

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έλεγχος ηλεκτρομηχανικών διατάξεων με το σύστημα Raspberry Pi

Κωνσταντόπουλος Νικόλαος

Σαγώνας Ελευθέριος

Εισηγητής: Ευσταθίου Κωνσταντίνος

Αττική 2020

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Κωνσταντόπουλος Νικόλαος, του Σπυρίδωνα, με αριθμό μητρώου 44978 και Σαγώνας Ελευθέριος, του Αποστόλου με αριθμό μητρώου 44965, φοιτητές του τμήματος Μηχανικών πληροφορικής και υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής πριν αναλάβουμε την εκπόνηση της Πτυχιακής εργασίας μας, δηλώνουμε ότι ενημερωθήκαμε για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο των συγγραφέων, όσο και του ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι του κειμένου να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικοί υπεύθυνοι είναι οι συγγραφείς της Π.Ε., οι οποίοι φέρουν και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών των συγγραφέων, σε περίπτωση που το ίδρυμα τους έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του τμήματος με νέα απόφασή της, μετά από αίτηση των ενδιαφερόμενων, τους αναθέτει εκ νέου εκπόνηση της Π.Ε με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσής της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα «Έλεγχος ηλεκτρομηχανικών διατάξεων με το σύστημα Raspberry Pi» πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας του τμήματος Μηχανικών πληροφορικής και υπολογιστών του ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ το έτος 2020. Είναι αποτέλεσμα μιας μεγάλης προσπάθειας που καταβλήθηκε από εμάς αλλά και από τον καθηγητή της διπλωματικής μας εργασίας, κύριο Ευσταθίου Κωνσταντίνο.

Στο σημείο αυτό αισθανόμαστε την ανάγκη να εκφράσουμε τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μας στον άνθρωπο αυτό που μας προσέφερε την βοήθειά του με τις πολύτιμες γνώσεις του πάνω στον συγκεκριμένο τομέα που εξειδικεύεται καθώς και τις συμβουλές του για την αντιμετώπιση της καινούργιας αυτής κατάστασης για εμάς.

Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας για όλη αυτή τη στήριξη τα χρόνια των σπουδών μας καθώς χωρίς αυτή τίποτα από όσα έχουμε πετύχει μέχρι σήμερα δεν θα ήταν εφικτό.

Κωνσταντόπουλος Νικόλαος
Σαγώνας Ελευθέριος
Αττική 2020

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση συστημάτων ελέγχου κινητήρων συνεχούς τάσης με χρήση του μικροϋπολογιστικού συστήματος Raspberry Pi.

Η εργασία θα περιλαμβάνει μια περιγραφή του συστήματος Raspberry Pi και του συστήματος διασύνδεσης GPIO. Θα γίνει παρουσίαση της εγκατάστασης και των βασικών εντολών του λειτουργικού συστήματος raspbian καθώς θα περιλαμβάνει και μια σύντομη περιγραφή της γλώσσας python όπως και βασικά πειράματα εισόδου, εξόδου στο σύστημα Raspberry Pi. Τέλος θα περιλαμβάνεται η διασύνδεση στο Raspberry Pi, κινητήρα συνεχούς τάσης καθώς και βηματικού κινητήρα.

Abstract

The purpose of the present work is to implement DC motor control systems using the Raspberry Pi microcomputer system.

The task will include a description of the Raspberry Pi system and the GPIO interface. The installation and basic commands of the rasbian operating system will be presented as well as basic input, output experiments on the Raspberry Pi system. Finally, the interface will be included in the Raspberry Pi, a dc motor as well as a stepper motor.

Πίνακας περιεχομένων

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΩΝ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract	4
Πίνακας Εικόνων.....	7
Πίνακας Σχημάτων.....	9
Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	10
Τί είναι το Raspberry Pi	10
Ιστορική αναδρομή.....	10
Τι κάνουμε με το Raspberry Pi.....	11
Κεφάλαιο 2: Γλώσσα Python.....	13
Πληροφορίες γλώσσας	13
Κεφάλαιο 3: Μοντέλα Rarpberry	14
3.1 Raspberry Pi Model B	14
3.2 Raspberry Pi Model A	16
3.3 Raspberry Pi Compute Module	18
3.4 Raspberry Pi Model B+.....	19
3.5 Raspberry Pi Model A+.....	21
3.6 Raspberry Pi Model Zero	23
3.7 Raspberry Pi 3 Model B	25
3.8 Raspberry Pi Model Zero W.....	27
3.9 Raspberry Pi Zero WH.....	29
3.10 Raspberry Pi 3 Model B+	31
3.11 Raspberry Pi 4 Model B	33
Κεφάλαιο 4: Επεξεργαστές ARM.....	36
Ιστορική Αναδρομή.....	36
Γενικά.....	36
Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή της ARM.....	36
GPIO (General Purpose Input Output)	37
Γενικά.....	37
Κεφάλαιο 5: Λογισμικό Raspbian.....	39
Οδηγίες εγκατάστασης λογισμικού Raspbian	39
BalenaEtcher	41
VNC	41

Ενεργοποίηση του διακομιστή VNC γραφικά	41
Αρχική οθόνη Raspbian μετά την εγκατάσταση	43
Εντολές γενικού σκοπού του Raspbian	44
Κεφάλαιο 6: Τρανζίστορ.....	45
Διπολικά τρανζίστορ	45
NPN transistor 2N2222	47
Τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (JFET).....	49
Darlington Transistor	50
Πανομοιότυπα Darlington Transistor.....	52
Εφαρμογές Darlington Transistor.....	52
Darlington Transistor IC's.....	53
MOS Transistor	54
MOSFET	62
Επιλογή τρανζίστορ Darlington για κινητήρα DC	64
Φωτοαντίσταση	65
Κεφάλαιο 7: Ηλεκτροκινητήρες.....	66
Βηματικοί Κινητήρες.....	69
Κινητήρες Συνεχούς τάσης.....	74
Διαμόρφωση πλάτους παλμού για τον έλεγχο DC Motor	75
Έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μέσω RPi.....	76
Κεφάλαιο 8: Πειράματα Εργασίας.....	77
1 ^ο Πείραμα με LED.....	77
Κώδικας πειράματος.....	78
2 ^ο Πείραμα με LED	80
Κώδικας πειράματος.....	81
Πείραμα DC Motor	83
Λίστα εξαρτημάτων του πειράματος.....	83
Κώδικας πειράματος.....	86
Πείραμα για DC Motor σε συνδυασμό με Pulse Width Modulation.....	88
Κώδικας πειράματος.....	90
Πείραμα για DC Motor σε συνδυασμό με Pulse Width Modulation 2.....	93
Κώδικας πειράματος.....	94
Πείραμα Stepper Motor.....	96
Κώδικας πειράματος.....	97
Δικτυογραφία.....	99
Βιβλιογραφία.....	101

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Raspberry Pi Model B.....	14
Εικόνα 2: Raspberry Pi Model A	16
Εικόνα 3: Raspberry Pi Compute Module.....	18
Εικόνα 4: Raspberry Pi Model B+	19
Εικόνα 5: Raspberry Pi Model A+	21
Εικόνα 6: Raspberry Pi Model Zero.....	23
Εικόνα 7: Raspberry Pi 3 Model B.....	25
Εικόνα 8: Raspberry Pi ZeroW	27
Εικόνα 9: Raspberry Pi Zero WH	29
Εικόνα 10: Raspberry Pi 3 Model B+	31
Εικόνα 11: Raspberry Pi 4 Model B.....	33
Εικόνα 12: GPIO pins	38
Εικόνα 13: GPIO pins	38
Εικόνα 14: Περιβάλλον ιστοσελίδας Raspberry Pi.....	40
Εικόνα 15: Περιβάλλον Win32 Disk Imager	40
Εικόνα 16: Περιβάλλον επιφάνειας εργασίας Raspberry και ρυθμίσεις VNC.....	42
Εικόνα 17: Αρχική οθόνη Raspbian.....	43
Εικόνα 18: Περιβάλλον SD Card Formatter	43
Εικόνα 19: Τρανζίστορ 2N2222A.....	48
Εικόνα 20: Mosfet αραίωσης	62
Εικόνα 21: Mosfet πύκνωσης.....	63
Εικόνα 22: Φωτοαντίσταση.....	65
Εικόνα 23: Ηλεκτρικός κινητήρας (Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα).....	67
Εικόνα 24: Βηματικός κινητήρας.....	69
Εικόνα 25: Λειτουργική αναπαράσταση βηματικού κινητήρα	71
Εικόνα 26: Κύκλωμα μίας φάσης του βηματικού κινητήρα	72
Εικόνα 27: Κινητήρας συνεχούς τάσης.....	74
Εικόνα 28: Πρώτο πείραμα με LED.....	77
Εικόνα 29: Terminal πρώτου πειράματος	78
Εικόνα 30: Κώδικας πρώτου πειράματος.....	79
Εικόνα 31: Αποτέλεσμα πρώτου πειράματος.....	79

Εικόνα 32: Δεύτερο πείραμα με LED	80
Εικόνα 33: Terminal δεύτερου πειράματος.....	81
Εικόνα 34: Κώδικας δεύτερου πειράματος	82
Εικόνα 35: Αποτέλεσμα δεύτερου πειράματος	82
Εικόνα 36: Κύκλωμα πειράματος DC Motor	84
Εικόνα 37: Το σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος για τον ελεγκτή κινητήρα DC ανίχνευσης αντικειμένων	84
Εικόνα 38: Φωτογραφία κυκλώματος DC Motor φτιαγμένο από εμάς	85
Εικόνα 39: Terminal πειράματος DC Motor	87
Εικόνα 40: Κώδικας πειράματος DC Motor	87
Εικόνα 41: Μετασχηματιστής πρίζας με θύρα USB	88
Εικόνα 42: Φωτογραφία κυκλώματος DC Motor μαζί με τη χρήση του μετασχηματιστή πρίζας	89
Εικόνα 43: Terminal πειράματος DC Motor με PWM.....	91
Εικόνα 44: Κώδικας κυκλώματος DC Motor με PWM	91
Εικόνα 45: Λειτουργία PWM (Pulse Width Modulation).....	92
Εικόνα 46: Φωτογραφία κυκλώματος DC Motor μαζί με τη χρήση του μετασχηματιστή πρίζας	93
Εικόνα 47: Κώδικας κυκλώματος DC Motor με PWM	95
Εικόνα 48: Φωτογραφία κυκλώματος STEPPER Motor	96
Εικόνα 49: Terminal πειράματος STEPPER Motor με PWM.....	98
Εικόνα 50: Κώδικας κυκλώματος STEPPER Motor.....	98

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1: Διπολικά Τρανζίστορ	46
Σχήμα 2: Διπολικό Τρανζίστορ	46
Σχήμα 3: Darlington Transistor	50
Σχήμα 4: Ζεύγος Darlington	51
Σχήμα 5: ULN2003A	53
Σχήμα 6: MOS προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS)	54
με το σύμβολό του	54
Σχήμα 7: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS)	55
με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του	55
υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του	55
Σχήμα 8: MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS)	56
με το σύμβολό του	56
Σχήμα 9: MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS)	56
με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του	56
υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του	56
Σχήμα 10: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Δημιουργία του n-καναλιού όταν η θετική τάση u_{GS} ξεπεράσει τη τιμή κατωφλίου V_T	57
Σχήμα 11: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS).	58
Τροποποίηση της μορφής του καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς	58
δυναμικού u_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής	58
Σχήμα 12: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS).	59
Κατάσταση μη-κορεσμένης αγωγιμότητας (non-saturated	59
conduction)	59
Σχήμα 13: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS).	60
Κατάσταση κορεσμένης αγωγιμότητας (saturated conduction).	60
Σχήμα 14: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS).	61
Το κανάλι κλείνει σε μια απόσταση L_K από την πηγή.	61
Σχήμα 15: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement	61
NMOS). Το κανάλι δεν κλείνει	61
Σχήμα 16: Το ζεύγος Darlington μπορεί να φτιαχτεί από δύο τρανζίστορ	64
Σχήμα 17: Pulse Width Modulation	76

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

Τί είναι το Raspberry Pi

Το Raspberry Pi είναι ένας πλήρης υπολογιστής με μέγεθος πιστωτικής κάρτας. Παρά τον ελάχιστον όγκο του, το Raspberry Pi στη μεγαλύτερή του έκδοση διαθέτει τετραπύρηνο επεξεργαστή 1200MHz, διπύρηνη κάρτα γραφικών, 1GB RAM, τέσσερις θύρες USB, έξοδο HDMI, τροφοδοτείται μέσω Micro USB, και 40 pins γενικής χρήσης για σύνδεση με άλλα ηλεκτρονικά και περιφερειακά. Το λειτουργικό του σύστημα ονομάζεται Raspbian και φυσικά βασίζεται στο Linux. Επίσης υπάρχουν και άλλα λειτουργικά συστήματα ειδικά σχεδιασμένα για το Raspberry Pi όπως Ubuntu, Windows 10 IOT Core, RISC OS καθώς και διάφορες άλλες εκδόσεις που προσομοιάζουν πλήρως ένα mediacenter σύστημα.

Ιστορική αναδρομή

Το 2006, στο πανεπιστήμιο του Cambridge, μια ομάδα εργαζομένων στο τμήμα Computer Laboratory ανησυχούσε για το μειωμένο ενδιαφέρον των φοιτητών στην πληροφορική, καθώς και τις περιορισμένες γνώσεις τους. Η ομάδα αυτή, που περιλάμβανε μεταξύ άλλων τους Eben Upton, Rob Mullins, Jack Lang, και Alan Mycroft, σκέφτηκε πως η λύση θα ήταν ένας εξαιρετικά μικρός και προσιτός υπολογιστής. Με ένα τέτοιο οικονομικό σύστημα, θα ήταν δυνατόν να διδάσκεται πρακτικά η πληροφορική στα σχολεία, και να έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τους μαθητές. Ενώ η ομάδα σχεδίασε αρκετά αρχικά πρωτότυπα του Raspberry Pi, πρέπει να αναλογιστούμε πως το 2006 υπήρχαν σημαντικοί περιορισμοί, λόγω του υψηλού κόστους και χαμηλής ισχύος των επεξεργαστών για mobile συσκευές. Σταδιακά, όμως, με την μετέπειτα επέλαση των smartphones, το κόστος της τεχνολογίας άρχισε να μειώνεται αρκετά για να γίνει βιώσιμη η υλοποίηση του Raspberry Pi. Το 2008, με τη συνεργασία των Pete Lomas και David Braben δημιουργήθηκε το φιλανθρωπικό ίδρυμα Raspberry Pi Foundation. Τρία χρόνια αργότερα κυκλοφόρησε το πρώτο Raspberry Pi, με τα Model A, Model A+ και Model B. Τα μοντέλα αυτά διέθεταν επεξεργαστή ARMv6k στα 700 MHz, 256MB RAM, κάρτα γραφικών BroadcomVideoCore IV, και κατανάλωση από 1 έως 3.5 watt, ενώ η αποθήκευση των δεδομένων γινόταν σε κάρτες SD, SDHC και MicroSD. Μόνο το Raspberry Pi Model B, μέσα σε δύο χρόνια από όταν βγήκε στη μαζική παραγωγή, πούλησε πάνω από δύο εκατομμύρια κομμάτια. Στη συνέχεια κυκλοφόρησαν οι εκδόσεις Model B rev 2 και Model B+ με 512MB RAM. Τον Οκτώβριο του 2014, οι συνολικές πωλήσεις προσέγγιζαν τα 4 εκατομμύρια. Το Φεβρουάριο του 2015 κυκλοφόρησε το Raspberry Pi Generation 2 Model B, ανέβασε τη RAM στο 1GB και εξαπλασίασε την ταχύτητα του επεξεργαστή, με τον τετραπύρηνο Cortex-A7 (ARMv7), ενώ έχει διπύρηνη κάρτα γραφικών BroadcomVideoCoreIV. Το Νοέμβριο του 2015 κυκλοφόρησε το Raspberry Pi Zero, μία έκδοση με το μισό μέγεθος από το Raspberry Pi, 512MB RAM, και επεξεργαστή ARM1176JZF-S στα 1000MHz. Το Raspberry Pi Generation 3 Model B κυκλοφόρησε το Φεβρουάριο του 2016. Έρχεται εξοπλισμένο με ακόμα ταχύτερο επεξεργαστή ARM Cortex-A53 στα 1200MHz, 1GB RAM και κάρτα γραφικών BroadcomVideoCore IV χρονισμένη στα 250MHz, συχνότητα υψηλότερη από κάθε προηγούμενη γενιά.

Τι κάνουμε με το Raspberry Pi

Είναι εντυπωσιακό πώς αυτή η υπολογιστική ισχύς συγκεντρώνεται σε τόσο λίγο χώρο και με τόσο χαμηλό κόστος, σημαντικά χαμηλότερο από ενός smartphone.

Το Raspberry Pi είναι hardware ανοιχτού κώδικα, με το οποίο τα τελευταία χρόνια έχει ασχοληθεί πολύς κόσμος, προσφέροντας στους αρχάριους οδηγίες για να κάνουν κυριολεκτικά τα πάντα. Υπάρχουν τρομερά project με τα οποία μπορείς να ασχοληθείς, εδώ θα αναφέρουμε όμως μόνο τα πολύ απλά, στα οποία δε χρειάζεται να κάνεις έξτρα έξοδα πέρα από το Pi, τη microSD κάρτα του, το πληκτρολόγιο / ποντίκι και την οθόνη / τηλεόραση.

Πρώτον: Ένα desktop computer

Με το Pi μπορείς να έχεις ένα desktop computer, για να κάνεις τα βασικά, όπως να μπαίνεις στο ιντερνέτ, να ακούς μουσική, να βλέπεις βίντεο και να δημιουργείς αρχεία Office. Μπορεί κάλλιστα να γίνει ένας υπολογιστής ο οποίος θα σε εξυπηρετεί σε μια ώρα ανάγκης. Διαθέτει το δικό του λειτουργικό σύστημα, το οποίο αναβαθμίζεται τακτικά και είναι τόσο πλήρες για βασική χρήση όσο το Windows και το Mac OS.

Δεύτερον: Ένα σύγχρονο Android TV-Box

Πολλοί από εμάς έχουμε ένα Android TV-Box στο σπίτι μας, μέσω του οποίου παρακολουθούμε τις αγαπημένες μας σειρές και ταινίες. Τη δουλειά αυτή μπορεί να την κάνει και το Raspberry Pi, καθώς έχει τη δυνατότητα να προβάλλει βίντεο 1080p έως 30fps.

Τρίτον: Έναν οικιακό backup server

Όλοι έχουμε ένα γνωστό ο οποίος έχασε τις φωτογραφίες και τα προσωπικά αρχεία του επειδή χάλασε ο υπολογιστής ή το κινητό του. Με το RaspberryPi μπορούμε να δημιουργήσουμε το δικό μας server που θα κρατάει backup από τα αρχεία όλων των συσκευών μας. Με εφαρμογές όπως το NextCloud και το BitTorrent Sync αυτό γίνεται αυτόματα και το πλεονέκτημα είναι ότι έχουμε άπειρο δωρεάν αποθηκευτικό χώρο, αφού αυτός εξαρτάται από τους δίσκους που θα συνδέσουμε στο server μας! Τέλος επειδή οι καιροί είναι πονηροί, τα αρχεία μας θα βρίσκονται στο δικό μας server και όχι σε αυτόν της Google, του Dropbox και άλλων παρόχων.

Τέταρτον: Μία retro παιχνιδο-μηχανή

Τέλος ένα από τα εύκολα και πολύ χρήσιμα project που μπορείς να κάνεις με το Pi είναι να δημιουργήσεις μία retro παιχνιδο-μηχανή. Με το Pi μπορείς να τις έχεις όλες σε μία και δωρεάν. Το μόνο που θα χρειαστείς είναι ένα χειριστήριο για να παίζεις τα παιχνίδια σου.

Αυτά είναι μόνο τα απλά project που γίνονται μέσα σε 10 λεπτά.

