδέχεται το αίτημα για αλλαγή τάσης από τη συσκευή Sink δηλαδή ο φορτιστής αποδέχεται το αίτημα από τον μικροελεγκτή.

Η συσκευή Sink στέλνει ένα μήνυμα GoodCRC (καλή κυκλική αναδρομή ελέγχου) για να επιβεβαιώσει ότι έλαβε το αποδεκτό αίτημα.

Ειδοποίηση αλλαγής κατάστασης τροφοδοσίας (POWER_STATE_CHANGE). Αυτό το μήνυμα ενημερώνει ότι η κατάσταση τροφοδοσίας έχει αλλάξει.

Ειδοποίηση ότι το αίτημα αλλαγής τάσης έγινε αποδεκτό (REQUEST_ACCEPTED).

Η συσκευή Sink μεταβαίνει στην νέα κατάσταση τροφοδοσίας. Αυτό είναι το στάδιο της πραγματικής αλλαγής τάσης.

Η συσκευή Source στέλνει μήνυμα PS_RDY (Power Supply Ready) για να ενημερώσει ότι είναι έτοιμη να παρέχει την επιθυμητή τάση.

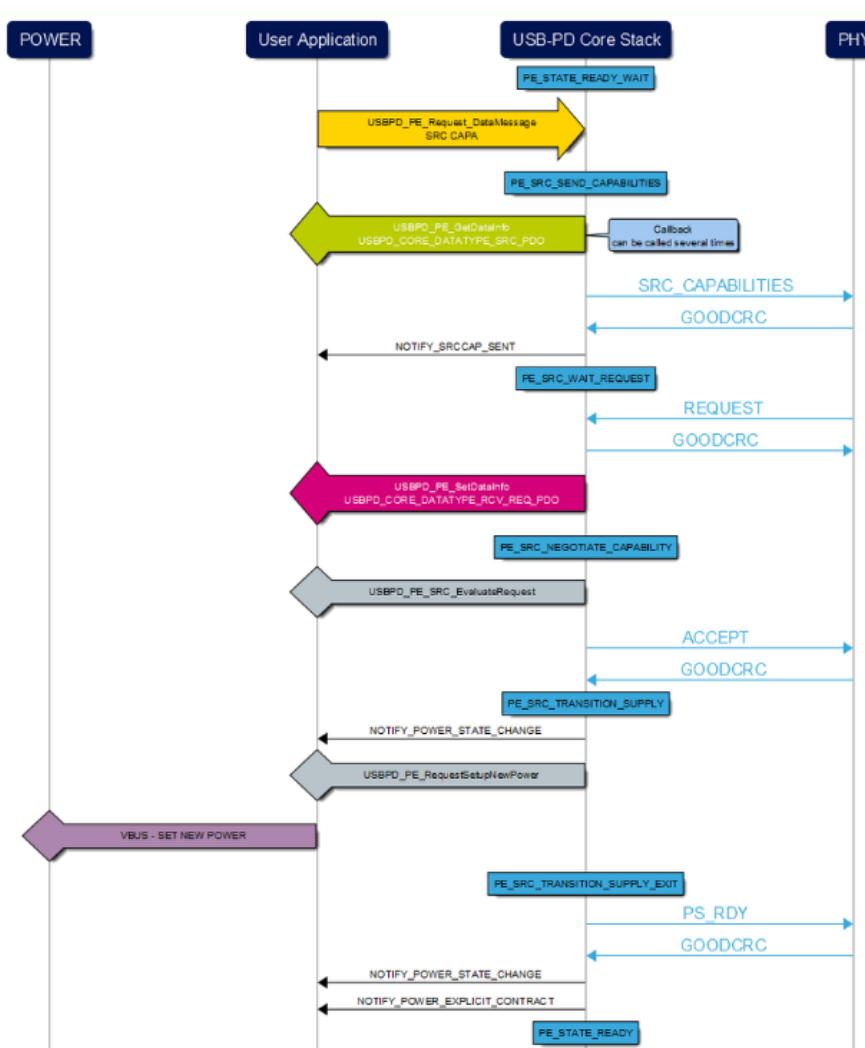
Η συσκευή Sink στέλνει μήνυμα GoodCRC για να επιβεβαιώσει ότι έλαβε το μήνυμα PS_RDY.

Ειδοποίηση αλλαγής κατάστασης τροφοδοσίας (POWER_STATE_CHANGE). Αυτό το μήνυμα ενημερώνει ότι η κατάσταση τροφοδοσίας έχει αλλάξει.

Στέλνεται μήνυμα POWER_EXPLICIT_CONTRACT, ενημερώνοντας ότι έχει επιτευχθεί συγκεκριμένη σύμβαση ισχύος.

Η συσκευή Sink είναι σε κατάσταση έτοιμο (PE_STATE_READY), έτοιμη για λειτουργία στη νέα τάση.

Η συσκευή αναμένει σε κατάσταση έτοιμο (PE_STATE_READY_WAIT).



Εικόνα 23

4.2.2 Συμπέρασμα

Η αλληλουχία traces δείχνει τη διαδικασία όπου η συσκευή Sink ζητά αλλαγή τάσης από τη συσκευή Source. Το αίτημα γίνεται αποδεκτό και η τάση ρυθμίζεται στην επιθυμητή τιμή. Η επικοινωνία περιλαμβάνει μηνύματα αποδοχής, επιβεβαίωσης και αλλαγής κατάστασης, διασφαλίζοντας τη σωστή μετάβαση και λειτουργία της νέας τάσης.

Αυτή η ανάλυση βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το πρωτόκολλο USB PD για την ασφαλή και αποτελεσματική διαχείριση της μετάδοσης ισχύος μεταξύ πηγής και δέκτη.

4.3 Φαινόμενο Υπέρβασης Τάσης σε Συστήματα USB Power Delivery

Η υπέρβαση της τάσης που παρατηρείται στο πολύμετρο μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες στο σύστημα USB Power Delivery (USB PD). Παρακάτω αναλύονται μερικές πιθανές αιτίες για αυτό το φαινόμενο:

Ανοχή Τάσης του Τροφοδοτικού

Τα τροφοδοτικά USB PD έχουν συνήθως μια ανοχή στην έξοδο της τάσης, που σημαίνει ότι η τάση που παρέχουν μπορεί να κυμαίνεται ελαφρώς πάνω ή κάτω από την ονομαστική τιμή. Για παράδειγμα, ένα τροφοδοτικό που έχει οριστεί να παρέχει 5V μπορεί να έχει μια ανοχή $\pm 5\%$, με αποτέλεσμα η πραγματική τάση να κυμαίνεται μεταξύ 4.75V και 5.25V.

Απόκριση Συστήματος Ρύθμισης Τάσης

Τα συστήματα USB PD περιλαμβάνουν ελεγκτές ρύθμισης τάσης που πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των συνδεδεμένων συσκευών. Η απόκριση αυτών των ελεγκτών δεν είναι πάντα ακαριαία και μπορεί να προκαλέσει μικρές υπερβάσεις ή πτώσεις τάσης καθώς προσπαθούν να σταθεροποιήσουν την τάση στην επιθυμητή τιμή.

Απώλειες και Παρεμβολές στη Γραμμή Τροφοδοσίας

Οι απώλειες και οι παρεμβολές στη γραμμή τροφοδοσίας μπορούν επίσης να επηρεάσουν την τάση. Η αντίσταση και οι αυτεπαγωγές των καλωδίων μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην τάση, ιδιαίτερα όταν το ρεύμα αλλάζει ξαφνικά.

Επιδράσεις Φορτίου

Το φορτίο που συνδέεται στο τροφοδοτικό μπορεί να επηρεάσει την τάση. Εάν το φορτίο παρουσιάζει απότομες μεταβολές στην κατανάλωση ρεύματος, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε στιγμιαίες υπερβάσεις της τάσης καθώς το σύστημα προσπαθεί να προσαρμοστεί.