Με το Pi και λίγη υπομονή μπορείς επίσης να φτιάξεις:

- έναν Web server για να ανεβάσεις το site σου και να έχεις πρόσβαση στα αρχεία σου από παντού,
- ένα σύστημα ασφαλείας με κάμερα για το σπίτι σου,
- ένα VPN server,
- έναν Printserver για να εκτυπώνεις ασύρματα τα αρχεία σου στον εκτυπωτή σου,
- ένα φθηνό GoogleHome

Κεφάλαιο 2: Γλώσσα Python

Πληροφορίες γλώσσας

Για τη δημιουργία των προγραμμάτων στο Raspberry Pi χρησιμοποιήσαμε τη γλώσσα προγραμματισμού Python. Η Python είναι μια γλώσσα "υψηλού επιπέδου". Ο κώδικας της πρέπει να μετατραπεί σε «γλώσσα μηχανής» ώστε να εκτελεστεί από τον Η/Υ. Η επεξεργασία γίνεται από διερμηνευτές (interpreters) και μεταγλωττιστές (compilers). Στη περίπτωση μας η επεξεργασία γίνεται από διερμηνευτή.

Η python είναι μια γλώσσα προγραμματισμού με απλό συντακτικό, μεγάλη αναγνωσιμότητα, φορητότητα (portability) και μοντέρνα χαρακτηριστικά που τη κάνουν κατάλληλη ως πρώτη γλώσσα προγραμματισμού. Κύριος στόχος της είναι η αναγνωσιμότητα του κώδικα της και η ευκολία χρήσης της. Το συντακτικό της επιτρέπει στους προγραμματιστές να εκφράσουν έννοιες σε λιγότερες γραμμές κώδικα απ'ότι θα ήταν δυνατό σε γλώσσες όπως οι java ή η c++. Διακρίνεται λόγω του ότι έχει πολλές βιβλιοθήκες που διευκολύνουν ιδιαίτερα αρκετές συνηθισμένες εργασίες και για την ταχύτητα της εκμάθησής της. Επίσης ο μεταγλωττιστής της python παράγει τον ενδιάμεσο κώδικα (byte code) ο οποίος μπορεί να εκτελεστεί από το διερμηνέα (interpreter) σε πολλά διαφορετικά υπολογιστικά περιβάλλοντα.

Ο λόγος που επιλέγουμε την python είναι:

- Γλώσσα ανοιχτού κώδικα
- Γενικής χρήσης, υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού
- Εύκολη στην εκμάθησή της
- Με δυνατότητες σε διάφορες κατευθύνσεις (ισχυρή γλώσσα προγραμματισμού)
- Κατάλληλη για αρχάριους και για έμπειρους προγραμματιστές
- Υπάρχουν αρκετά πακέτα υποστήριξης (βιβλιοθήκες)

Κεφάλαιο 3: Μοντέλα Rarpberry

3.1 Raspberry Pi Model B

Το *Raspberry Pi* ξεκίνησε επίσημα τη διαδρομή του το Φεβρουάριο το 2012 με την πρώτη γενιά και ονομάστηκε Raspberry Pi μοντέλο B (Raspberry Pi Model B). Το λειτουργικό σύστημα φορτώνεται σε κάρτα SD το οποίο εφαρμόζει πάνω στην πλακέτα στην κάτω πλευρά του Raspberry. Χαρακτηριστικό το οποίο στην πορεία εξελίχτηκε αργότερα σε κάποια μεταγενέστερα μοντέλα. Πλέον η κάρτα SD στην οποία φορτώνετε το λειτουργικό σύστημα έρχεται σε επαφή με την πλακέτα μέσα από ειδική προεξοχή. Δηλαδή Χωρίς την χρήση προσαρμογέα (Adaptor).



Εικόνα 1: Raspberry Pi Model B

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2835
- ❖ Τύπος Πυρήνα ARM1176JZF-S
- ❖ Μονοπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV 1080p@30
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 700 MHz
- ❖ Μνήμη RAM 512 MB

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας :

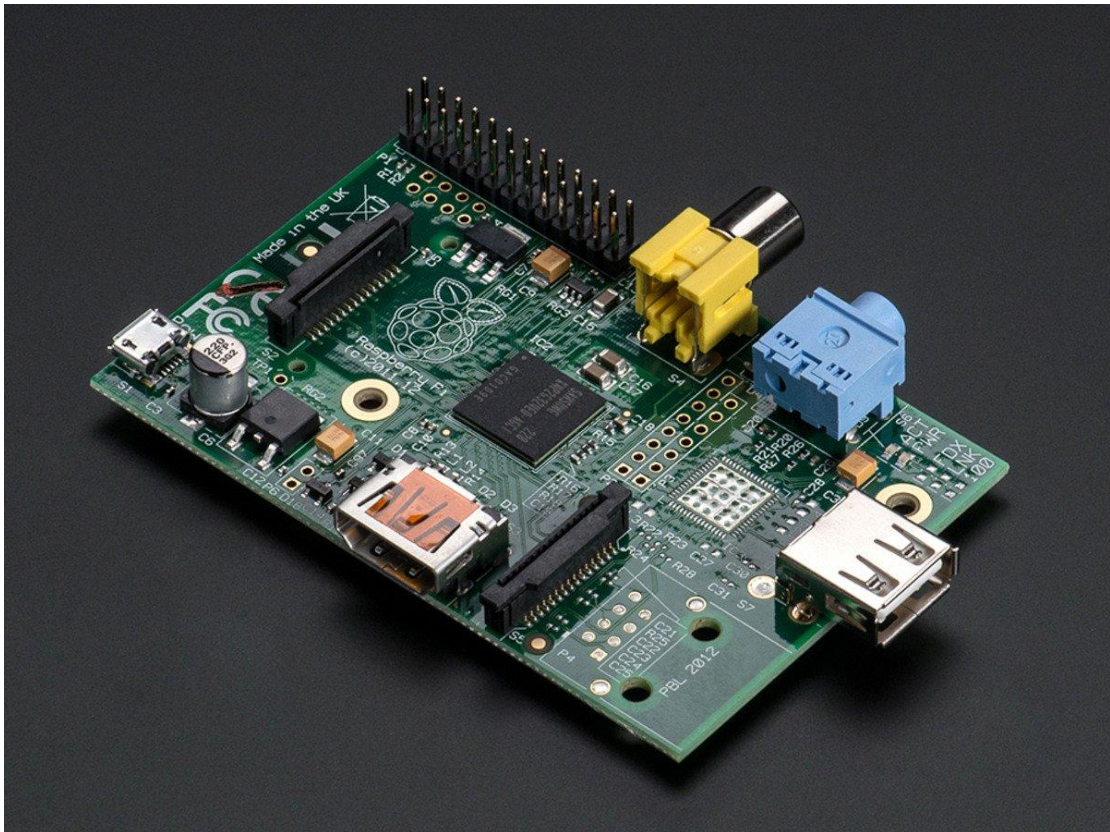
- ❖ Θύρες USB 2
- ❖ Θύρα Ethernet
- ❖ Έξοδο HDMI 1.3
- ❖ Έξοδος σύνθετου σήματος βίντεο
- ❖ Αναλογική έξοδος ήχου
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διαύλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO 26 ακίδων
- ❖ Σειριακή διεπαφή απεικόνιση - DSI
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας – DSI
- ❖ Κάρτα SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ 700 mA στα 5V
- ❖ Πηγή τροφοδοσίας microUSB ή GPIO

3.2 Raspberry Pi Model A

Το Φεβρουάριο του 2013 κυκλοφόρησε το μοντέλο A, το οποίο σχεδιάστηκε μικρότερο με στόχο την ενσωμάτωσή του σε περισσότερα project αλλά και τη μικρότερη κατανάλωση ισχύος. Σε αυτό το μοντέλο έλειπε η θύρα Ethernet, οι δύο θύρες USB μειώθηκαν σε μόνο μία. Επιπλέον η μνήμη RAM μειώθηκε σε 256 MB. Πολύ σύντομα έγινε κι αυτό με τη σειρά του ανάρπαστο παρόλο που συγκριτικά με το προηγούμενο μοντέλο παρουσίασε υποβάθμιση σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.



Εικόνα 2: Raspberry Pi Model A

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2835
- ❖ Τύπος Πυρήνα ARTMv6Z (32-bit)
- ❖ Μονοπύρηνος ARM1176JZF-S
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV 1080p@30
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 700 MHz
- ❖ Μνήμη RAM 256 MB

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας :

- ❖ Θύρα USB 2.0
- ❖ Θύρα Ethernet OXI
- ❖ Έξοδο HDMI 1.3
- ❖ Έξοδος σύνθετου σήματος βίντεο
- ❖ Αναλογική έξοδος ήχου
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διάλυο διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO 26 ακίδων
- ❖ Κάρτα SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ 300 mA (1.5 W) στα 5V
- ❖ Πηγή τροφοδοσίας microUSB ή GPIO

3.3 Raspberry Pi Compute Module

Τον Απρίλιο του 2014 η εταιρεία έβγαλε στην κυκλοφορία ένα διαφορετικό μοντέλο. Απευθυνόταν σε βιομηχανικές εφαρμογές έχοντας ως σκοπό μια πιο ελαστική προσέγγιση. Έφερε επεξεργαστή BCM2835 μεγαλώνοντας τη μνήμη RAM στα 512 MB , όπως ήταν στο μοντέλο πρώτης γενιάς – Raspberry Pi B. Το μέγεθος του ήταν κάτι που το έκανε ανταγωνιστικό καθώς ήταν 68x30mm , σχεδόν το μισό μιας πιστωτικής κάρτας. Έφερε μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τον τρόπο διασύνδεσης μέσω της GPIO αφού έφερε περισσότερες από το ή το υπολογιστικό σύστημα Raspberry Pi. Προορίστηκε αρχικά όπως αναφέρθηκε παραπάνω για βιομηχανική χρήση αφού ήταν εφικτή η ενσωμάτωση σε μεγαλύτερα κυκλώματα (οθόνες NEC κτλ.).



Εικόνα 3: Raspberry Pi Compute Module

3.4 Raspberry Pi Model B+

Τον Ιούλιο του 2014 το Raspberry Pi σημείωσε μια μεγάλη αλλαγή καθώς το GPIO έφτασε τις 40 ακίδες σε σχέση με το προηγούμενο GPIO που ήταν 26 ακίδες. Προστέθηκαν τέσσερις USB θύρες από δύο που ήταν στο προηγούμενο μοντέλο. Η μνήμη RAM παρέμεινε στα 512 MB. Καταργήθηκε ο SD αντάπτορας και το λειτουργικό πλέον φορτώνετε μέσα από την MicroSD κάρτα , η οποία έρχεται σε επαφή απευθείας με τον ειδικό υποδοχέα το οποίο είναι συνδεδεμένο επάνω στην πλακέτα. Επιπρόσθετα έγινε αντικατάσταση των γραμμικών ρυθμιστών με διακόπτες και έτσι μειώθηκε η κατανάλωση ενέργειας. Το κύκλωμά ήχου ενσωμάτωσε για πρώτη φορά μια ειδική τροφοδοσία η οποία είναι χαμηλή σε θόρυβο, έτσι η ενέργεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα καλύτερο ήχο. Παράλληλα στο οπτικό κομμάτι προστέθηκε αισθητική λεπτομέρεια ,και τέλος έγινε ευθυγράμμιση των θυρών USB στην άκρη της πλακέτας.

Το μοντέλο B+ είναι ακόμη και σήμερα πολύ ανταγωνιστικό ακόμη και μετά τα τελευταία μοντέλα, καθώς έφερε σύνολο χαρακτηριστικών που το έκανε συναρπαστικό στους χρήστες στους επιστήμονες αλλά και στο ευρύτερο κοινό.



Εικόνα 4: Raspberry Pi Model B+

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2836
- ❖ Τύπος Πυρήνα Cortex-A53 64-bit
- ❖ Μονοπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών Broadcom VideoCore IV 250 MHz
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 1.2 GHz
- ❖ Μνήμη RAM 1 GB

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ 4 Θύρες USB
- ❖ Θύρα Ethernet
- ❖ Έξοδο HDMI
- ❖ Έξοδος σήματος βίντεο – διαμοιραζόμενη με Audio Jack
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διαύλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO – 40 Ακίδων
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ Micro SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ 200 mA (1 W) κατά μέσο όρο όταν είναι αδρανές, μέγιστο 350 mA (1,75 W) υπό τάση (συνδεδεμένο με οθόνη, πληκτρολόγιο και ποντίκι)
- ❖ Τροφοδοσία 5V μέσω micro USB or GPIO header

Ασύρματη συνδεσιμότητα

- ❖ Wi-Fi
- ❖ Bluetooth
- ❖ Ethernet 10/100Mbps

3.5 Raspberry Pi Model A+

Το Νοέμβριο του 2013 η εταιρεία στην προσπάθεια της να ανανεώσει το υλικό στο οποίο ολοένα και περισσότεροι προγραμματιστές, εκπαιδευτές , επιστήμονες βασίζονταν . Ανακοινώνει την άφιξη ενός νέου μοντέλου. Το μοντέλο A+ αποτελεί το μικρότερο σε μέγεθος Raspberry Pi. Είχε 40 ακίδες GPIO όπως για το προηγούμενο μοντέλο, αλλά και 512 MB μνήμη RAM ενώ επιπλέον έχει ενσωματωθεί μονοπύρηνος επεξεργαστής στα 700 MHz. Το μικρό του μέγεθος το έκανε ευέλικτο και προσαρμόσιμο σε ένα σωρό νέες δυνατότητες.



Εικόνα 5: Raspberry Pi Model A+

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2835
- ❖ Τύπος Πυρήνα ARM1176JZF-S
- ❖ Μονοπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 700 MHz
- ❖ Μνήμη RAM 256 MB

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ Θύρες USB 1
- ❖ Έξοδο HDMI
- ❖ Έξοδος σύνθετου σήματος βίντεο – διαμοιραζόμενη με Audio Jack
- ❖ Αναλογική έξοδος ήχου
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διάυλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO 40 ακίδων
- ❖ Σειριακή διεπαφή απεικόνιση
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ Κάρτα Micro SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ 200 mA
- ❖ Πηγή τροφοδοσίας micro USB ή GPIO

3.6 Raspberry Pi Model Zero

Θεωρήθηκε ως μία από τις μεγαλύτερες αλλαγές ,το Raspberry Pi Zero έφτασε στα χέρια του κοινού το Νοέμβριο του 2015. Ακόμη πιο ενδιαφέρον ήταν το γεγονός ότι διανεμήθηκε δωρεάν μαζί με το επίσημο περιοδικό του Raspberry Pi Foundation αλλά και το Mag Pi, το οποίο είναι ένα περιοδικό για κατασκευές με Raspberry. Το μέγεθος στο ήταν πλέον σχεδόν $\frac{1}{4}$ του αρχικού του μεγέθους. Η εταιρεία έδωσε στο κοινό τη δυνατότητα να συναρμολογήσει την κεφαλή GPIO , καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο δεν έφερνε GPIO. Το συγκεκριμένο μοντέλο είχε επεξεργαστή μονοπύρηνο στα 1 GHz και 512 MB μνήμη RAM. Είχε έξοδο Mini-HDMI ενώ παράλληλα μπορούσε να συνδεθεί μέσω Micro-USB θύρας.

Από τα παραπάνω διαπιστώνετε ότι μιλάμε για ένα πλήρες υπολογιστικό σύστημα το οποίο προσφέρει αμέτρητες δυνατότητες στους χρήστες είτε για απλή χρήση του συγκεκριμένου υπολογιστή, είτε για πειράματα επιστημονικού ενδιαφέροντος. Η εισαγωγή του Raspberry Pi Zero επέτρεψε στους προγραμματιστές, επιστήμονες και γενικότερα στην κοινότητα την ενσωμάτωση ενός πλήρη υπολογιστή σε ακόμη μικρότερα project.



Εικόνα 6: Raspberry Pi Model Zero

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2835
- ❖ Τύπος Πυρήνα ARM1176JZF-S
- ❖ Μονοπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών - VideoCore IV
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 1GHz
- ❖ Μνήμη RAM 512 MB

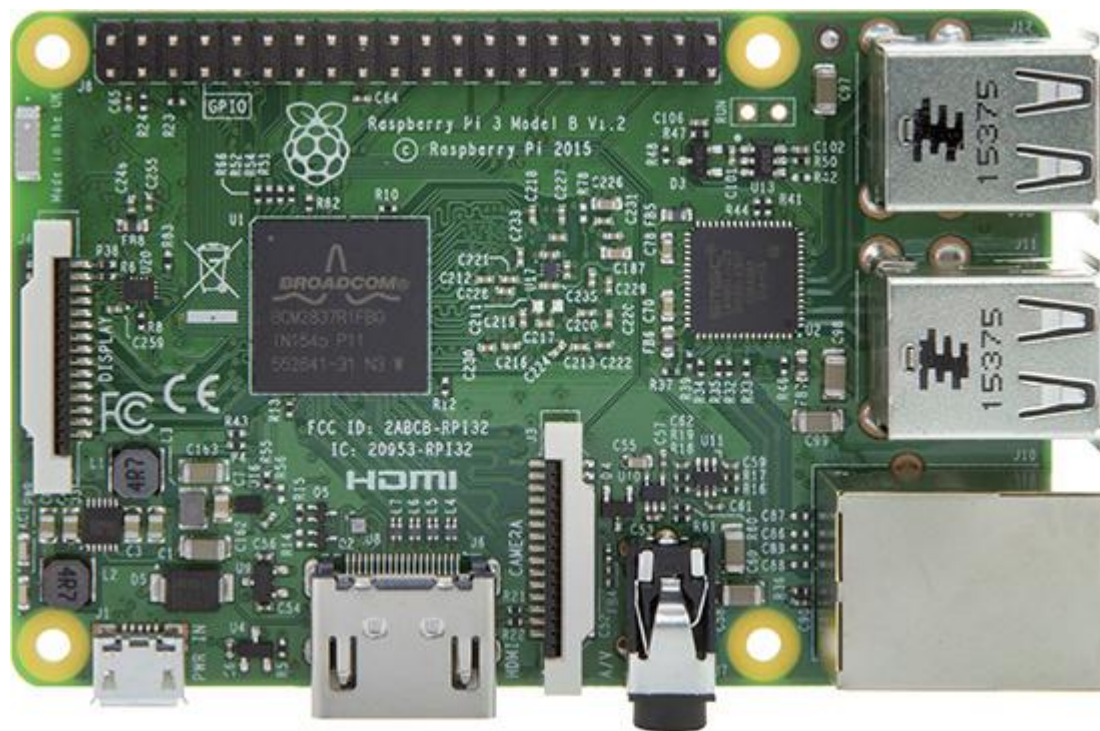
Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ Θύρες USB – Micro / Micro OTG
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO
- ❖ Έξοδος HDMI – υποστηρίζει και ήχο
- ❖ Έξοδος σύνθετου σήματος βίντεο –
- ❖ Αναλογική έξοδος ήχου
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διαύλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO – έλειπαν οι Άκηδες
- ❖ Σειριακή διεπαφή απεικόνιση
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ Κάρτα Micro SD

3.7 Raspberry Pi 3 Model B

Ίσως το πιο “δυνατό” μοντέλο που είχε κατασκευαστεί μέχρι εκείνη την στιγμή. Το Φεβρουάριο του 2016 η εταιρεία έβγαλε στην κυκλοφορία το μοντέλο αυτό το οποίο έφερε επεξεργαστή Quad-Core - 64 Bit στα 1,2 GHz με 1 GB μνήμη RAM. Παρόλα αυτά ίσως από τις μεγαλύτερες αλλαγές πάνω στο μοντέλο αυτό ήταν το ενσωματωμένο Wi-Fi και Bluetooth , το οποίο έλυσε τα χέρια των σχεδιαστών αφού δεν απαιτούσε αντάπτορες για τη σύνδεση στο ίντερνετ αλλά ούτε και καλώδια, επιτρέποντας έτσι την ενσωμάτωση του στο “Ίντερνετ των Πραγμάτων (IoT – Internet of Things). Σίγουρα ήταν το πιο ισχυρό από όλα τα προηγούμενα μοντέλα και αυτό φάνηκε στη μετέπειτα πορεία πωλήσεων αλλά και στα Project τα οποία ενσωματώθηκε ανά τον κόσμο.

Η Ισχυρή επεξεργαστική δύναμη που έφερε το συγκεκριμένο μοντέλο έκανε δυνατό την ενσωμάτωση του, αλλά και την υλοποίηση περισσότερων project από οποιοδήποτε άλλο μοντέλο προηγουμένως. Το υπολογιστικό σύστημα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί πλέον ως ένας desktop υπολογιστής, mediacenter, router, cluster (σε ομάδες υπολογιστικών συστημάτων), κονσόλες παιχνιδιών, έξυπνους καθρέφτες, τηλέφωνα, laptop, ρομπότ αλλά και πειράματα στα όρια του διαστήματος.