Ποιότητα Τροφοδοτικού

Η ποιότητα του τροφοδοτικού USB PD μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της παρεχόμενης τάσης. Φτηνά ή χαμηλής ποιότητας τροφοδοτικά μπορεί να μην έχουν επαρκή ρύθμιση και σταθεροποίηση τάσης, οδηγώντας σε μεγαλύτερες αποκλίσεις από την επιθυμητή τιμή.

Επίδραση Πολύμετρου

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το ίδιο το πολύμετρο μπορεί να έχει μια μικρή απόκλιση ή ανοχή στην ακρίβεια μέτρησης της τάσης, η οποία μπορεί να συμβάλει στην παρατηρούμενη υπέρβαση.

Συμπέρασμα

Η παρατηρούμενη υπέρβαση τάσης στο πολύμετρο όταν ζητείται μια συγκεκριμένη τάση μέσω USB PD μπορεί να οφείλεται σε ανοχή του τροφοδοτικού, απόκριση των συστημάτων ρύθμισης τάσης, απώλειες και παρεμβολές στη γραμμή τροφοδοσίας, επιδράσεις του φορτίου, ποιότητα του τροφοδοτικού και ακρίβεια του ίδιου του πολύμετρου. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, μπορεί να απαιτείται η χρήση υψηλής ποιότητας τροφοδοτικών και καλωδίων, καθώς και η διασφάλιση ότι τα συστήματα ρύθμισης τάσης είναι σωστά ρυθμισμένα και λειτουργούν εντός των προδιαγραφών τους.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα και μελλοντική δουλειά

5.1 Υλοποίηση και Επαλήθευση της Λειτουργικότητας

Η διαδικασία της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνει την ανάπτυξη και τροποποίηση ενός demo προγράμματος, το οποίο σταδιακά τροποποιήθηκε ώστε να εισαχθούν οι επιθυμητές λειτουργίες. Οι γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν είναι η C και το IDE Visual Studio Code με τη βοήθεια του Platform.io, το οποίο συνδέει τον μικροελεγκτή με το πρόγραμμα. Για την παρακολούθηση των traces χρησιμοποιήθηκε το STM32CubeMonitor.

Αρχικά, το demo πρόγραμμα τροποποιήθηκε ώστε να λειτουργούν τα LEDs με τη χρήση κουμπιών, χρησιμοποιώντας σημαφόρους για την αποφυγή αλληλεπιδράσεων και προβλημάτων συγχρονισμού. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η λειτουργία για την αναγνώριση των capabilities της πηγής ενέργειας, δηλαδή του φορτιστή, και στη συνέχεια υλοποιήθηκε η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής τάσης μέσω ενός request.

Η διαδικασία της επιλογής και αλλαγής τάσης από τον χρήστη είναι συνεχής και επαληθεύεται κάθε φορά μέσω του STM32CubeMonitor και του πολύμετρου, διασφαλίζοντας την σταθερότητα και λειτουργικότητα του συστήματος. Η υλοποίηση αυτών των βημάτων επιβεβαιώνει την ικανότητα του συστήματος να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις ενεργειακές του ανάγκες μέσω του πρωτοκόλλου USB Power Delivery.

5.2 Επιπλέον Λειτουργίες

Για να μεγιστοποιήσουμε τη χρηστικότητα και την απόδοση του προγράμματος μας, μπορούμε να προσθέσουμε διάφορες επιπλέον λειτουργίες. Μία από αυτές είναι η χρήση του Programmable APDO (Adjustable Power Delivery Object). Παρακάτω περιγράφονται οι λεπτομέρειες και τα πλεονεκτήματα αυτής της λειτουργίας.