Εικόνα 7: Raspberry Pi 3 Model B

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2837
- ❖ Τύπος Πυρήνα Cortex-A53 64-bit
- ❖ Τετραπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV 1080p@30
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 1.2 GHz
- ❖ Μνήμη RAM 1 GB DDR2

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ 4 Θύρες USB
- ❖ Θύρα Ethernet
- ❖ Έξοδο HDMI
- ❖ Έξοδος σήματος βίντεο – διαμοιραζόμενη με AudioJack
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διαύλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO – 40 Ακίδων
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ Micro SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

300 mA (1,5 W) κατά μέσο όρο όταν είναι αδρανής, 1,34 A (6,7 W) μέγιστο υπό τάση(οθόνη, πληκτρολόγιο, ποντίκι και WiFi)

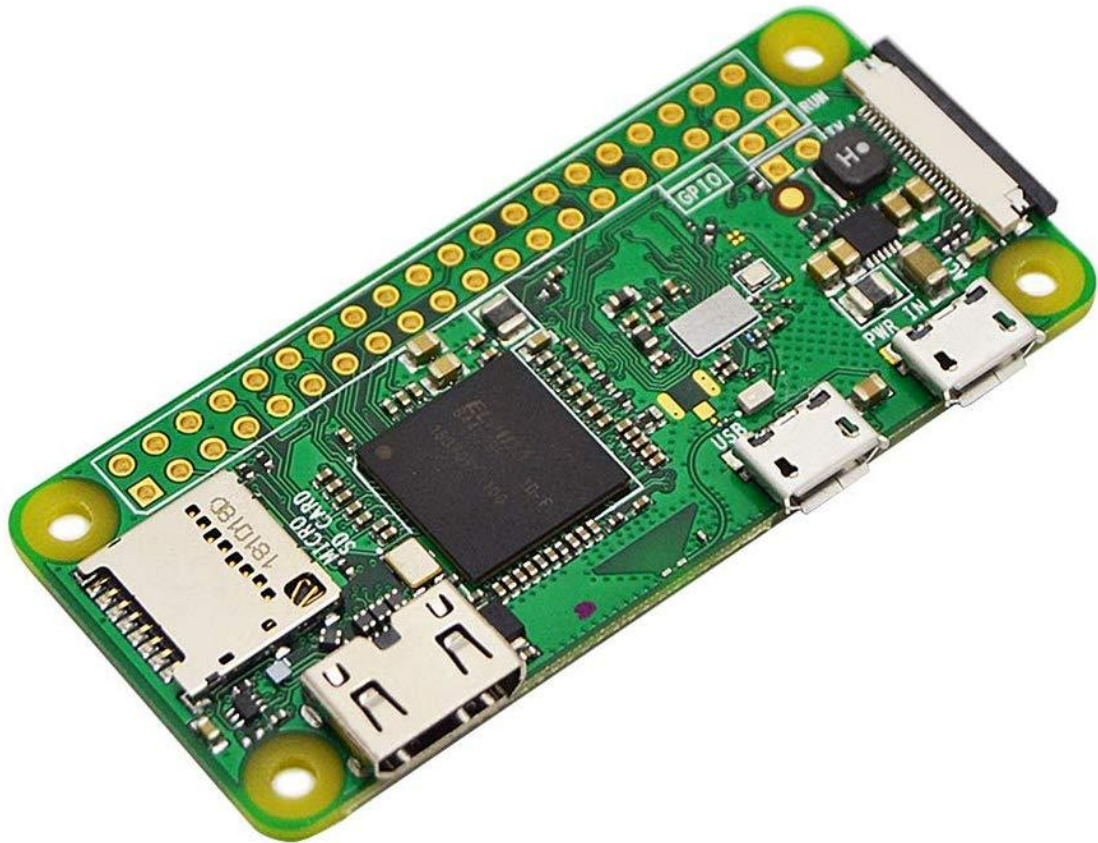
Τροφοδοσία 5V μέσω micro USB or GPIO header

Ασύρματη συνδεσιμότητα

- ❖ Wi-Fi – 802.11n
- ❖ Bluetooth – 4.1 LE

3.8 Raspberry Pi Model Zero W

Το Φεβρουάριο του 2017 έγινε μία επανακυκλοφορία του Raspberry Pi Zero. Μονό που αυτή τη φορά το μοντέλο αυτό έφερε μικρότερο από τα προηγούμενα μοντέλα υποδοχέα κάμερας κάνοντας έτσι απαραίτητη την ύπαρξη καλωδίου για να μπορέσει να συνδεθεί με κάμερα. Το μοντέλο αυτό ήταν ολόιδιο σε μέγεθος με το προγενέστερο το μοντέλο.



Εικόνα 8: Raspberry Pi ZeroW

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2835
- ❖ Τύπος Πυρήνα ARM1176JZF-S
- ❖ Μονοπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 1GHz
- ❖ Μνήμη RAM 512 MB

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ Θύρες USB - Micro / Micro OTG
- ❖ Έξοδο HDMI - Micro
- ❖ Έξοδος σήματος βίντεο – μέσω αχρησιμοποίητων ακίδων
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διάλυο διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ Κάρτα Micro SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

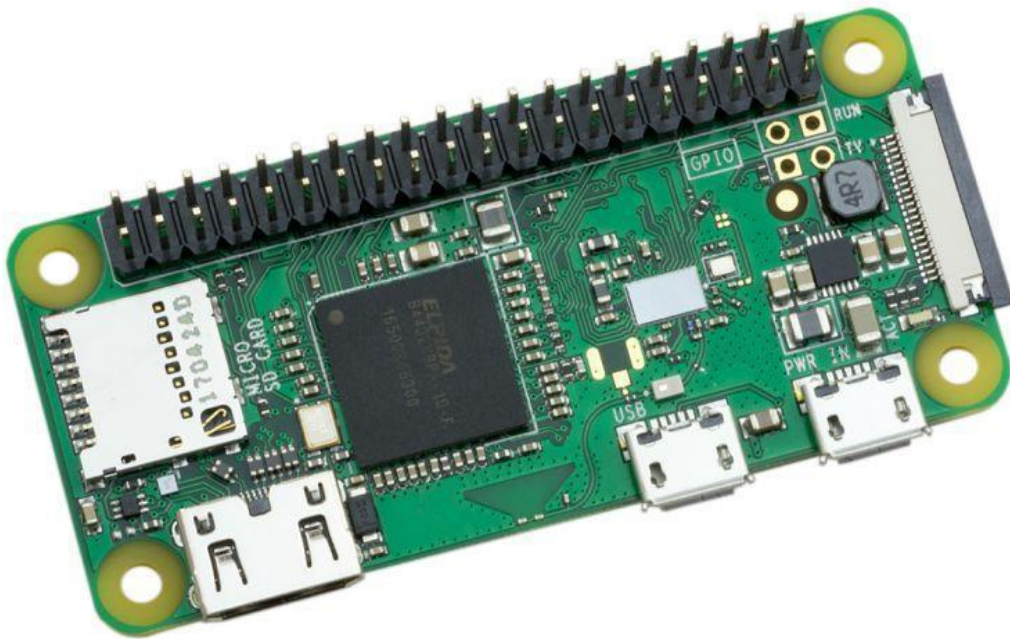
- ❖ 200 mA
- ❖ Πηγή τροφοδοσίας microUSB ή GPIO

Ασύρματη συνδεσιμότητα

- ❖ Wi-Fi – 802.11n
- ❖ Bluetooth – 4.1

3.9 Raspberry Pi Zero WH

Τον Ιανουάριο του 2018 κυκλοφορεί το Raspberry Pi Zero WH με ελάχιστες διαφορές από το προηγούμενο Raspberry Pi Zero. Η εμφανής διαφορά ήταν η 40 ακίδες που ήταν πλέον κολλημένες στην πλακέτα.



Εικόνα 9: Raspberry Pi Zero WH

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2835
- ❖ Τύπος Πυρήνα ARM1176JZF-S
- ❖ Μονοπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 1GHz
- ❖ Μνήμη RAM 512 MB.

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ Θύρες USB - Micro / Micro OTG
- ❖ Έξοδο HDMI - Micro
- ❖ Έξοδος σήματος βίντεο – μέσω αχρησιμοποίητων ακίδων
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διαύλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ Κάρτα Micro SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ 200 mA
- ❖ Πηγή τροφοδοσίας microUSB ή GPIO

Ασύρματη συνδεσιμότητα

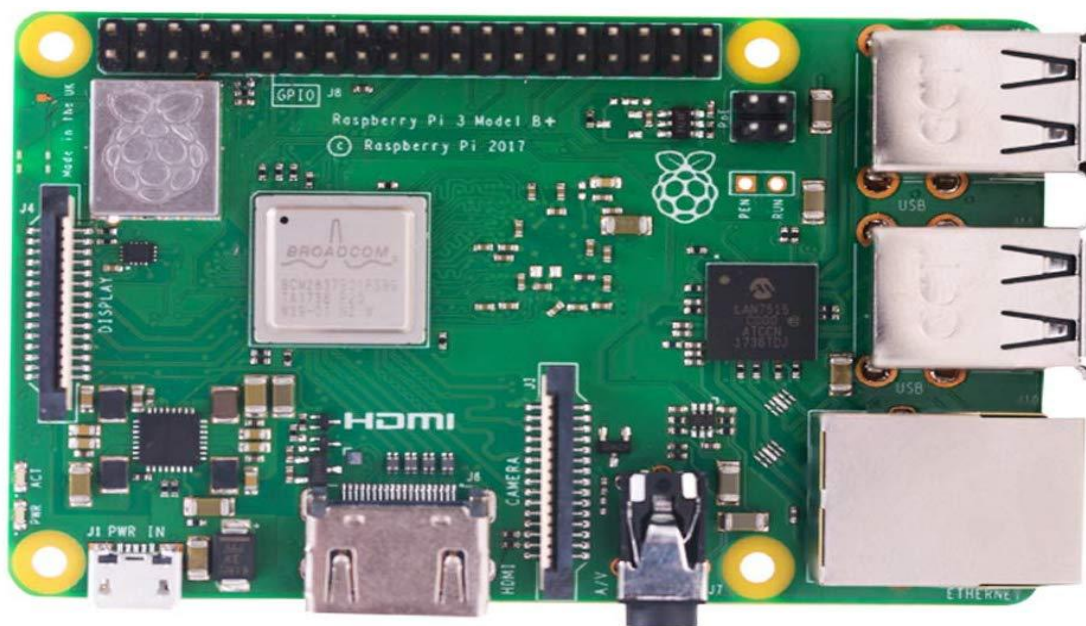
- ❖ Wi-Fi – 802.11n
- ❖ Bluetooth – 4.1

3.10 Raspberry Pi 3 Model B+

Το Raspberry Pi έκανε ακόμη μια σημαντική αναβάθμιση οδεύοντας έτσι σε ένα νέο ισχυρό υπολογιστικό σύστημα με τεράστιες δυνατότητες επεκτασιμότητας διατηρώντας για άλλη μια φορά το μικρό του μέγεθος. Τον Μάρτιο του 2018 η εταιρεία ανακοίνωσε ακόμη μία σημαντική αναβάθμιση διατηρώντας την ίδια χαμηλή τιμή.

Ενώ όλα τα μοντέλα χρησιμοποιούσαν ARM επεξεργαστή χαμηλής κατανάλωσης, αυτή τη φορά αναβαθμίστηκε ο επεξεργαστής τις Broadcom. Διαθέτει τέσσερις πυρήνες Cortex A53 που τροφοδοτούνται με ροπή 1.4 GHz αντί του 1,2 GHz ενώ ένας νέος διαστολέας κεφαλής διατηρεί ψυχρότερο τον επεξεργαστή. Διαθέτει υποστήριξη για Wi-Fi 802.11ac διπλής ζώνης χάρη σε ένα chip CYW43455. Εμπεριέχει τέσσερις θύρες USB υποστηρίζει Gigabit Ethernet και η τοποθέτηση λειτουργικού συστήματος γίνεται μέσω Micro SD κάρτας.

Μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε πως έχουμε να κάνουμε με έναν ισχυρό επεξεργαστή με γενικότερα ισχυρά χαρακτηριστικά τα οποία δίνουν τη δυνατότητα με τη χρήση απλών περιφερειακών μονάδων όπως πληκτρολόγιο, ποντίκι, οθόνη να έχουμε ένα ολοκληρωμένο πανίσχυρο υπολογιστή. Συνάμα μπορεί να ενσωματωθεί σε ακόμη περισσότερα Project καθώς τα τεχνικά του χαρακτηριστικά κάνουν το συγκεκριμένο μοντέλο προσαρμόσιμο σε κάθε νέα ιδέα καινοτομίας.



Εικόνα 10: Raspberry Pi 3 Model B+

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2837
- ❖ Τύπος Πυρήνα Cortex-A53 64-bit
- ❖ Τετραπύρηνος
- ❖ Μονάδα Επεξεργασίας Γραφικών VideoCore IV
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας 1.4 GHz
- ❖ Μνήμη RAM 1 GB DDR2

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ 4 Θύρες USB
- ❖ Θύρα Ethernet – Gigabit – Over USB 2.0
- ❖ Έξοδο HDMI
- ❖ Έξοδος σήματος βίντεο – διαμοιραζόμενη με Audio Jack
- ❖ Σειριακός περιφερειακός διάλλου διασύνδεσης - SPI
- ❖ I2C
- ❖ Φυσική διεπαφή GPIO – 40 Ακίδων
- ❖ Σειριακή διεπαφή κάμερας
- ❖ SD/MMC
- ❖ Κάρτα Micro SD

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ 9 mA (295 W) μέσος όρος όταν είναι αδρανής, 1.13 A (5.661 W) μέγιστο υπό τάση(οθόνη, πληκτρολόγιο, ποντίκι και Wi-fi συνδεδεμένο)
- ❖ Τροφοδοσία 5V μέσω micro USB or GPIO header

Ασύρματη συνδεσιμότητα:

- ❖ Wi-Fi – 802.11 b/g/n/ac
- ❖ Bluetooth – 4.2

3.11 Raspberry Pi 4 Model B

Το Raspberry Pi 4 Model B είναι το τελευταίο προϊόν στη δημοφιλή σειρά Raspberry Pi Υπολογιστές και κυκλοφόρησε 24 Ιουνίου του 2019. Προσφέρει πρωτοποριακές αυξήσεις στην ταχύτητα του επεξεργαστή, multimedia την απόδοση, τη μνήμη και τη συνδεσιμότητα σε σχέση με την προηγούμενη γενιά Raspberry Pi 3 Model B+, διατηρώντας ταυτόχρονα συμβατότητα προς τα πίσω και παρόμοια κατανάλωση ενέργειας. Για τον τελικό χρήστη, το Raspberry Pi 4 Model B παρέχει επιφάνεια εργασίας απόδοση συγκρίσιμη με τα x86 συστήματα εισόδου-επιπέδου.



Εικόνα 11: Raspberry Pi 4 Model B

Τεχνικά χαρακτηριστικά:

- ❖ Τύπος SOC Broadcom BCM2711
- ❖ Τύπος πυρήνα Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit
- ❖ Τετραπύρηνος
- ❖ Ρολόι Κεντρικής Μονάδας επεξεργασίας 1.5 GHZ
- ❖ 1GB ή 2GB ή 4GB LPDDR4-3200 SDRAM (ανάλογα με το μοντέλο)
- ❖ OpenGL ES 3.0 γραφικά

Τεχνικά χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας:

- ❖ 2 θύρες USB 3.0. 2 θύρες USB 2.0
- ❖ Πλαστική κεφαλή GPIO 40 Pin Pin (πλήρως συμβατή με προηγούμενες πλακέτες)
- ❖ 2 θύρες Micro-HDMI (υποστηρίζονται έως και 4k@60)
- ❖ 2-λωρίδα θύρας οθόνης MIPI DSI
- ❖ 2-λωρίδα θύρας φωτογραφικής μηχανής MIPI CS
- ❖ 4-πολικό στερεοφωνικό ήχο και σύνθετη θύρα βίντεο
- ❖ Υποδοχή κάρτας Micro-SD για φόρτωση λειτουργικού συστήματος και αποθήκευση δεδομένων
- ❖ 5V DC μέσω σύνδεσης USB-C (ελάχιστο 3A *)
- ❖ 5V DC μέσω κεφαλίδας GPIO (ελάχιστο 3A *)

Χαρακτηριστικά τροφοδοσίας

- ❖ Ισχύς μέσω Ethernet (PoE) ενεργοποιημένη (απαιτεί ξεχωριστό PoE HAT)
- ❖ τροφοδοσία (2,5 A) αν τα περιφερειακά USB έχουν ισχύ < 500 mA

Ασύρματη συνδεσιμότητα:

- ❖ Ασύρματα δίκτυα IEEE 802.11ac 2,4 GHz και 5,0 GHz
- ❖ Bluetooth 5.0, BLE

Συνδεσιμότητα σε Δίκτυο

Συνδεσιμότητα σε Δίκτυο Στο μοντέλο A δεν υπήρχε Ethernet θύρα και η σύνδεση στο δίκτυο γινόταν μέσω USB Ethernet ή μέσω προσαρμογέα Wi-Fi. Στο μοντέλο B η θύρα διατίθεται ενσωματωμένη στο board.

Raspberry Pi Boot Sequence

Όταν το pi λειτουργεί, ο πυρήνας ARM δεν λειτουργεί ενώ ο πυρήνας GPU λειτουργεί και η SDRAM είναι απενεργοποιημένη. Στη συνέχεια η GPU εκτελεί τον first-stage bootloader που είναι αποθηκευμένος στο SoC (System on a Chip) και διαβάζει την SD κάρτα φορτώνοντας από εκεί τον second-stage στην κρυφή μνήμη cache. Εκεί τρέχει το bootcode.bin και ενεργοποιεί την SDRAM η οποία διαβάζει τον third-stage bootloader (loader.bin) από την SD κάρτα στη RAM. Έπειτα ο loader.bin διαβάζει το firmware της GPU που είναι το αρχείο start.elf. Αυτό με τη σειρά του 14 διαβάζει τα αρχεία config.txt, cmdline.txt και kernel.img. Το kernel.img είναι στην ουσία ένας linuxkernel, οπότε γίνεται διακλάδωση στη διεύθυνση 0x8000, τυπική για λειτουργικό linux.

Κεφάλαιο 4: Επεξεργαστές ARM

Ιστορική Αναδρομή

Η αρχιτεκτονική ARM σχεδιάστηκε από την Acorn Computers τη δεκαετία του 1980 για χρήση στους προσωπικούς υπολογιστές της εταιρείας. Τα αρχικά ARM σημαίνουν Acorn Risc Machines και αργότερα Advanced Risc Machines. Οι μηχανικοί της Acorn S.Furber και S.Wilson ανέπτυξαν το αρχικό instruction set και μετά την επιτυχημένη προσομοίωσή του, η εταιρεία ξεκίνησε να υλοποιεί την νέα αρχιτεκτονική. Η υλοποίηση αυτή είναι βασισμένη στον μικροεπεξεργαστή MOS Technology 6502. Ο ARM2 που παρουσιάστηκε στη συνέχεια είχε 32-bit databus, 26-bit address space και 27 καταχωρητές των 32-bit, ενώ περιείχε 30000 τρανζίστορ τη στιγμή που ο 6502, με πιο περιορισμένες δυνατότητες, κατασκευάζονταν με 40000. Αυτή η λιτότητα στο σχεδιασμό είχε ως αποτέλεσμα τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς και τη καλύτερη απόδοση. Ο ARM3, ο πρώτος με κρυφή μνήμη (4k cache) ενίσχυσε την απόδοση ακόμα περισσότερο.

Γενικά

Οι επεξεργαστές ARM είναι σχετικά απλοί, κάτι που τους κάνει να είναι κατάλληλους για εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν υπερισχύσει στις αγορές των κινητών και των ενσωματωμένων συστημάτων, σαν μικροί και σχετικά χαμηλού κόστους μικροεπεξεργαστές και μικροελεγκτές. Το 2005, περίπου το 98% των πάνω από ένα δισεκατομμύριο κινητών τηλεφώνων που πωλούνται κάθε χρόνο είχαν τουλάχιστον έναν επεξεργαστή ARM. Οι επεξεργαστές ARM το 2009 αντιστοιχούσαν περίπου στο 90% όλων των ενσωματωμένων επεξεργαστών RISC 32-bit και χρησιμοποιούνται κατά ένα μεγάλο βαθμό σε καταναλωτικά ηλεκτρονικά προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των προσωπικών ψηφιακών βοηθών (personal digital assistants, PDAs), των κινητών τηλεφώνων, των συσκευών ψηφιακής μουσικής και πολυμέσων, των φορητών κονσολών βιντεοπαιχνιδιών, των αριθμομηχανών και περιφερειακών υπολογιστών όπως οι σκληροί δίσκοι.