5.2.1 Χρήση του Programmable APDO

Το Programmable APDO είναι μια δυνατότητα του προτύπου USB Power Delivery 3.0 που επιτρέπει τη ρύθμιση της παρεχόμενης τάσης και ρεύματος σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή έλεγχο της ισχύος, όπως συσκευές γρήγορης φόρτισης, φορητές μπαταρίες, και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές με ειδικές απαιτήσεις ισχύος. Ακολουθούν τα βασικά βήματα για την ενσωμάτωση και χρήση του Programmable APDO στο πρόγραμμά μας:

1. Αρχικοποίηση του Programmable APDO:
 - Επεκτείνουμε τις υπάρχουσες ρυθμίσεις του προγράμματος για να υποστηρίξουμε τις παραμέτρους του APDO.
 - Ρυθμίζουμε τις κατάλληλες τιμές τάσης και ρεύματος που επιτρέπει ο φορτιστής ή πηγή τάσης.
2. Ανατροφοδότηση και Παρακολούθηση:
 - Ενσωμάτωση συστήματος ανατροφοδότησης για την παρακολούθηση των τιμών τάσης και ρεύματος.
 - Καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων για βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ασφάλειας της συσκευής.

Πλεονεκτήματα της Χρήσης Programmable APDO

- **Αυξημένη Αποδοτικότητα:** Επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της παρεχόμενης ισχύος, μειώνοντας την ενεργειακή σπατάλη.
- **Ευελιξία:** Δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης και του ρεύματος σύμφωνα με τις ανάγκες της συσκευής, καθιστώντας τη λύση πιο ευέλικτη για διάφορες εφαρμογές.
- **Ασφάλεια:** Διασφαλίζει ότι η συσκευή λειτουργεί εντός των ασφαλών ορίων της, αποτρέποντας υπερφόρτωση ή άλλες βλάβες.
- **Ταχύτητα Φόρτισης:** Μπορεί να βελτιώσει τον χρόνο φόρτισης της συσκευής, ειδικά σε περιπτώσεις που υποστηρίζεται γρήγορη φόρτιση.

5.2.2 Χρήση Ακριβέστερης Πηγής/Ακριβέστερου Μετρητή

Η ακρίβεια στην παρακολούθηση της τάσης είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας και της ασφάλειας των συσκευών. Η χρήση ενός παλμογράφου ή ενός ακριβέστερου πολύμετρου μπορεί να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα:

1. Ακριβέστερες Μετρήσεις:

- Η χρήση παλμογράφου επιτρέπει την παρακολούθηση των μεταβολών της τάσης με μεγάλη ακρίβεια και σε πραγματικό χρόνο, κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό με τα απλά πολύμετρα.
- Οι παλμογράφοι μπορούν να καταγράψουν τις διακυμάνσεις της τάσης και να αναλύσουν τα σήματα σε βάθος.

2. Ανίχνευση Σφαλμάτων:

- Οι ακριβείς μετρήσεις βοηθούν στον εντοπισμό σφαλμάτων ή ανωμαλιών στην παροχή ισχύος που θα μπορούσαν να προκαλέσουν βλάβες στη συσκευή.
- Η παρακολούθηση των σημάτων μπορεί να αποκαλύψει παροδικά φαινόμενα ή ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

3. Βελτιστοποίηση Λειτουργίας:

- Η ακριβής παρακολούθηση της τάσης επιτρέπει την καλύτερη ρύθμιση των παραμέτρων ισχύος, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση και αποδοτικότητα.
- Οι μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο διευκολύνουν την δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων ισχύος, σύμφωνα με τις ανάγκες της συσκευής.

4. Διασφάλιση Ασφάλειας:

- Με τις ακριβείς μετρήσεις, μπορούμε να διασφαλίσουμε ότι η συσκευή λειτουργεί εντός των ασφαλών ορίων της, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση και τις υπερτάσεις.