Οι επεξεργαστές ARM αναπτύσσονται από την ARM και τις εταιρείες που έχουν άδεια από την ARM. Σημαντικές οικογένειες επεξεργαστών ARM που έχουν αναπτυχθεί από την ARM Holdings είναι οι ARM7, οι ARM9, οι ARM11 και οι Cortex.

Χαρακτηριστικά του επεξεργαστή της ARM

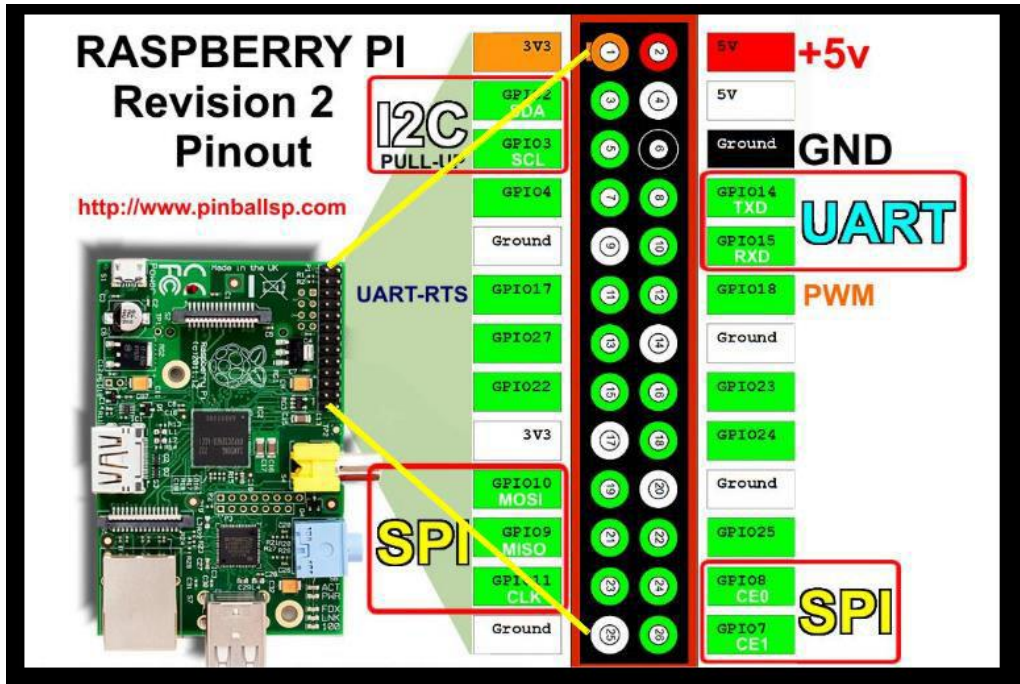
Μια λέξη έχει μέγεθος μνήμης 4-bit και κατά την εξέταση της μνήμης, η ARM χρησιμοποιεί τιμή διεύθυνσης 26-bit. Έτσι υπάρχει πρόσβαση σε 226 ή 64M θέσεις της μνήμης. Παρά το γεγονός ότι μεμονωμένα bytes μπορούν να μεταφερθούν μεταξύ επεξεργαστή και μνήμης, η ARM είναι πραγματικά word-based. Αυτό σημαίνει ότι οι διευθύνσεις εντολών πρέπει να είναι πολλαπλάσια του τέσσερα. Οι συσκευές εισόδου και εξόδου είναι memory mapped. Δεν υπάρχει η έννοια του ξεχωριστού χώρου διευθύνσεων I / O. Τα περιφερειακά chips διαβάζονται και

γράφονται σαν περιοχές της μνήμης. Ουσιαστικά στα συστήματα ARM, ο χάρτης μνήμης χωρίζεται σε τρεις τομείς: συσκευές μνήμης RAM, ROM, και εισόδου / εξόδου. Το σύνολο καταχωρητών είναι 28. Η ARM έχει δεκαέξι καταχωρητές 32-bit, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς περιορισμό από οποιαδήποτε εντολή. Μόνο ένας από τους καταχωρητές είναι μόνιμα απασχολημένος από τον επεξεργαστή. Ένα μικρό, εύκολο στην απομνημόνευση σύνολο εντολών είναι διαθέσιμο. Αυτό δεν σημαίνει έλλειψη υπολογιστικής ισχύος εν τούτοις. Πρώτον, υπάρχει πολύ γρήγορη εκτέλεση των εντολών και δεύτερον, οι περισσότερες από αυτές έχουν παραπάνω χρήσιμες λειτουργίες που αυξάνουν τη χρησιμότητα τους, χωρίς να χάνουν την ευκολία χρήσης τους.

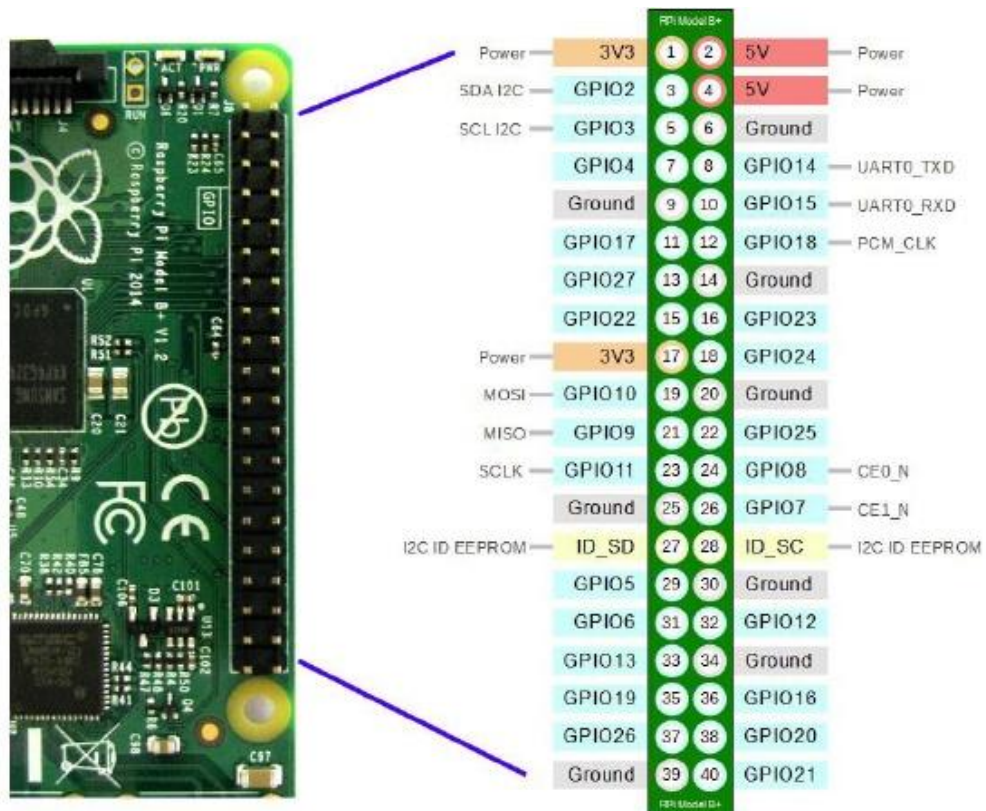
GPIO (General Purpose Input Output)

Γενικά

Οι GPIO ακίδες είναι ψηφιακοί εισοδοι και έξοδοι, που μπορούν παράλληλα να εκτελούν διαφορετικές λειτουργίες. Χρησιμοποιούνται έτσι και για άλλους λόγους, όπως η επικοινωνία με μια περιφερειακή συσκευή. Στο Pi υπάρχει το header που δίνει πρόσβαση σε ορισμένες από τις ακίδες. Στα μοντέλα A και B υπάρχουν 26 Pins ενώ στο B+ 40 pins. Οι ακίδες δέχονται 3.3 V και 16 mA η καθεμία, με εξαίρεση τις ακίδες των 5V, που δέχονται το πολύ 500 mA. Η τροφοδοσία των 5V τραβάει ρεύμα από την τροφοδοσία του micro USB, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ότι απομένει από το ρεύμα που τραβάει η πλακέτα (η συνήθης τροφοδοσία 1A μπορεί να δώσει 300mA). Οι GPIO πρέπει να οριστούν ως έξοδοι ή εισοδοι πριν την χρήση τους και υπάρχουν πολλαπλοί τρόποι για να γίνει κάτι τέτοιο. Ένας τρόπος είναι μέσω της Python. Οι περισσότερες ακίδες του header συνδέονται άμεσα με το Broadcomchip. Είναι σημαντικό να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός και ρύθμιση των στοιχείων που θα συνδεθούν στα pins για να αποφευχθεί μια μόνιμη βλάβη στην πλακέτα. Απλά εργαλεία όπως ένα πολύμετρο και προσεκτικός έλεγχος των καλωδίων και της συνδεσμολογίας καθώς και η χρήση antistatic wrist strap για την αποφυγή στατικού ηλεκτρισμού, εξασφαλίζουν τη σωστή λειτουργία και μακροβιότητα του pi. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι εναλλακτικές λειτουργίες κάθε ακίδας και οι θέσεις του πάνω στο board του B+.



Εικόνα 12: GPIO pins



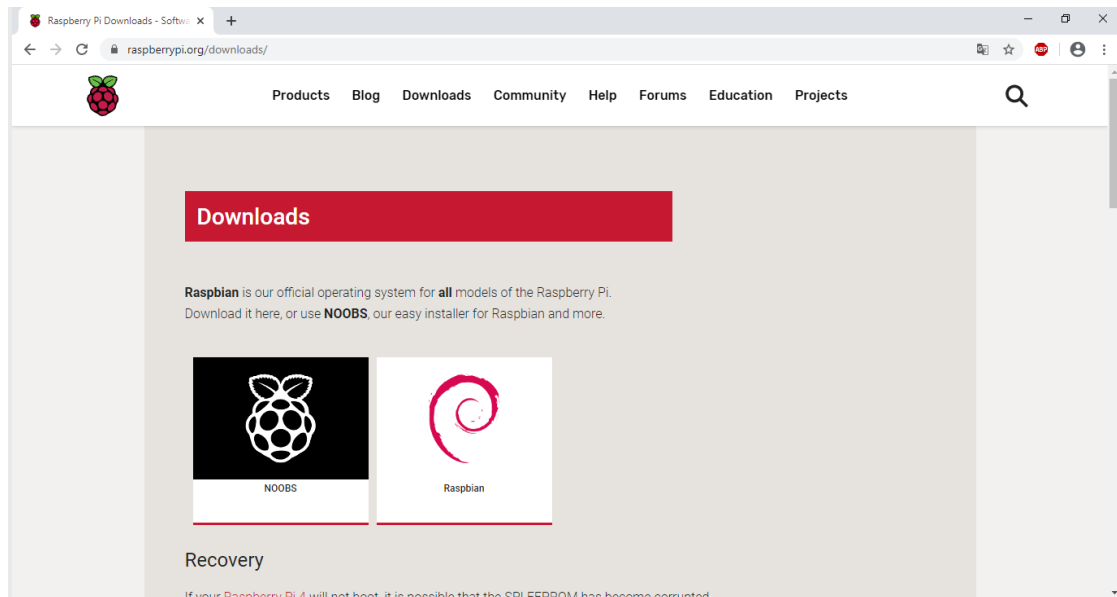
Εικόνα 13: GPIO pins

Κεφάλαιο 5: Λογισμικό Raspbian

Το **Raspbian** είναι ένα λειτουργικό σύστημα για υπολογιστή που βασίζεται στο Debian για το Raspberry Pi. Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του Raspbian, συμπεριλαμβανομένων Raspbian Buster και Raspbian Stretch. Περιλαμβάνει εργαλεία όπως προγραμματισμού σε Python, περιήγησης στο Internet και GUI περιβάλλον εργασίας, το οποίο είναι γνωστό ως “LightweightX11 Desktop Environment” (LXDE εν συντομία). Από το έτος 2015 έχει παρασχεθεί επίσημα από το Ίδρυμα RaspberryPi ως το κύριο λειτουργικό σύστημα για την οικογένεια υπολογιστών Single-board Raspberry Pi. Το Raspbian δημιουργήθηκε από τους Mike Thompson και Peter Green ως ανεξάρτητο έργο. Η αρχική κατασκευή του ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2012. Το λειτουργικό σύστημα βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη. Το λογισμικό αυτό είναι εξαιρετικά βελτιστοποιημένο για τους επεξεργαστές ARM χαμηλής απόδοσης της σειράς Raspberry Pi. Αποτελείται από ένα τροποποιημένο περιβάλλον επιφάνειας εργασίας LXDE όπως αναφέραμε παραπάνω και από τον διαχειριστή παραθύρων Openbox με ένα νέο θέμα και λίγες άλλες αλλαγές. Η διανομή αποστέλλεται με ένα αντίγραφο του προγράμματος υπολογιστικής άλγεβρας Mathematica και μια έκδοση του Minecraft που ονομάζεται Minecraft Pi καθώς και μια ελαφριά έκδοση του Chromium από την τελευταία έκδοση.

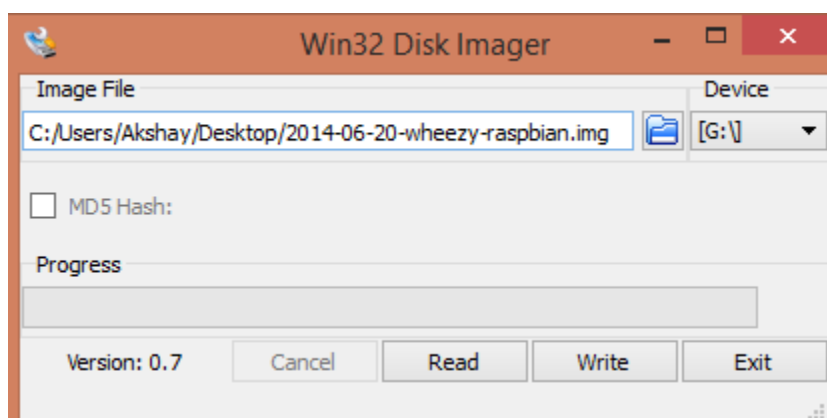
Οδηγίες εγκατάστασης λογισμικού Raspbian

Κατεβάστε το Raspbian από το raspberry.org. Μετά τη λήψη του αρχείου .zip, αποσυμπιέστε το για να πάρετε το αρχείο εικόνας (.img) για εγγραφή στην κάρτα SD σας (16GB Class 10). Τοποθετήστε την κάρτα SD στη συσκευή ανάγνωσης κάρτας SD και ελέγξτε ποιο γράμμα αντιστοιχεί στο δικό σας δίσκο. Μπορείτε να δείτε εύκολα το γράμμα της μονάδας δίσκου, όπως το G:, κοιτάζοντας προς τα αριστερά στη στήλη της εξερεύνησης των Windows. Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε την υποδοχή κάρτας SD αν διαθέτει ο υπολογιστής σας ή έναν οποιοδήποτε αντάπτορα SD σε μια θύρα USB.



Εικόνα 14: Περιβάλλον ιστοσελίδας Raspberry Pi

Κατεβάστε το βοηθητικό πρόγραμμα Win32 Disk Imager από το Sourceforge Project page ως αρχείο .zip. Μπορείτε να το εκτελέσετε αν θέλετε από μια μονάδα USB. Εξαγάγετε το εκτελέσιμο από το αρχείο .zip και εκτελέστε το βοηθητικό πρόγραμμα Win32 Disk Imager, ίσως χρειαστεί να το εκτελέσετε ως διαχειριστής. Κάντε δεξί κλικ στο αρχείο και επιλέξτε εκτέλεση ως διαχειριστής. Επιλέξτε το αρχείο εικόνας που εξάγατε νωρίτερα. Επιλέξτε το γράμμα μονάδας δίσκου της κάρτας SD στο πλαίσιο της συσκευής. Προσέξτε να επιλέξετε τη σωστή μονάδα δίσκου, αν επιλέξετε τη λάθος μονάδα μπορεί να καταστρέψει τα δεδομένα στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή σας. Αν χρησιμοποιήσετε μια υποδοχή κάρτας SD στον υπολογιστή σας και δεν μπορείτε να δείτε το drive στο παράθυρο Win32 Disk Imager, δοκιμάστε να χρησιμοποιήσετε μια εξωτερική μονάδα SD αντάπτορα. Κάντε κλικ στην επιλογή Write και περιμένετε να ολοκληρωθεί η εγγραφή. Βγείτε από το σύστημα απεικόνιση και αφαιρέστε την κάρτα SD.



Εικόνα 15: Περιβάλλον Win32 Disk Imager

BalenaEtcher

Το balenaEtcher είναι ένα γραφικό εργαλείο γραφής SD που λειτουργεί σε λειτουργικά MacOS, Linux και Windows και είναι η πιο εύκολη επιλογή για τους περισσότερους χρήστες. Το balenaEtcher υποστηρίζει επίσης τη γραφή εικόνων απευθείας από το αρχείο .zip, χωρίς να απαιτείται αποσυμπίεση. Για να γράψετε την εικόνα σας με το εργαλείο αυτό : Κατεβάστε την πιο πρόσφατη έκδοση του balenaEtcher και εγκαταστήστε τη. Συνδέστε μια συσκευή ανάγνωσης καρτών SD με την κάρτα SD μέσα. Ανοίξτε το balenaEtcher και επιλέξτε από το σκληρό σας δίσκο το Raspberry Pi.img ή αρχείο .zip που θέλετε να γράψετε στην κάρτα SD. Επιλέξτε την κάρτα SD στην οποία θέλετε να γράψετε την εικόνα σας. Ελέγξτε τις επιλογές σας και κάντε κλικ στο 'Flash' για να αρχίσετε να γράφετε δεδομένα στην κάρτα SD.

VNC

Μερικές φορές δεν είναι βολικό να εργάζεστε άμεσα στο Raspberry Pi. Ίσως θα προτιμούσατε να εργαστείτε με αυτό από άλλη συσκευή. Το VNC είναι ένα γραφικό σύστημα κοινής χρήσης επιφάνειας εργασίας που σας επιτρέπει να ελέγχετε εξ αποστάσεως τη διασύνδεση επιφάνειας εργασίας ενός υπολογιστή από άλλον υπολογιστή ή κινητή συσκευή. Μεταδίδει το πληκτρολόγιο και το ποντίκι ή αγγίζει τα συμβάντα από τον ελεγκτή και λαμβάνει ενημερώσεις στην οθόνη μέσω του δικτύου από τον απομακρυσμένο κεντρικό υπολογιστή. Θα δείτε την επιφάνεια εργασίας του Raspberry Pi μέσα σε ένα παράθυρο στον υπολογιστή σας ή σε μια κινητή συσκευή. Θα μπορείτε να το ελέγξετε σαν να δουλεύατε στο ίδιο το Raspberry Pi.

Ενεργοποίηση του διακομιστή VNC γραφικά

On your Raspberry Pi, boot into the desktop.

Select

Menu > Preferences > Raspberry Pi Configuration > Interfaces.

Ensure **VNC** is **Enabled**.

Enabling VNC Server at the command line

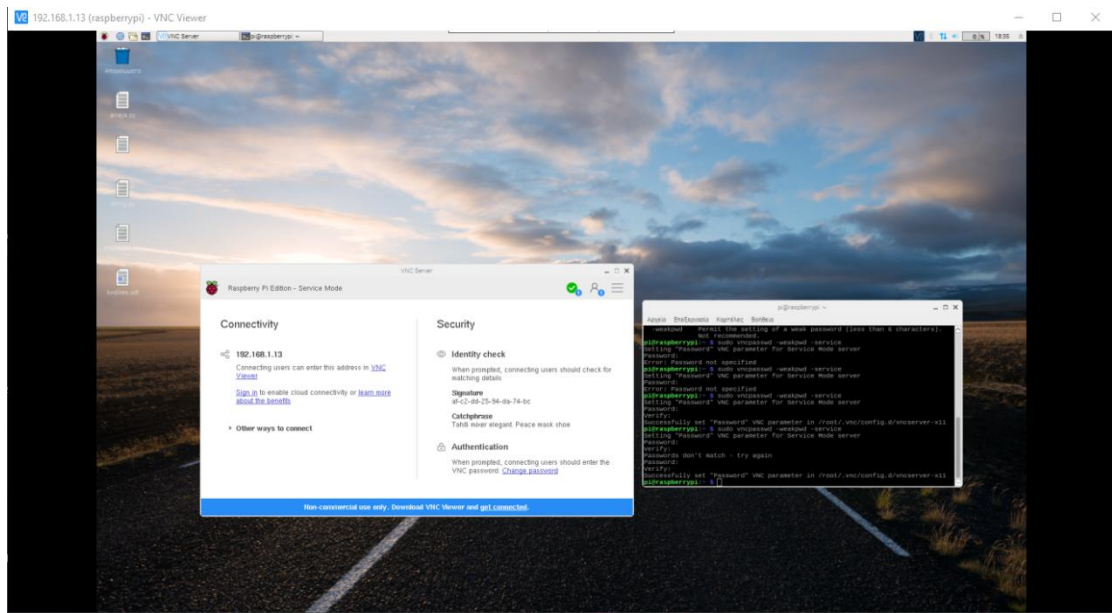
You can enable VNC Server at the command line using raspi-config:

```
sudo raspi-config
```

Now, enable VNC Server by doing the following:

Navigate to **Advanced Options**.

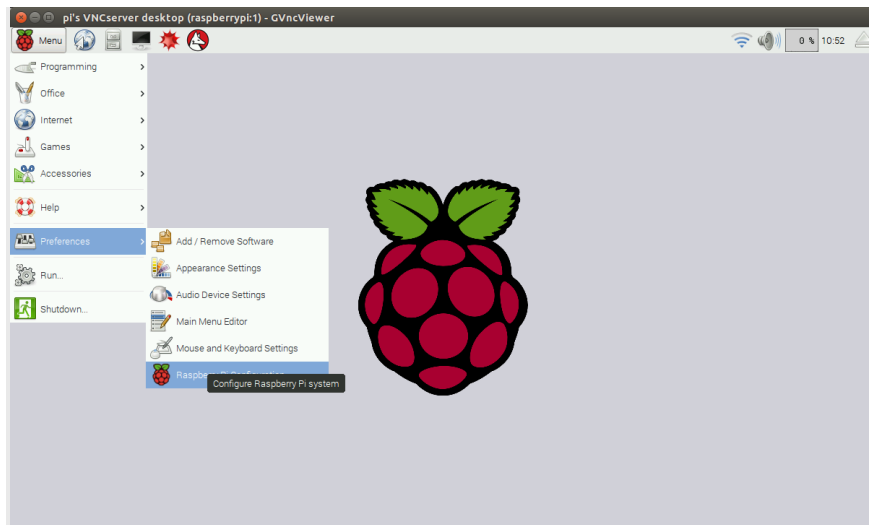
Scroll down and select **VNC > Yes**.



Εικόνα 16: Περιβάλλον επιφάνειας εργασίας Raspberry και ρυθμίσεις VNC

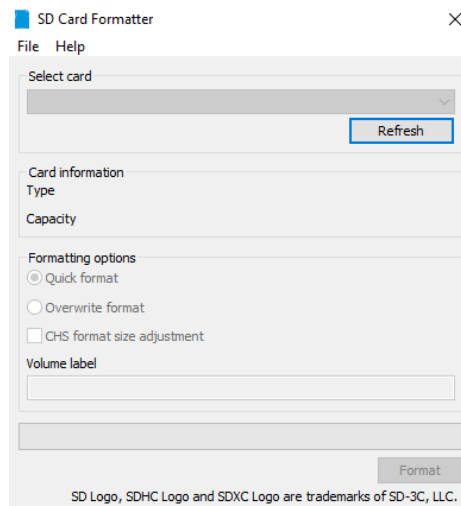
Στο Raspberry Pi (χρησιμοποιώντας Terminal ή μέσω SSH) εκτελέστε `ifconfig` για να ανακαλύψετε την ιδιωτική σας διεύθυνση IP. Αν έχετε γραφική πρόσβαση, μπορείτε εναλλακτικά να κάνετε διπλό κλικ το εικονίδιο VNC στη γραμμή εργασιών σας για να ανοίξετε το παράθυρο διαλόγου ServerVNC. Στην συσκευή που θα χρησιμοποιήσετε για να πάρετε τον έλεγχο, κάντε λήψη του VNCViewer. Για καλύτερα αποτελέσματα, χρησιμοποιήστε τη συμβατή εφαρμογή από το RealVNC. Εισαγάγετε την ιδιωτική διεύθυνση IP του Pi στο VNCViewer.

Αρχική οθόνη Raspbian μετά την εγκατάσταση



Εικόνα 17: Αρχική οθόνη Raspbian

Σε περίπτωση όπου πέσει το λογισμικό κάνουμε format τη κάρτα sd μέσω της εφαρμογής SD Card Formatter. Κατεβάζουμε την εφαρμογή από το site: sdcards.org ως αρχείο .zip. Εξαγάγετε το αρχείο .zip και εκτελέστε το ως διαχειριστής εάν αυτό κριθεί απαραίτητο. Στη συνέχεια ανοίγουμε την εφαρμογή, επιλέγουμε στο πεδίο "select card" την κάρτα sd που επιθυμούμε να κάνουμε format και έπειτα κάνουμε κλικ στο κουμπί Format.



Εικόνα 18: Περιβάλλον SD Card Formatter

Τέλος, εγκαθιστούμε ξανά το λογισμικό του Raspbian στη κάρτα sd μέσω της εφαρμογής Win32DiskImager.

Εντολές γενικού σκοπού του Raspbian

apt-get update: Ενημερώνει την έκδοση του Raspbian.

apt-get upgrade: Αναβαθμίζει όλα τα πακέτα λογισμικού που έχουν εγκατασταθεί.

clear: Διαγράφει την οθόνη τερματικού των εντολών και του κειμένου που εκτελέσατε προηγουμένως.

date: Μας εμφανίζει την τρέχουσα ημερομηνία

sudo date MMDDhhmmYY

MMDDhhmmYY– month month, day day, hour hour, minute

minute and year year.

find / -name example.txt: Ψάχνει όλο το σύστημα για το αρχείο example.txt και εμφανίζει μια λίστα με όλους τους καταλόγους που το περιλαμβάνουν.

nano example.txt: Ανοίγει το αρχείο example.txt με τη χρήση του “Nano”, the **Linux text editor**.

poweroff: Για απενεργοποίηση αμέσως.

raspi-config: Ανοίγει το μενού ρυθμίσεων διαμόρφωσης.

reboot: Για επανεκκίνηση αμέσως.

shutdown -h now: Για απενεργοποίηση αμέσως.

shutdown -h 01:22: Για απενεργοποίηση στις 1:22 AM.

startx: Ανοίγει το GUI (Graphical User Interface).

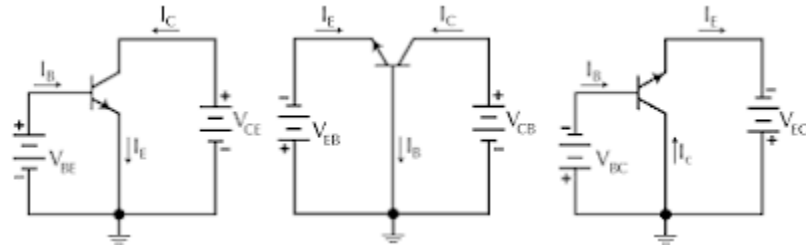
Κεφάλαιο 6: Τρανζίστορ

Διπολικά τρανζίστορ

Το διπολικό τρανζίστορ είναι ένας κρύσταλλος με τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις, δηλαδή τρία διαδοχικά εναλλασσόμενα στρώματα ημιαγωγού υλικού, από τα οποία το ενδιάμεσο υλικό είναι τύπου n ή p. Τα τρανζίστορ αποτελούνται από ένα εκπομπό, μία βάση και ένα συλλέκτη. Ο εκπομπός είναι μια εμπλουτισμένη περιοχή που εκπέμπει φορτία προς τη βάση. Η βάση είναι μια πολύ λεπτή περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη, η οποία επιτρέπει στα περισσότερα φορτία που εκπέμπονται από τον εκπομπό να φθάνουν στο συλλέκτη ο οποίος συλλέγει τα φορτία που καταφθάνουν.

Η λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ στηρίζεται στην εκπομπή φορέων από τον εκπομπό και τη συλλογή τους από τον συλλέκτη. Σε κανονική λειτουργία, η επαφή εκπομπού είναι ορθά πολωμένη και η επαφή συλλέκτη ανάστροφα πολωμένη. Έτσι, ανάλογα με την τιμή βάσης εκπομπού να διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις : όταν είναι $V_{BE} < 0.7$, υπάρχει ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από τον εκπομπό προς τη βάση και ελεύθερων οπών από τη βάση προς τον εκπομπό και όταν γίνει $V_{BE} > 0.7$, υπάρχει ροή ελεύθερων ηλεκτρονίων από τον εκπομπό προς τη βάση και ελεύθερων οπών από τη βάση προς τον εκπομπό. Η επαφή του συλλέκτη μειώνει πολύ το εύρος της βάσης, έτσι υπάρχει αύξηση του ποσοστού των ηλεκτρονίων που δεν θα μείνουν στη βάση αλλά θα εισέλθουν στο χώρο της επαφής του συλλέκτη. Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή φορτίου χώρου του συλλέκτη έχει φορά που ωθεί τα ηλεκτρόνια που έχουν εισέλθει στον συλλέκτη. Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από την επαφή του συλλέκτη και δίνουν το ρεύμα συλλέκτη που συμβολίζεται με I_C . Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που παραμένουν στο χώρο της βάσης, μαζί με τις ελεύθερες οπές που εισέρχονται στην περιοχή του εκπομπού μας δίνουν το ρεύμα βάσης που συμβολίζεται με I_B . Αυτό το ρεύμα προκύπτει από αλληλεξουδετέρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων με ελεύθερες οπές και ονομάζεται και ρεύμα επανασύνδεσης. Στα πιο πολλά τρανζίστορ, περισσότερο από το 95% των φορτίων που εκπέμπονται από τον εκπομπό, φθάνουν στον συλλέκτη και λιγότερο από το 5% παραμένουν στη βάση και συμβάλλουν στο ρεύμα της βάσης. Έτσι, κατανοούμε ότι το ρεύμα συλλέκτη (I_C) είναι περίπου ίσο με το ρεύμα του εκπομπού και το ρεύμα βάσης (I_B) είναι πολύ μικρό. Από τον πρώτο νόμο του Kirchhoff, για τον κόμβο των τρανζίστορ, προκύπτει ότι $I_E = I_B + I_C$ και μέσω του συντελεστή aDC εκφράζεται το ποσοστό των ελεύθερων φορέων του εκπομπού που φτάνει στο συλλέκτη και δίνει το ρεύμα συλλέκτη. Αυτό ορίζεται ως το πηλίκο του ρεύματος του συλλέκτη προς το ρεύμα του εκπομπού, δηλαδή ισχύει ότι $aDC = I_C / I_E$.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι βασικές συνδεσμολογίες από τα διπολικά τρανζίστορ

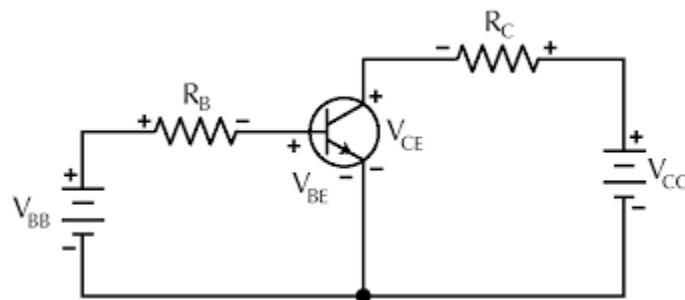


Σχήμα 1: Διπολικά Τρανζίστορ

Στο σχήμα α) λοιπόν παρουσιάζεται η βασική συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (Common Emitter, CE), στην οποία οι βρόγχοι έχουν ως κοινό σημείο τον εκπομπό, ο οποίος και είναι γειωμένος.

Στο δεύτερο σχήμα παρουσιάζεται η βασική συνδεσμολογία κοινής βάσης (Common Base, CB), στην οποία οι βρόγχοι έχουν ως κοινό σημείο τη βάση, η οποία είναι γειωμένη.

Στο τελευταίο σχήμα παρουσιάζεται η βασική συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη (Common Collector, CC), στην οποία οι δύο βρόγχοι έχουν ως κοινό σημείο τους το συλλέκτη, ο οποίος επίσης είναι γειωμένος όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Τέλος, η μεταβολή της συνδεσμολογίας ενός τρανζίστορ από κοινή βάση σε κοινό εκπομπό ή κοινό συλλέκτη, δεν μεταβάλλει την λειτουργία του.



Σχήμα 2: Διπολικό Τρανζίστορ

Οι περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ χωρίζονται σε περιοχή κόρου, ενεργό περιοχή, περιοχή διάσπασης και περιοχή αποκοπής. Η περιοχή κόρου (saturation region) αποτελεί την περιοχή των χαμηλών τάσεων V_{CE} , που το ρεύμα συλλέκτη αυξάνεται απότομα. Στη περιοχή αυτή η διόδος συλλέκτη δεν είναι ανάστροφα πολωμένη. Στη συνέχεια, η ενεργός περιοχή (active region) είναι περιοχή κανονικής λειτουργίας που το V_{CE} να κυμαίνεται από 1 έως 30 V. Σε αυτή τη περιοχή, η διόδος εκπομπού είναι ορθά πολωμένη και ανάστροφα πολωμένη η διόδος του συλλέκτη, όπως επίσης και το ρεύμα συλλέκτη καθορίζεται μόνο από το ρεύμα της βάσης. Η διάταξη αυτή συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος με $I_C = \beta_{DC} * I_B$. Μετά είναι η περιοχή διάσπασης (breakdown region), στην οποία η τάση συλλέκτη έχει υπερβεί την τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού με αποτέλεσμα η διάταξη παύει πλέον να λειτουργεί ως τρανζίστορ. Τέλος, έχουμε τη περιοχή της αποκοπής (cut off region),

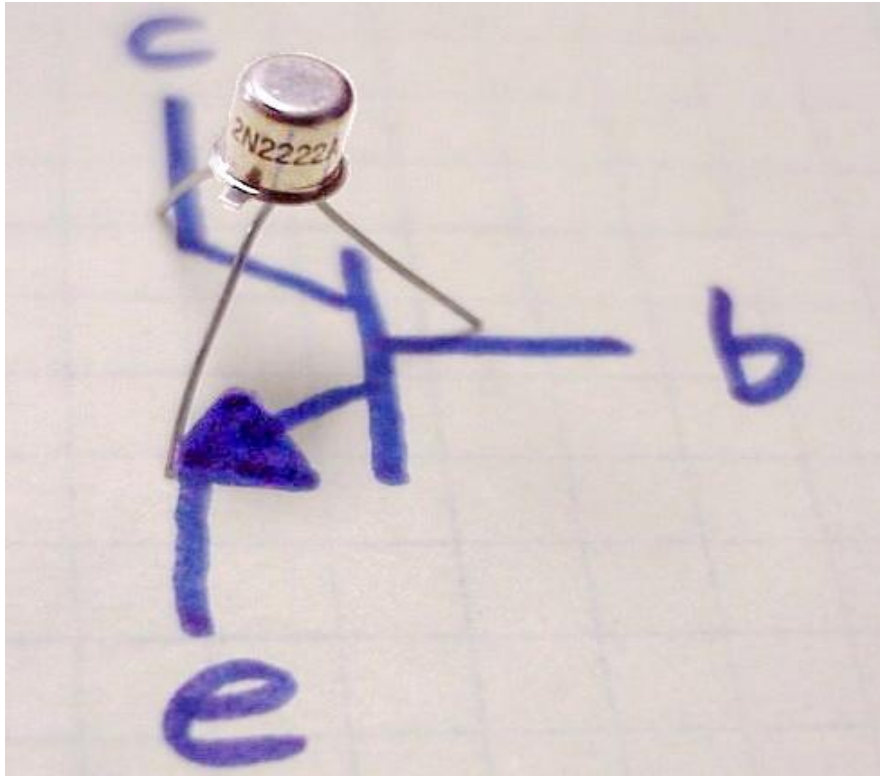
στην οποία αντιστοιχεί σε χαρακτηριστική με ρεύμα βάσης μηδέν και ρεύμα συλλέκτη πολύ μικρό, που ονομάζεται και ρεύμα αποκοπής συλλέκτη.

NPN transistor 2N2222

Το 2N2222 είναι ένα τρανζίστορ διπολικής διακλάδωσης NPN(BJT) το οποίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ενίσχυσης ή εναλλαγής γενικής χρήσης χαμηλής ισχύος. Έχει σχεδιαστεί για χαμηλή και μεσαία τάση, χαμηλή ισχύ, μεσαία τάση και μπορεί να λειτουργεί με μέτρια, υψηλή ταχύτητα. Κατασκευάζεται στο μεταλλικό δοχείο TO-18.

Χρησιμοποιείται συχνά ως τρανζίστορ μικρού σήματος και παραμένει ένα μικρό τρανζίστορ γενικής χρήσης. Το 2N2222 δημιουργήθηκε από τη Motorola το 1962 και από τότε έχει κατασκευαστεί από πολλές εταιρίες ημιαγωγών. Το 2N2222A είναι τρανζίστορ NPN, επομένως ο συλλέκτης και ο πομπός θα παραμείνουν ανοιχτοί (Reverse based) όταν ο πείρος βάσης κρατηθεί στη γείωση και θα κλείσει(προς τα εμπρός προκατειλημμένος) όταν παρέχεται σήμα στον ακροδέκτη βάσης. Το 2N2222A έχει τιμή κέρδους 110 έως 800. Η τιμή αυτή καθορίζει την ικανότητα ενίσχυσης του τρανζίστορ. Η μέγιστη ποσότητα ρεύματος που θα μπορούσε να ρεύσει μέσω του ακροδέκτη Collector είναι 800mA, γι'αυτό δεν μπορούμε να συνδέσουμε φορτία που καταναλώνουν περισσότερα από 800mA με αυτό το τρανζίστορ.

Για να προκαταλάβουμε ένα τρανζίστορ, πρέπει να τροφοδοτήσουμε ρεύμα στην ακίδα βάσης, αυτό το ρεύμα (I_B) θα πρέπει να περιορίζεται στα 5 mA. Όταν αυτό το τρανζίστορ είναι πλήρως προκατειλημμένο τότε μπορεί να επιτρέψει ένα μέγιστο των 800 mA να ρέει πέρα από τον συλλέκτη και τον πομπό. Το συγκεκριμένο στάδιο ονομάζεται Περιφέρεια Κορεσμού και η τυπική τάση που επιτρέπεται σε όλη τη Βάση Εκπομπής (VBE) ή Συλλεκτική Εκπομπή (VCE) θα μπορούσε να είναι 900 και 200 mV αντίστοιχα. Όταν το ρεύμα βάσης αφαιρεθεί, το τρανζίστορ απομακρύνεται πλήρως, αυτό το στάδιο ονομάζεται περιοχή αποκοπής και η τάση της βάσης εκπομπής μπορεί να είναι περίπου 660mV.



Εικόνα 19: Τρανζίστορ 2N2222A

Το τρανζίστορ 2N2222A είναι σχεδόν ίδιο με το τρανζίστορ NP547. Δύο είναι τα χαρακτηριστικά που τα διαχωρίζουν όμως. Το 2N2222A μπορεί να επιτρέψει ρεύμα συλλέκτη μέχρι 800 mA και έχει διαρροή ισχύος 652 mW που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση μεγαλύτερων φορτίων σε σύγκριση με το BC547. Έτσι, αν θέλουμε να βρούμε ένα NPN τρανζίστορ που θα μπορεί να αλλάξει τα φορτία υψηλότερου ρεύματος τότε το 2N2222A είναι μια σωστή επιλογή. Αυτό το τρανζίστορ όπως και κάθε άλλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διακόπτης ή ως ενισχυτής. Η τάση βάση-εκπομπός αυτού του τρανζίστορ είναι 6V, οπότε για να προκαλέσουμε ρεύμα βάσης στο τρανζίστορ πρέπει να τροφοδοτήσουμε αυτήν την τάση στη βάση και στον πομπό του. Το τρανζίστορ θα το κάνει προς τα εμπρός προκατειλημμένο και έτσι θα η σύνδεση μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού θα κλείσει. Ωστόσο, κάτι σημαντικό που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι η βασική αντίσταση a.k.a για την τρέχουσα αντίσταση περιορισμού. Όπως υποδηλώνει η ονομασία της, αυτή η αντίσταση θα περιορίσει το ρεύμα που ρέει στο τρανζίστορ για να μην υπάρξει βλάβη. Η τιμή για αυτή την αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον τύπο $R_B = V_{BE} / I_B$.

Τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (JFET)

Το τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (Junction Field Effect Transistor, JFET) είναι ένα μονοπολικό τρανζίστορ, η λειτουργία του οποίου βασίζεται σε ένα είδος φορέων, δηλαδή σε ηλεκτρόνια ή σε οπές, σε σχέση με το διπολικό τρανζίστορ το οποίο βασίζει τη λειτουργία του και στα δύο είδη φορέων.

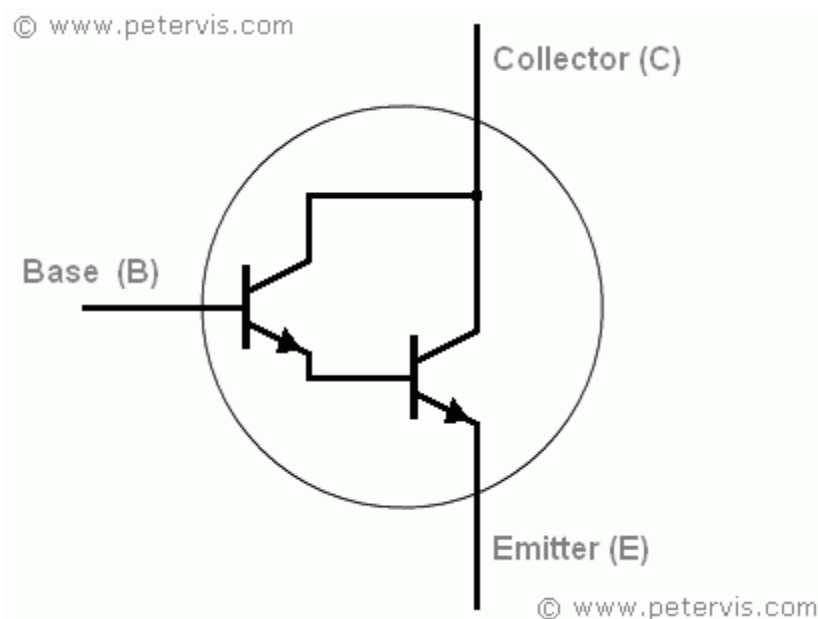
Η κατασκευή ενός JFET περιλαμβάνει την επιλογή ενός βασικού ημιαγωγού τμήματος ορισμένου τύπου, όπως τύπου-n, στις δύο πλευρές του οποίου προστίθενται περιοχές αντίθετου τύπου, δηλαδή τύπου-p. Η συγκέντρωση των προσμίξεων στις προστιθέμενες περιοχές (τύπου-p) είναι μεγαλύτερες από του βασικού τμήματος. Έτσι, κάθε μια από τις προστιθέμενες περιοχές (τύπου-p) ονομάζεται πύλη (gate). Στη συνέχεια στη κατασκευή ενός JFET, τα δύο άκρα του βασικού ημιαγωγού (τύπου-n) ονομάζονται αντίστοιχα πηγή (source) και απαγωγός (drain), ενώ το τμήμα του που βρίσκεται ανάμεσα στις πύλες ονομάζεται κανάλι ή διάυλος (channel). Ο τύπος του JFET εξαρτάται από τον τύπο ημιαγωγού του καναλιού, για παράδειγμα JFET n-καναλιού ή JFET p-καναλιού. Έτσι, ένα JFET μπορεί να έχει μια ή δύο πύλες, αλλά περισσότερο χρησιμοποιούνται οι διατάξεις με μια πύλη.

Η λειτουργία, ενός JFET μιας πύλης βασίζεται στην επαφή πύλης και καναλιού. Χάρη στη περιοχή φορτίου χώρου της επαφής μειώνεται η διατομή του καναλιού και μεταβάλλεται η αντίστασης του. Με τον τρόπο αυτό, μέσω της ανάστροφης πόλωσης της διόδου πύλης είναι δυνατή η ρύθμιση του εύρους της περιοχής φορτίου χώρου της επαφής καθώς και ο έλεγχος της αντίστασης του καναλιού και του ρεύματος που διαρρέει το JFET. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επίδραση πεδίου.

Darlington Transistor

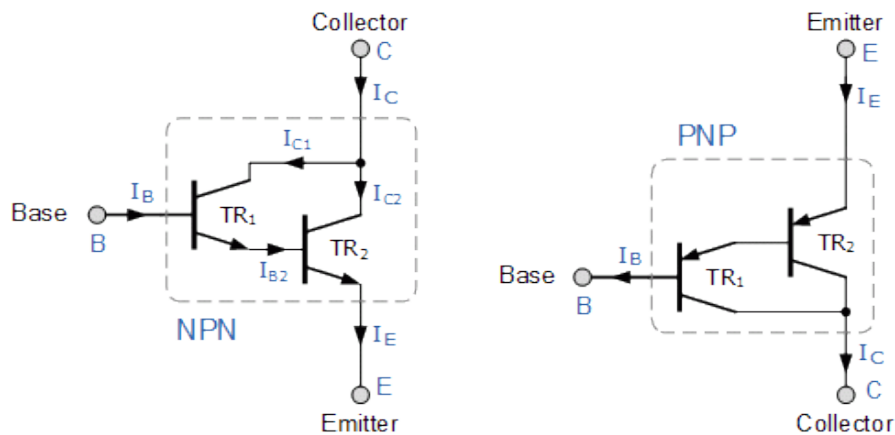
Το Darlington Transistor, που πήρε την ονομασία του από τον εφευρέτη του Sidney Darlington, είναι μια ειδική διάταξη δύο τρανζίστορ διπολικής σύνδεσης είτε NPN είτε PNP. Έτσι, για τη λειτουργία του ο εκπομπός ενός τρανζίστορ συνδέεται με τη βάση του άλλου προκειμένου να παράγει ένα πιο ευαίσθητο τρανζίστορ με πολύ μεγαλύτερο κέρδος ρεύματος, το οποίο είναι χρήσιμο σε εφαρμογές όπου απαιτείται ενίσχυση ή εναλλαγή ρεύματος. Τα ζεύγη των Darlington τρανζίστορ μπορούν να κατασκευαστούν από δύο μεμονωμένα συνδεδεμένα διπολικά τρανζίστορ ή από μια συσκευή που κατασκευάζεται εμπορικά σε ένα ενιαίο πακέτο το οποίο περιέχει τα βασικά καλώδια σύνδεσης Base, Emitter και Collector τα οποία είναι διαθέσιμα σε μια μεγάλη ποικιλία στυλ και τάσης τόσο σε εκδόσεις NPN όσο και PNP.

Το Darlington τρανζίστορ είναι πολύ σημαντικό, διότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως απλός διακόπτης, ως ενισχυτής και επίσης ως διακόπτης ON-OFF. Για τη λειτουργία του ως διακόπτης ξεκινάμε όταν η βάση του τρανζίστορ NPN είναι γειωμένη στα 0 volt και δεν υπάρχει ρεύμα βάσης, το I_b ρέει, αλλά δεν ρέει ρεύμα από τον πομπό προς τον συλλέκτη και επομένως το τρανζίστορ είναι απενεργοποιημένο (OFF). Αν η βάση είναι προς τα εμπρός προκατειλημμένη κατά περισσότερο από 0,7 volt, ένα ρεύμα θα ρέει από τον πομπό προς τον συλλέκτη και το τρανζίστορ τότε είναι ενεργοποιημένο (ON). Έτσι, σε αυτές τις δύο περιπτώσεις το τρανζίστορ λειτουργεί ως διακόπτης.



Σχήμα 3: Darlington Transistor

Στη περίπτωση αυτή, το πρόβλημα είναι πως το τρανζίστορ βάσης πρέπει να μετατραπεί μεταξύ του μηδενός και κάποιας μεγάλης θετικής τιμής, προκειμένου να γίνει κορεσμένο το τρανζίστορ στο οποίο ένα αυξημένο ρεύμα βάσης I_B ρέει στη συσκευή που αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα συλλέκτη I_C να γίνει μεγάλο ενώ το ρεύμα V_{CE} είναι μικρό. Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να δούμε ότι ένα μικρό ρεύμα στη βάση μπορεί να ελέγξει ένα πολύ μεγαλύτερο ρεύμα που ρέει μεταξύ του συλλέκτη και του πομπού. Ο λόγος του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα της βάσης (β) είναι γνωστός ως το τρέχον κέρδος που έχει το τρανζίστορ. Μια συνηθισμένη και τυπική τιμή του β για ένα πρότυπο διπολικό τρανζίστορ μπορεί να κυμαίνεται από 50 έως 200 και ποικίλλει ακόμη και μεταξύ τρανζίστορ με τον ίδιο αριθμό εξαρτήματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, όπου το κέρδος ενός μόνο τρανζίστορ είναι πολύ χαμηλό για να κατευθύνει άμεσα ένα φορτίο, ένας από τους καλύτερους τρόπους προκειμένου να αυξηθεί το κέρδος είναι η χρήση ενός ζεύγους Darlington. Μια διάταξη Darlington Transistor, επίσης γνωστή και ως ζεύγος Darlington ή super-alpha, αποτελείται από δύο τρανζίστορ NPN ή PNP, συνδεδεμένα μεταξύ τους κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το ρεύμα εκπομπού του πρώτου τρανζίστορ TR1 να γίνει το ρεύμα βάσης του δεύτερου τρανζίστορ TR2. Εν συνεχεία, το τρανζίστορ TR1 συνδέεται ως ο ακόλουθος εκπομπός και το TR2 ως ένας κοινός ενισχυτής εκπομπός όπως θα φανεί και στο σχήμα το οποίο ακολουθεί.



Σχήμα 4: Ζεύγος Darlington

Πανομοιότυπα Darlington Transistor

Σύμφωνα με τον τύπο $I_C = (\beta_2 * I_B)$, δύο πανομοιότυπα τρανζίστορ, το β_2 χρησιμοποιείται αντί για το β ενεργώντας σαν ένα μεγάλο τρανζίστορ με ένα πολύ μεγάλο κέρδος. Τα ζεύγη Darlington τρανζίστορ με τρέχοντα κέρδη άνω των χιλίων με μέγιστα ρεύματα συλλέκτη αρκετών αμπερ είναι εύκολα διαθέσιμα. Έτσι, για παράδειγμα το NPN TIP120 ισοδυναμεί με το TIP125. Το πλεονέκτημα της χρήσης μια τέτοιας διάταξης είναι ότι το τρανζίστορ μεταγωγής είναι πολύ πιο ευαίσθητο καθώς μόνο ένα μικρό ρεύμα βάσης είναι απαραίτητο για την αλλαγή ενός πολύ μεγαλύτερου φορτίου γιατί το τυπικό κέρδος μιας διάταξης Darlington μπορεί να είναι πάνω από 1.000 ενώ κανονικά ένα απλό μπορεί να παράξει κέρδος που να κυμαίνεται από 50 έως 200. Ως εκ τούτου, μπορούμε να δούμε ότι ένα ζεύγος Darlington με κέρδος 1000:1, θα μπορούσε να αλλάξει ένα ρεύμα εξόδου 1A στο κύκλωμα συλλέκτη-εκπομπού με ένα ρεύμα βάσης εισόδου μόλις 1mA. Αυτή η διαδικασία κάνει το τρανζίστορ Darlington ιδανικό για διασύνδεση με ρελέ, λαμπτήρες και μοτέρ με μικροελεγκτή χαμηλής ισχύος, καθώς και ηλεκτρονικούς ή λογικούς ελεγκτές όπως φαίνεται.

Εφαρμογές Darlington Transistor

Η βάση ενός Darlington είναι επαρκώς ευαίσθητη για να ανταποκριθεί σε οποιοδήποτε μικρό ρεύμα εισόδου από ένα διακόπτη ή απευθείας από μια λογική πύλη TTL ή 5V CMOS. Το μέγιστο ρεύμα συλλέκτη I_{Cmax} για κάθε ζεύγος Darlington είναι το ίδιο με αυτό για το κύριο τρανζίστορ, το TR2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λειτουργία ρελέ, κινητήρες συνεχούς ρεύματος, λαμπτήρων κλπ.

Ένα από τα μειονεκτήματα ενός ζεύγους τρανζίστορ Darlington είναι η ελάχιστη πτώση τάσης μεταξύ της βάσης και του πομπού όταν είναι πλήρως κορεσμένη. Σε αντίθεση με ένα απλό τρανζίστορ που έχει μια κορεσμένη πτώση τάσης μεταξύ 0.3V και 0.7V όταν είναι πλήρως ενεργοποιημένη, μια συσκευή Darlington έχει διπλάσια πτώση τάσης βάσης - εκπομπού (1.2V αντί 0.6V). Αυτό οφείλεται στο ότι η πτώση βάσης - εκπομπού των δύο μεμονωμένων τρανζίστορ μπορεί να είναι μεταξύ 0.6V και 1.5V ανάλογα με το ρεύμα μέσω του τρανζίστορ. Αυτή η πτώση τάσης βάσης - εκπομπού σημαίνει ότι το τρανζίστορ Darlington είναι πιθανό να πάρει θερμότερο από ένα κανονικό διπολικό τρανζίστορ για ένα δεδομένο ρεύμα φορτίου και ως εκ τούτου απαιτεί καλή βύθιση θερμότητας. Επιπλέον, τα Darlington τρανζίστορ έχουν πιο αργούς χρόνους απόκρισης ON-OFF, διότι απαιτείται για το τρανζίστορ TR1 να μετατρέψει το κύριο τρανζίστορ TR2 είτε πλήρως είτε απενεργοποιημένο.

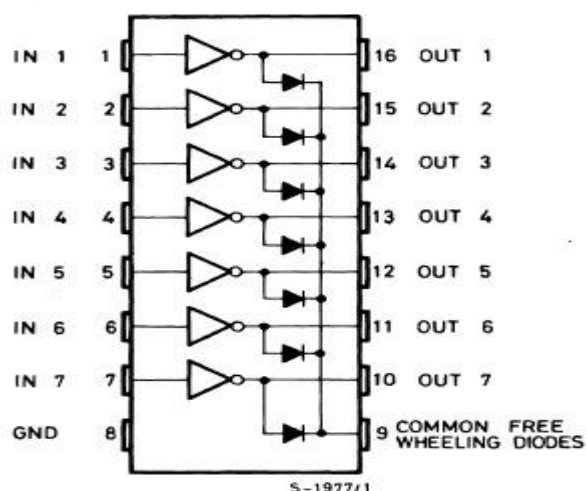
Για να ξεπεραστεί η αργή απόκριση, η αυξημένη πτώση τάσης και τα θερμικά προαναφερθέντα θερμικά μειονεκτήματα μιας διάταξης Darlington τρανζίστορ, συμπληρωματικά τρανζίστορ NPN και PNP, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια διάταξη προκειμένου να παράγουν ένα άλλο τύπο τρανζίστορ Darlington που είναι ευρέως γνωστό ως διαμόρφωση Sziklai.

Darlington Transistor IC's

Στις πιο πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές αρκεί το κύκλωμα ελέγχου να μεταβάλλει απευθείας την τάση εξόδου DC ή το ρεύμα ON ή OFF, καθώς και ορισμένες συσκευές εξόδου, όπως οι οδηγήσεις ή οι οθόνες απαιτούν μονάχα λίγα mA για να λειτουργούν σε χαμηλές τάσεις DC. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μπορούν να οδηγούνται απευθείας από την έξοδο μιας τυποποιημένης λογικής πύλης. Παρά όλα αυτά, όπως παρατηρήθηκε και παραπάνω, πολλές φορές απαιτείται περισσότερη ισχύς για τη λειτουργία συσκευής εξόδου, όπως είναι ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος, ο οποίος μπορεί να τροφοδοτηθεί από μια συνηθισμένη λογική πύλη ή από έναν μικροελεγκτή.

Στην περίπτωση, όπου η ψηφιακή λογική πύλη δεν είναι σε θέση να τροφοδοτήσει αρκετό ρεύμα, τότε θα χρειαστούν πρόσθετα κυκλώματα για να οδηγηθεί η συσκευή. Ένα τέτοιο χρησιμοποιούμενο τρανζίστορ Darlington είναι η σειρά ULN2003. Η οικογένεια συστοιχιών Darlington αποτελείται από ULN2002A, ULN2003A και ULN2004A, τα οποία είναι όλα συστοιχίες Darlington υψηλής τάσης, όπου το καθένα περιέχει επτά ζεύγη ανοικτού συλλέκτη Darlington μέσα σε ένα ενιαίο πακέτο IC. Κάθε κανάλι της συστοιχίας βαθμολογείται στα 500 mA και είναι ικανό να αντέξει ρεύματα αιχμής έως και 600 mA καθιστώντας το ιδανικό για τον έλεγχο μικρών κινητήρων ή λαμπτήρων ή των πυλών και βάσεων των ημιαγωγών υψηλής ισχύος. Πρόσθετες διόδους καταστολής συμπεριλαμβάνονται για την επαγωγική κίνηση φορτίου και οι εισοδοί ακουμπούν απέναντι από τις εξόδους για να απλοποιήσουν τις συνδέσεις και τη διάταξη του πίνακα.

Το ULN2003A είναι μια χαμηλού κόστους μονοπολική συστοιχία τρανζίστορ Darlington με υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας χρήσιμη την οδήγηση ευρέος φάσματος φορτίων, συμπεριλαμβανομένων των DC Motors και των LED ή των λαμπτήρων πυράκτωσης. Το ULN2003A περιέχει επτά ζεύγη τρανζίστορ Darlington με καθένα από ένα ακροδέκτη εισόδου και ένα ακροδέκτη εξόδου απέναντι από αυτό όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 5: ULN2003A

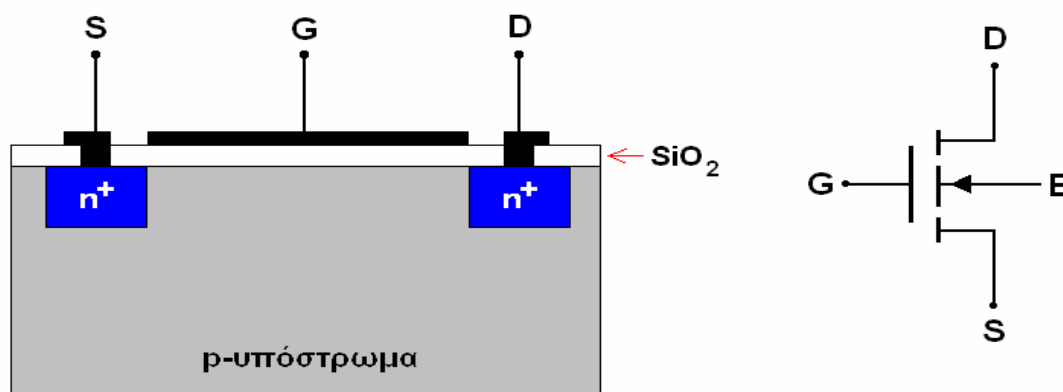
MOS Transistor

Τα MOS ή MOFSET τρανζίστορ είναι απομονωμένης εισόδου. Έχουν χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε σύγκριση με τα διπολικά τρανζίστορ, που αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι πιο αργά στην ταχύτητα λειτουργίας τους. Ακόμα, οι διαστάσεις κατασκευής τους, σε ολοκληρωμένη μορφή, είναι πιο μικρές σε σχέση με τα διπολικά και αυτό τα κάνει πιο ελκυστικά για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Το MOS τρανζίστορ αποτελείται από τρία υλικά: μέταλλο, οξείδιο και ημιαγωγό γεγονός που αιτιολογεί και την ονομασία του ως MOFSET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Είναι χωρισμένα σε δύο κατηγορίες τα NMOS και τα PMOS, όπου αποτελούνται εξίσου από 4 ακροδέκτες Gate (G), Source (S), Drain (D) και Bulk (B). Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των MOFSET είναι η ακόλουθη: Η δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου μέσω εφαρμογής μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής, δημιουργεί MOFSET προσαύξησης ή τροποποιεί στο MOFSET διακένωσης ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτόν του υποβάθρου και ταυτόσημο με αυτό των διαχύσεων σε πηγή και αγωγό.

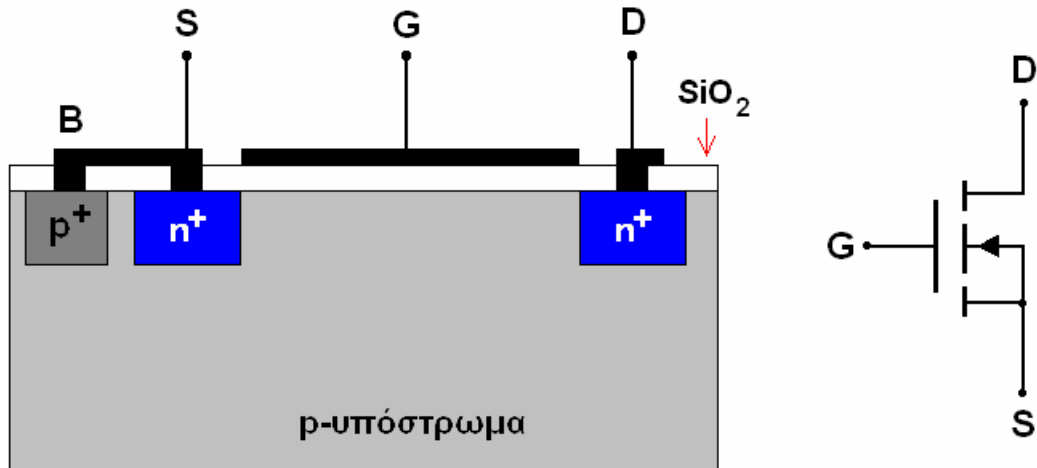
Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του MOFSET είναι: η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η δυνατότητα κατασκευής με διεργασία επίπεδης διαστρωμάτωσης υλικών (planar process), η μεγάλη αντίσταση εισόδου της τάξης των 10^{14} Ohm και οι πολύ μικρές διαστάσεις του όπου χρειάζεται μόλις το 20% περίπου της επιφάνειας που απαιτείται για ένα BIT.

Η τεχνολογία σήμερα δίνει την δυνατότητα κατασκευής NMOS και PMOS τρανζίστορ πάνω στο ίδιο υπόστρωμα. Το αποτέλεσμα αυτής της τεχνολογίας ονομάζεται CMOS (Complementary MOS). Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί υπόστρωμα τύπου-n, τότε αυτό προσφέρεται για την άμεση υλοποίηση PMOS τρανζίστορ. Για την υλοποίηση των NMOS τρανζίστορ δημιουργείται μια τάφρος όπου προστίθενται προσμίξεις τύπου-p. Κατά την υλοποίηση δημιουργούνται μεταξύ των δύο αυτών τύπων τρανζίστορ περιοχές απομόνωσης για αποφυγή ανεπιθύμητων επιδράσεων. Από τις χαρακτηριστικές εξόδου αντιλαμβανόμαστε ότι τα NMOS τρανζίστορ σε σχέση με τα PMOS τρανζίστορ υπερτερούν ως προς την ενίσχυση και την αντίσταση εξόδου.



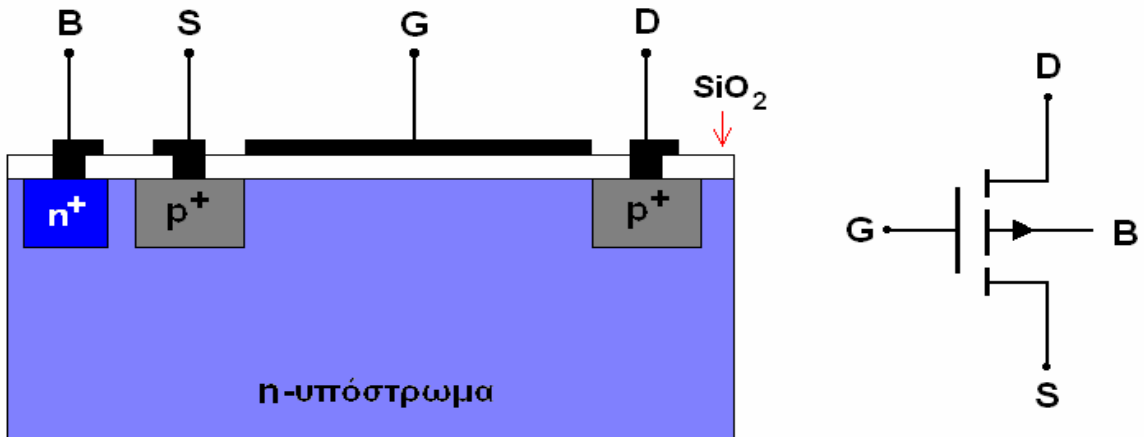
Σχήμα 6: MOS προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS) με το σύμβολό του.

Για παράδειγμα σε μια δομή όπως αυτή του σχήματος 6 παραπάνω όπου η πηγή (S) και ο απαγωγός (D) είναι n-τύπου και το υπόστρωμα p-τύπου, το κανάλι αναστροφής που θα σχηματιστεί μεταξύ πηγής και απαγωγού με την εφαρμογή κατάλληλης διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής θα είναι n-τύπου. Έτσι δημιουργείται ένας δίαυλος που επιτρέπει τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού. Η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της πύλης και του σώματος του υποστρώματος (που συνήθως το υπόστρωμα βραχυκυκλώνεται με την πηγή όπως φαίνεται στο σχήμα 7) διαμορφώνει την αγωγιμότητα του καναλιού ελέγχοντας έτσι τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.

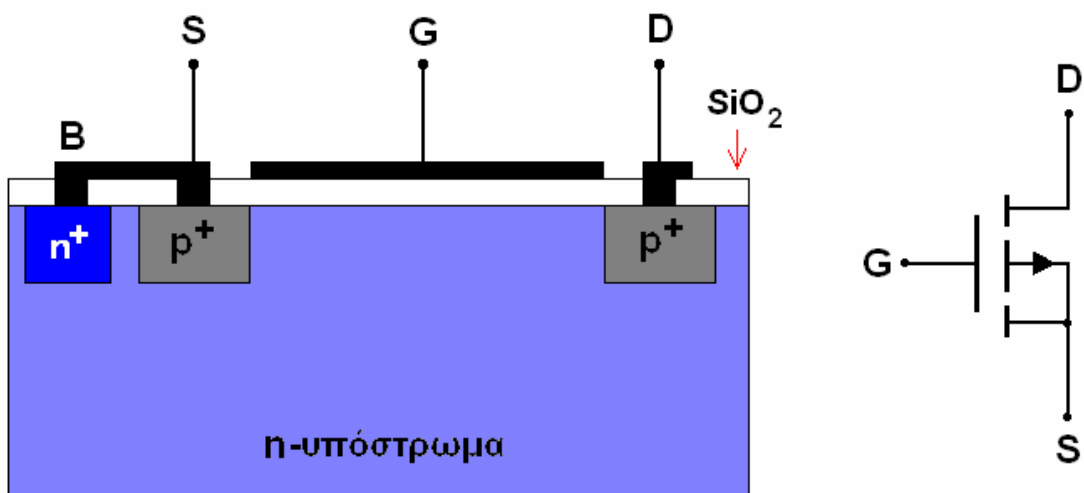


Σχήμα 7: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS) με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του.

Οι δομές που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 6 και 7 είναι κατάλληλες για τη λειτουργία ενός MOSFET ως MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Αντίστοιχα οι δομές των σχημάτων 8 και 9 είναι κατάλληλες για λειτουργία ως MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS).

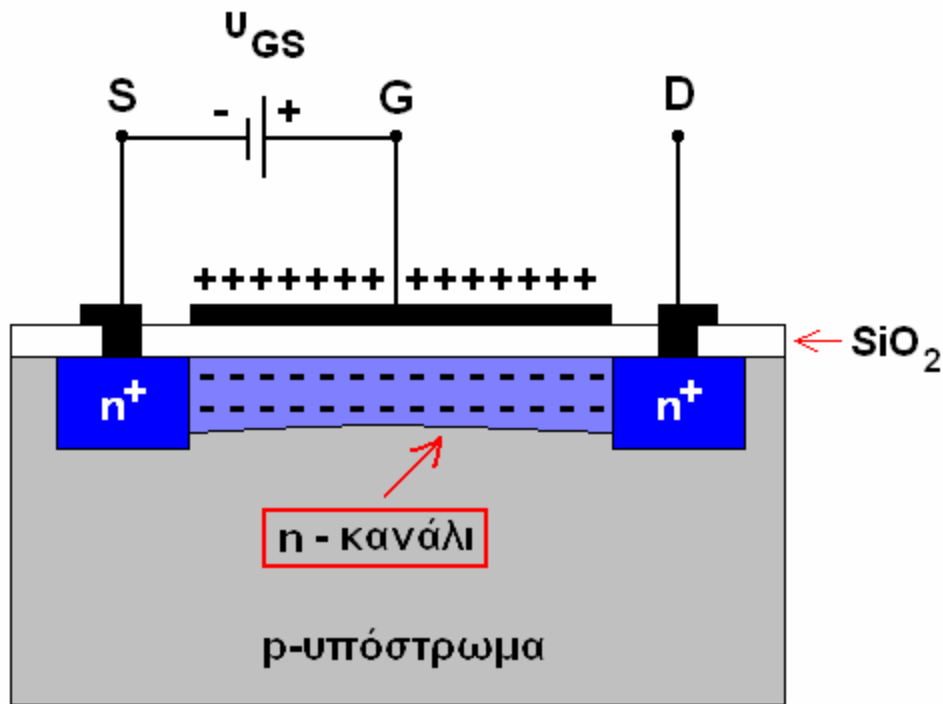


Σχήμα 8: MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS) με το σύμβολό του.



Σχήμα 9: MOSFET προσαύξησης p-καναλιού (enhancement PMOS) με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του.

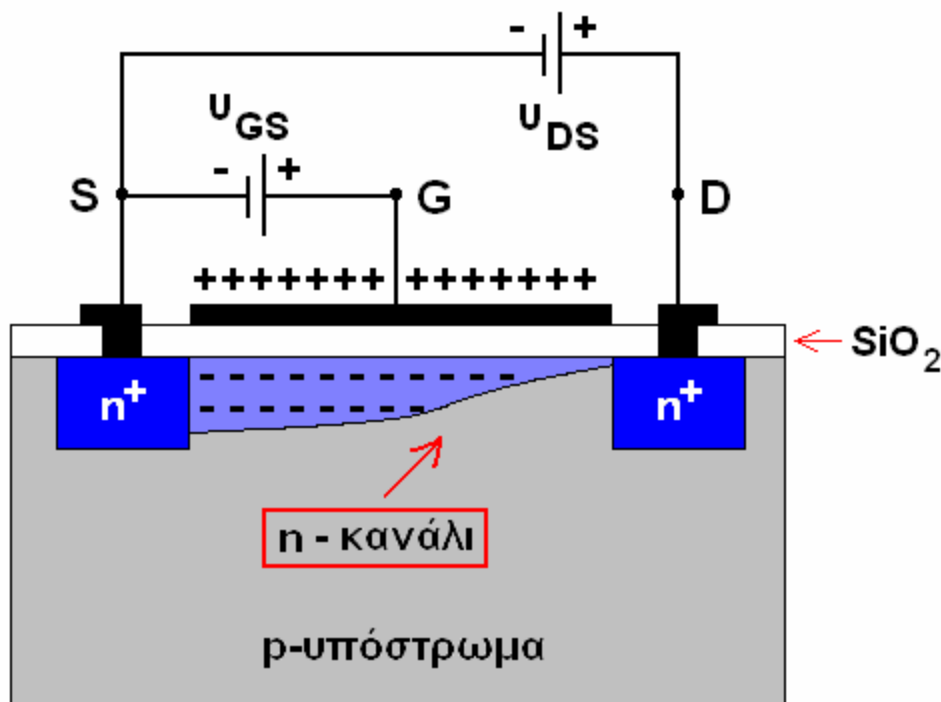
Παρακάτω στο σχήμα 10 θα παρουσιαστεί η δημιουργία ενός καναλιού αναστροφής n-τύπου μέσα σε ένα υπόστρωμα p-τύπου, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός n-διαύλου που θα ενώσει τις n +- τύπου περιοχές της πηγής και του απαγωγού. Αν στην πύλη δεν εφαρμοστεί δυναμικό τότε δεν υπάρχει n-διάυλος και οι n +- τύπου περιοχές της πηγής και του απαγωγού θα χωριστούν από το p-τύπου υλικό του υποστρώματος. Το μονωτικό οξείδιο και η μεταλλική πύλη δημιουργούν έναν πυκνωτή. Όταν η πύλη αποκτήσει θετικό δυναμικό πιο υψηλό από αυτό της πηγής, τότε μαζεύονται στην πύλη θετικά φορτία όπου έλκουν ηλεκτρόνια από το p-υπόστρωμα προς την διεπιφάνεια με το οξείδιο απωθώντας τις οπές. Όταν η συγκέντρωση των αρνητικών φορτίων ξεπεράσει την συγκέντρωση των οπών του p-υποστρώματος τότε ακολουθεί η αναστροφή του τύπου αγωγιμότητας και σχηματίζεται ένας ομοιογενής διάυλος τύπου n στο p-υπόστρωμα.



**Σχήμα 10: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS).
Δημιουργία του n-καναλιού όταν η θετική τάση u_{GS} ξεπεράσει τη τιμή
κατωφλίου V_T .**

Σε περίπτωση που ο απαγωγός έρθει σε θετικό δυναμικό σε σχέση με την πηγή θα παρατηρήσουμε ροή ρεύματος ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό και επειδή το ρεύμα κατά μήκος της αντίστασης του διαύλου παρουσιάζει πτώση τάσης, τότε το σχήμα του διαύλου θα τροποποιηθεί και θα παρατηρήσουμε μία συρρίκνωση ως προς την περιοχή του απαγωγού.

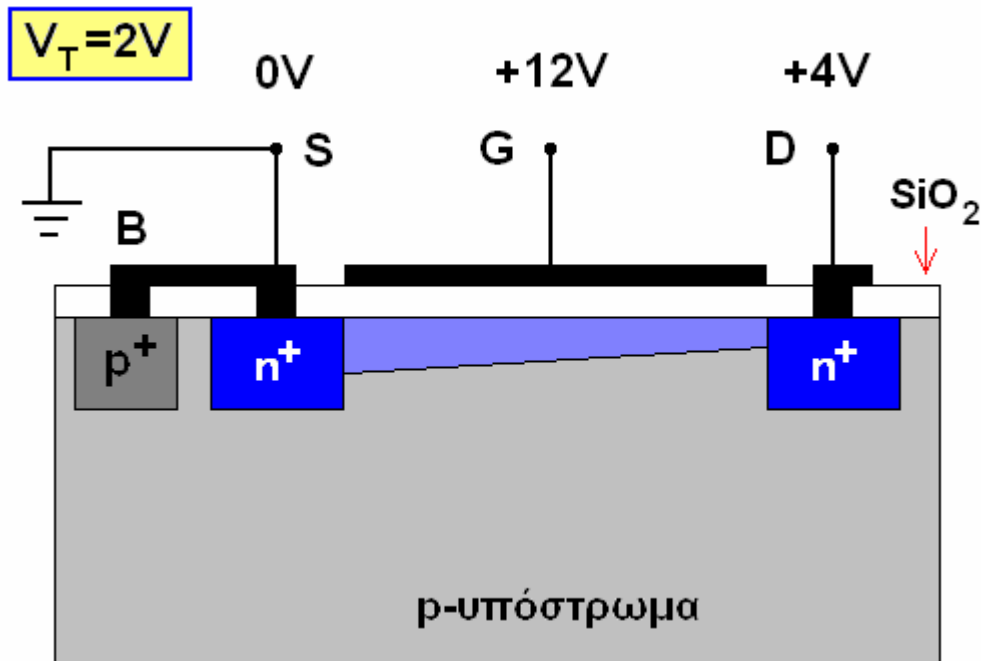
Αν με τη μεταβλητή x συμβολίσουμε την απόσταση ενός σημείου του διαύλου από την πηγή τότε το δυναμικό του σημείου αυτού με αναφορά το δυναμικό της πηγής θα είναι u_{XS} . Καθώς κινούμαστε από την πηγή προς τον απαγωγό το δυναμικό u_{XS} των σημείων του διαύλου αυξάνεται. Για να συντηρείται δίαυλος σε κάποια θέση x μεταξύ πηγής και απαγωγού τότε πρέπει η διαφορά δυναμικού u_{GX} να είναι τουλάχιστον ίση ή να ξεπερνά το δυναμικό κατωφλίου V_T .



Σχήμα 11: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Τροποποίηση της μορφής του καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού u_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής.

Το δυναμικό διατήρησης διαύλου V_{dd} ορίζεται από τον τύπο $v_{dd} = u_{gx} - v_t$ και είναι το μέγεθος το οποίο δείχνει κατά πόσο σε κάποιο σημείο μεταξύ της πηγής και του απαγωγού συντηρείται η αναστροφή τύπου αγωγιμότητας. Στα σημεία όπου το δυναμικό αυτό είναι θετικό ο n-δίαυλος συντηρείται σε αντίθεση με τα σημεία όπου το δυναμικό γίνεται αρνητικό όπου ο δίαυλος δεν υπάρχει. Μη κορεσμένη ονομάζεται η αγωγιμότητα όπου ο δίαυλος διατηρείται σε όλο το μήκος από την πηγή στον απαγωγό. Το ρεύμα i_d που ρέει εξαρτάται από την u_{ds} και u_{gs} και όσο αυτά τα δύο

αυξάνονται τότε αυξάνεται και αυτό. Ως κορεσμένη ονομάζεται η αγωγιμότητα όπου ο δίαυλος κλείνει από ένα σημείο έως τον απαγωγό. Σε αυτήν την περίπτωση το ρεύμα είναι ανεξάρτητο της διαφοράς δυναμικού u_{ds} και εξαρτάται μόνο από το u_{gs} . Όταν ο δίαυλος δεν σχηματίζεται καθόλου δηλαδή $u_{GS} < V_T$, τότε λέμε ότι το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή και το ρεύμα είναι ίσο με μηδέν.



Σχήμα 12: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Κατάσταση μη-κορεσμένης αγωγιμότητας (non-saturated conduction).

Από το σχήμα αποδεικνύεται ότι ο δίαυλος δεν κλείνει σε κάποιο σημείο ανάμεσα στον απαγωγό και την πηγή και έτσι με τη βοήθεια της έννοιας του δυναμικού διατήρησης διαύλου, χαρακτηρίζουμε την αγωγιμότητα ως Μη-κορεσμένη.

Η εξίσωση 1 για μεγαλύτερη ευκολία μπορεί να γραφεί ως εξής:

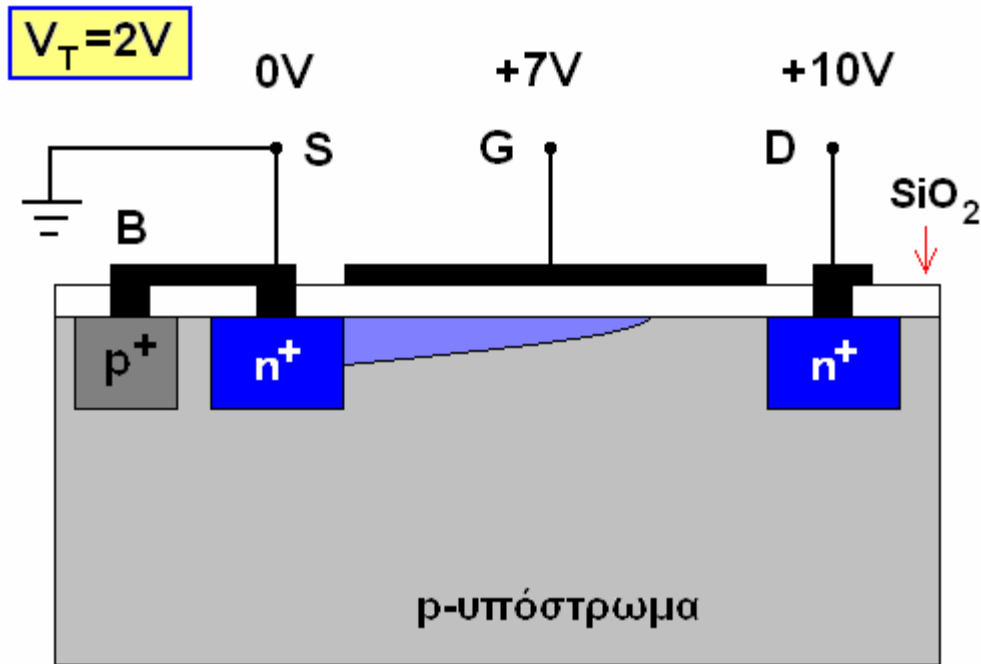
$$V_{\delta\delta} = u_{GX} - V_T = u_{GS} - u_{XS} - V_T$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης 2 για τα δύο άκρα του εν δυνάμει διαύλου δίνει τα εξής αποτελέσματα:

ΑΚΡΟ ΠΗΓΗΣ $\square V_{\delta\delta} = u_{GX} - V_T = u_{GS} - u_{XS} - V_T =$
 $12 - 0 - 2 = 10V$

ΑΚΡΟ ΑΠΑΓΩΓΟΥ $\square u_{GX} = u_{GS} - u_{XS} = V_{GS} - V_{DS} = 12 - 4 = 8V$
 $V_{\delta\delta} = u_{GX} - V_T = 8 - 2 = 6V$

Παρατηρούμε ότι και στα δύο άκρα το δυναμικό διατήρησης είναι θετικό οπότε ο δίαυλος υφίσταται σε ολόκληρη τη διαθέσιμή του έκταση (από την πηγή ως τον απαγωγό).



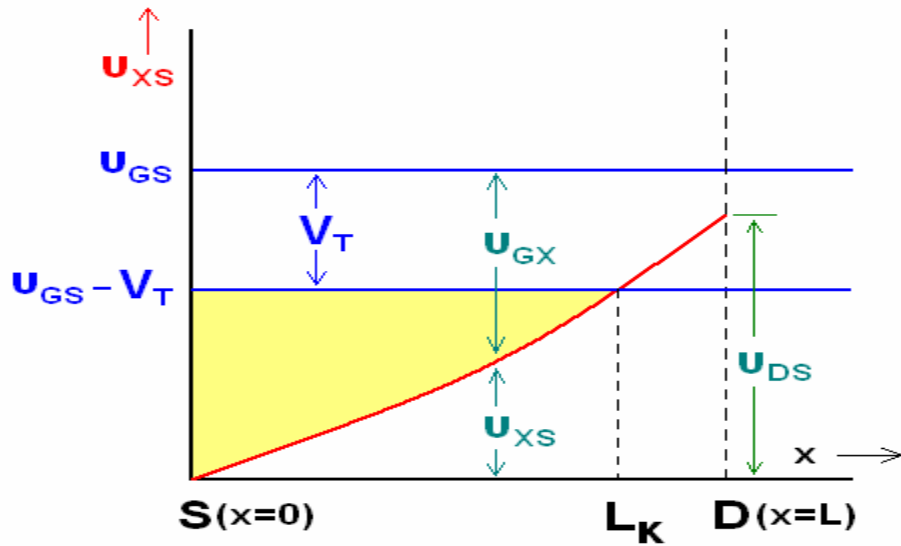
**Σχήμα 13: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS).
Κατάσταση κορεσμένης αγωγιμότητας (saturated conduction).**

Μέσω των τύπων που εφαρμόζουμε στο άκρο πηγής και το άκρο απαγωγού παρατηρούμε ότι ο δίαυλος θα κλείσει σε μία θέση μεταξύ πηγής και απαγωγού επειδή η τιμή του δυναμικού διατήρησης στο άκρο του απαγωγού προκύπτει αρκετά μικρότερη από την κρίσιμη τιμή των 0V.

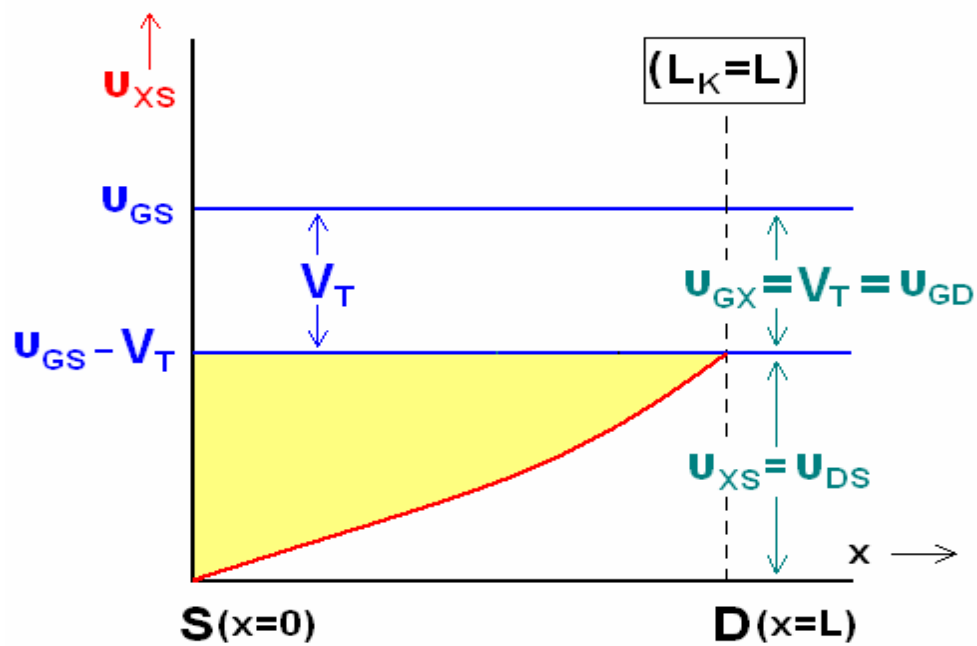
$$\text{ΑΚΡΟ ΠΗΓΗΣ: } V_{\delta\delta} = U_{gs} - V_T = U_{gs} - U_{xs} - V_T = 7 - 0 - 2 = 5V$$

$$\text{ΑΚΡΟ ΑΠΑΓΩΓΟΥ: } V_{\delta\delta} = U_{gs} - V_T = U_{gs} - U_{xs} - V_T = U_{gs} - U_{DS} - V_T = 7 - 10 - 2 = -5V$$

Παρατηρούμε ότι στο άκρο της πηγής ο δίαυλος υφίσταται αφού εκεί ισχύει $V_{\delta\delta} = 5V > 0$. Αντίθετα στο άκρο του απαγωγού ο δίαυλος δε διατηρείται αφού $V_{\delta\delta} = -5V < 0$. Επειδή μάλιστα στον απαγωγό η τιμή του συγκεκριμένου δείκτη, δηλαδή του δυναμικού διατήρησης, είναι αρκετά χαμηλότερη της κρίσιμης τιμής των 0V. Αναμένεται πως ο δίαυλος θα κλείνει σε μια ενδιάμεση θέση μεταξύ απαγωγού και πηγής.



Σχήμα 14: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Το κανάλι κλείνει σε μια απόσταση L_K από την πηγή.

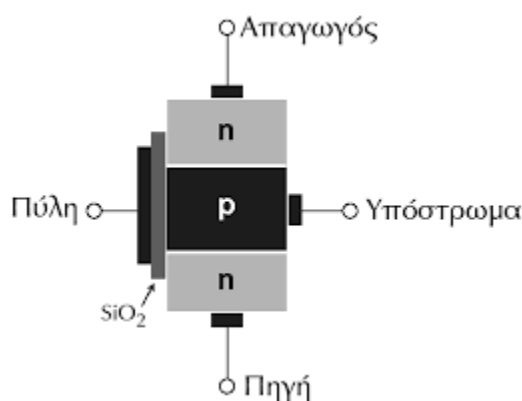


Σχήμα 15: MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Το κανάλι δεν κλείνει.

MOSFET

Το MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET) είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο τρανζίστορ. Όπως και το JFET που προαναφέραμε, αποτελείται και αυτό από τα ίδια στοιχεία, δηλαδή πηγή, απαγωγό και πύλη με τη διαφορά όμως ότι η πύλη του είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης να είναι πάρα πολύ μικρό, ανεξάρτητα από τη φορά της τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής. Ως μονωτικό χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτό στρώμα SiO_2 , το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ της μεταλλικής πηγής και του ημιαγωγού. Ο τύπος του καναλιού καθορίζεται από το είδος των φορτίων (ηλεκτρόνια ή οπές) που άγουν το ρεύμα από την πηγή προς τον απαγωγό. Το όνομα της διάταξης MOSFET καθορίζεται από τη σειρά διαδοχής των στρωμάτων. Έτσι διακρίνουμε δύο κατηγορίες MOSFET, τα MOSFET τύπου αραίωσης και τα MOSFET τύπου πύκνωσης, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του.

Το MOSFET αραίωσης αποτελείται από ένα τμήμα ημιαγωγού-n, στα άκρα του οποίου συνδέονται οι ακροδέκτες πηγής και απαγωγού. Η εφαρμογή τάσης μεταξύ πηγής και απαγωγού, όπου ο απαγωγός συνδέεται στο θετικό πόλο της πηγής, θέτει τα ηλεκτρόνια σε ροή από την πηγή προς τον απαγωγό.



Εικόνα 20: Mosfet αραίωσης

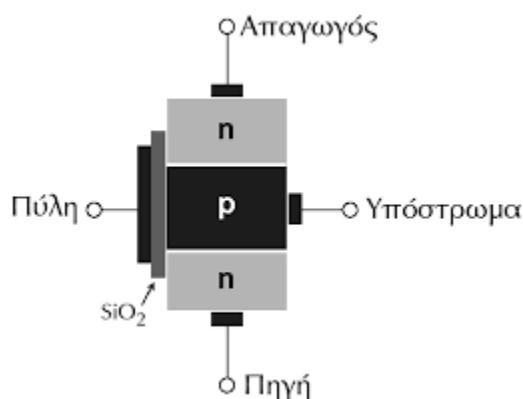
Στα MOSFET αραίωσης με αρνητική τάση στην πύλη, η πηγή τάσης ωθεί τα ηλεκτρόνια να κινηθούν από την πηγή προς τον απαγωγό μέσω του καναλιού μεταξύ της περιοχής p και της πύλης. Επιπρόσθετα, η αρνητική τάση στην πύλη απωθεί τα ηλεκτρόνια του καναλιού και έτσι ελαττώνεται η πυκνότητα και το ρεύμα απαγωγού. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ γνωστή και ως διαδικασία αραίωσης. Έτσι, η τάση της πύλης γίνεται περισσότερο αρνητική και το ρεύμα απαγωγού ελαττώνεται μέχρι να αποκοπεί.

Αντίθετα, στα MOSFET αραίωσης με εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη έχει σαν αποτέλεσμα την προσέλκυση ηλεκτρονίων προς την πύλη και αύξηση της πυκνότητάς τους μέσα στο κανάλι. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται λειτουργία πύκνωσης και βάσει αυτής το κανάλι γίνεται πιο αγώγιμο με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ρεύμα απαγωγού, παρόλο που δεν αλλάζει διαστάσεις.

Στη σημερινή εποχή οι χρησιμότητες των MOSFET αραίωσης είναι πολύ σημαντικές και παρουσιάζονται σε διάφορα επίπεδα. Η κύρια χρησιμότητά τους είναι στα αναλογικά ηλεκτρονικά. Οι ενισχυτές με MOSFET τύπου αραίωσης είναι παρόμοιοι με τους ενισχυτές με JFET και για αυτό το λόγο μπορεί να ακολουθηθεί η AC

ανάλυση, η οποία χρησιμοποιείται στα JFET. Επιπλέον, λόγω του ότι η αντίσταση του καναλιού μεταβάλλεται με την τάση της πύλης, βρίσκουν εφαρμογή σε κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου απολαβής(AGC).

Επίσης σημαντική είναι και η χρήση του MOSFET τύπου πύκνωσης, το οποίο λειτουργεί αποκλειστικά με πύκνωση και επιτρέπει την ταυτόχρονη ολοκλήρωση στο ίδιο τσιπ, διατάξεων n-καναλιού και p-καναλιού με αποτέλεσμα την δημιουργία συστημάτων συμπληρωματικών στοιχείων.

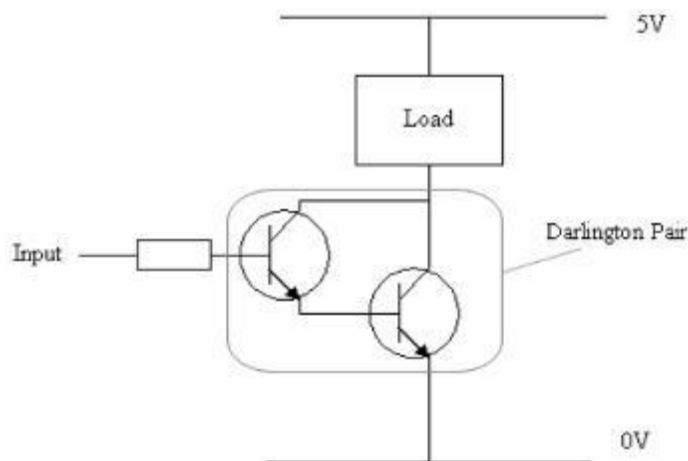


Εικόνα 21: Mosfet πύκνωσης

Στην δομή των MOSFET πύκνωσης το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του οξειδίου με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανάλι μεταξύ της πηγής και απαγωγού. Όλη η δομή μοιάζει να αποτελείται από δύο διόδους συνδεδεμένες αντίθετα μεταξύ τους, όπως στο παραπάνω σχήμα. Για τη λειτουργία του, σε συνθήκες κανονικής πολικότητας της πύλης και του απαγωγού, αν η τάση της πύλης είναι μηδέν, το ρεύμα δεν μπορεί να διέλθει από την πηγή προς τον απαγωγό και συνεπώς το ρεύμα απαγωγού είναι αμελητέο. Για να υπάρξει ρεύμα απαγωγού, πρέπει το υπόστρωμα να μετατραπεί σε n-τύπου έτσι ώστε να μην υπάρχουν οι διόδοι υποστρώματος/πηγής και αντίστοιχα υποστρώματος/απαγωγού και να εξασφαλιστεί η ύπαρξη ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα. Τα MOSFET πύκνωσης βρίσκουν ευρεία χρήση σε αναλογικά κυκλώματα για την κατασκευή τελεστικών ενισχυτών, στα ψηφιακά ηλεκτρονικά καθώς και σε μνήμες και επεξεργαστές. Τέλος χρησιμοποιούνται ακόμη και στην κατασκευή φορητών ηλεκτρονικών υπολογιστών και σε εφαρμογές ισχύος για μετατροπείς τάσης και σε παλμοτροφοδοτικά.

Επιλογή τρανζίστορ Darlington για κινητήρα DC

Σε ένα ζεύγος Darlington υπάρχουν δύο τρανζίστορ που ενεργούν σαν ένα αλλά με τη διαφορά ότι έχουν πολύ μεγαλύτερο κέρδος. Αυτό σημαίνει ότι μια μικρή ποσότητα ρεύματος από έναν αισθητήρα ή κάτι παρόμοιο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οδήγηση ενός μεγαλύτερου φορτίου. Για παράδειγμα:



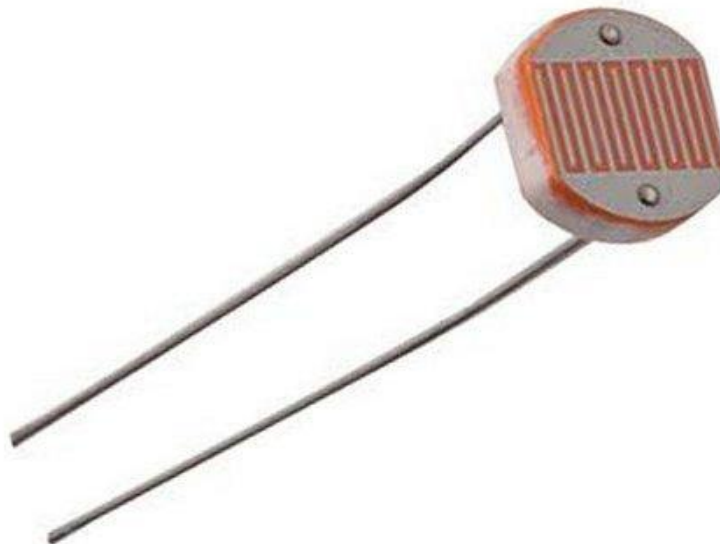
Σχήμα 16: Το ζεύγος Darlington μπορεί να φτιαχτεί από δύο τρανζίστορ

Το τρανζίστορ έχει ένα χαρακτηριστικό που ονομάζεται κέρδος ρεύματος dc και αναφέρεται ως hFE . Η ποσότητα του ρεύματος που μπορεί να περάσει μέσα από το φορτίο, όταν αυτό είναι ανοιχτό όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, δίνεται από τον τύπο: Φορτίο Ρεύματος = Ρεύμα εισόδου \times Κέρδος Τρανζίστορ (hFE). Το κέρδος αλλάζει από τρανζίστορ σε τρανζίστορ και μπορούμε να το διαπιστώσουμε από τις οδηγίες του κάθε κατασκευαστή. Για ένα μέσο τρανζίστορ η τιμή αυτή είναι συνήθως 100. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα που θα είναι διαθέσιμο για την οδήγηση θα ήταν 100 φορές μεγαλύτερο από την είσοδο του ρεύματος που θα είχαμε στο τρανζίστορ.

Σε μερικές εφαρμογές το ύψος του ρεύματος μπορεί να μην ενεργοποιήσει το τρανζίστορ εάν είναι πολύ χαμηλό. Αυτό σημαίνει ότι ένα μόνο τρανζίστορ μπορεί να μην είναι ικανό να περάσει το απαραίτητο ρεύμα που απαιτείται στο φορτίο. Αν δεν υπάρχει η δυνατότητα να αυξηθεί το ρεύμα εισόδου τότε το κέρδος του τρανζίστορ θα χρειαστεί να αυξηθεί. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με ένα ζεύγος Darlington, όπου λειτουργεί ως ένα τρανζίστορ όμως το κέρδος ισοδυναμεί με: Συνολικό κέρδος $hFE = \text{κέρδος του τρανζίστορ}_1 \times \text{κέρδος του τρανζίστορ}_2$. Δηλαδή εάν έχουμε δύο τρανζίστορ με κέρδος 100 το κάθε ένα το συνολικό κέρδος θα είναι 100×100 δηλαδή 10.000. Έτσι βλέπουμε ότι το ζεύγος Darlington δίνει μια ευρεία αύξηση του κέρδους όταν συγκρίνεται με ένα απλό τρανζίστορ. Για αυτόν τον λόγο το ζεύγος Darlington θα αφήσει μια πολύ χαμηλή είσοδο να μετατραπεί σε ένα πολύ μεγαλύτερο φορτίο. Για να ενεργοποιηθεί ένα τρανζίστορ η βασική είσοδος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0.7 V και έτσι επειδή χρησιμοποιούνται δύο τρανζίστορ στο ζεύγος Darlington αυτή η τιμή διπλασιάζεται. Συνεπώς η βασική ισχύ θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $0.7V \times 2 = 1.4V$. Αξίζει ακόμα να αναφέρουμε ότι η ισχύς μειώνεται μεταξύ του συλλέκτη και του πομπού στο ζεύγος Darlington όταν το άνοιγμα είναι περίπου 0.9V. Για τον λόγο αυτό εάν η παροχή ρεύματος είναι 5V ή μεγαλύτερη στο φορτίο που θα φτάσει να είναι περίπου 4.1V ($5V - 0.9V$).

Φωτοαντίσταση

Η φωτοαντίσταση είναι μια μεταβλητή αντίσταση, η τιμή της οποίας αλλάζει ανάλογα με το φως που πέφτει πάνω σε αυτή. Τη φωτοαντίσταση τη συναντάμε σε κυκλώματα τα οποία θέλουν να αναγνωρίσουν με κάποιο τρόπο, αν το περιβάλλον είναι φωτεινό ή σκοτεινό όπως την χρησιμοποιήσαμε και εμείς σε δικό μας πείραμα. Ένα παράδειγμα είναι λάμπες που ανάβουν αυτόματα σε χαμηλό φωτισμό. Σε απόλυτο σκοτάδι η αντίσταση είναι μέγιστη. Αν Εφαρμοστεί όμως τάση στα άκρα της, εμφανίζεται ένα ρεύμα που οφείλεται κυρίως σε θερμική λειτουργία. Με την αύξηση της έντασης του φωτός, η αντίσταση του υλικού μικραίνει και επιτρέπει την δημιουργία μεγάλων ρευμάτων.



Εικόνα 22: Φωτοαντίσταση