5.3 Τι έμαθα από τη Διπλωματική Εργασία

Μέσα από αυτή τη διαδικασία, απέκτησα βαθιά γνώση για το πρωτόκολλο USB Power Delivery και την εφαρμογή του στη διαχείριση ενέργειας συστημάτων. Έμαθα να χρησιμοποιώ εργαλεία όπως το STM32CubeMonitor για την παρακολούθηση και επαλήθευση των ενεργειακών παραμέτρων. Η ανάπτυξη και τροποποίηση του προγράμματος με χρήση της C και του Platform.io μου έδωσε πρακτική εμπειρία στην προγραμματιστική διαχείριση μικροελεγκτών και στην υλοποίηση σύγχρονων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας.

Επιπλέον, αυτή η εργασία αποτέλεσε μια εξαιρετική εισαγωγή στον χώρο των embedded συστημάτων. Ασχολήθηκα με τον προγραμματισμό μικροελεγκτών και την ενσωμάτωση υλικού και λογισμικού, αποκτώντας πολύτιμη εμπειρία σε αυτόν τον τομέα. Έμαθα να αντιμετωπίζω προκλήσεις και να εφαρμόζω τεχνικές επίλυσης προβλημάτων που είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη και την αξιοπιστία των embedded εφαρμογών. Συνολικά, η διπλωματική εργασία ενίσχυσε τις δεξιότητές μου στην τεχνολογία και την καινοτομία, προετοιμάζοντάς με καλύτερα για μελλοντικές επαγγελματικές προκλήσεις στον τομέα της μηχανικής και των τεχνολογιών πληροφορικής.

Βιβλιογραφία

- [STW1] "STM32StepByStep: Getting started with USB-Power Delivery Sink."
STMicroelectronics Wiki. Available at:
https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32StepByStep:Getting_started_with_USB-Power_Delivery_Sink
- [STW2] "Introduction to USB Power Delivery with STM32." STMicroelectronics Wiki. Available at:
https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Introduction_to_USB_Power_Delivery_with_STM32
- [STG] "STM32G474RE." STMicroelectronics. Available at:
<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32g474re.html>
- [ROH1] "USB Power Delivery (USBPD)." ROHM Semiconductor Support. Available at: <https://www.rohm.com/support/usbpd>
- [USB] "USB Charger and Power Delivery." USB Implementers Forum. Available at: <https://www.usb.org/usb-charger-pd>
- [ROH2] "Advantages of USB Power Delivery." ROHM Electronics Basics. Available at:
<https://www.rohm.com/electronics-basics/usbpd/advantage-of-usbpd>
- [ADC] "STM32 ADC Tutorial – Complete Guide with Examples." DeepBlue Embedded. Available at:
<https://deepbluembedded.com/stm32-adc-tutorial-complete-guide-with-examples/>

- [STW3] " Introduction to USB Power Delivery with STM32."STMicroelectronics Wiki. Available at:
[https://wiki.st.com/stm32mcu/index.php?title=Introduction to USB Power Delivery with STM32&sfr=stm32mcu](https://wiki.st.com/stm32mcu/index.php?title=Introduction_to_USB_Power_Delivery_with_STM32&sfr=stm32mcu)
- [AN5225] " Introduction to USB Type-C® Power Delivery for STM32 MCUs and MPUs."STMicroelectronics Wiki. Available at:
https://www.st.com/resource/en/application_note/an5225-introduction-to-usb-typec-power-delivery-for-stm32-mcus-and-mpus-stmicroelectronics.pdf
- [TA0357] " Introduction to USB Type-C® Power Delivery for STM32 MCUs and MPUs."STMicroelectronics Wiki. Available at:
https://www.st.com/resource/en/technical_article/ta0357-overview-of-usb-typec-and-power-delivery-technologies-stmicroelectronics.pdf
- [STMON] " Monitoring tool to test STM32 applications at run-time." STMicroelectronics. Available at: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemonitor.html>
- [STTR] " Traces ST diagram." STMicroelectronics. Available at:
<https://community.st.com/t5/interface-and-connectivity-ics/can-i-initiate-a-usb-c-pps-pdo-change-from-a-source-without-an/td-p/222799>
- [AN5156] " Introduction to security for STM32 MCUs." STMicroelectronics. Available at: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5156-introduction-to-security-for-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf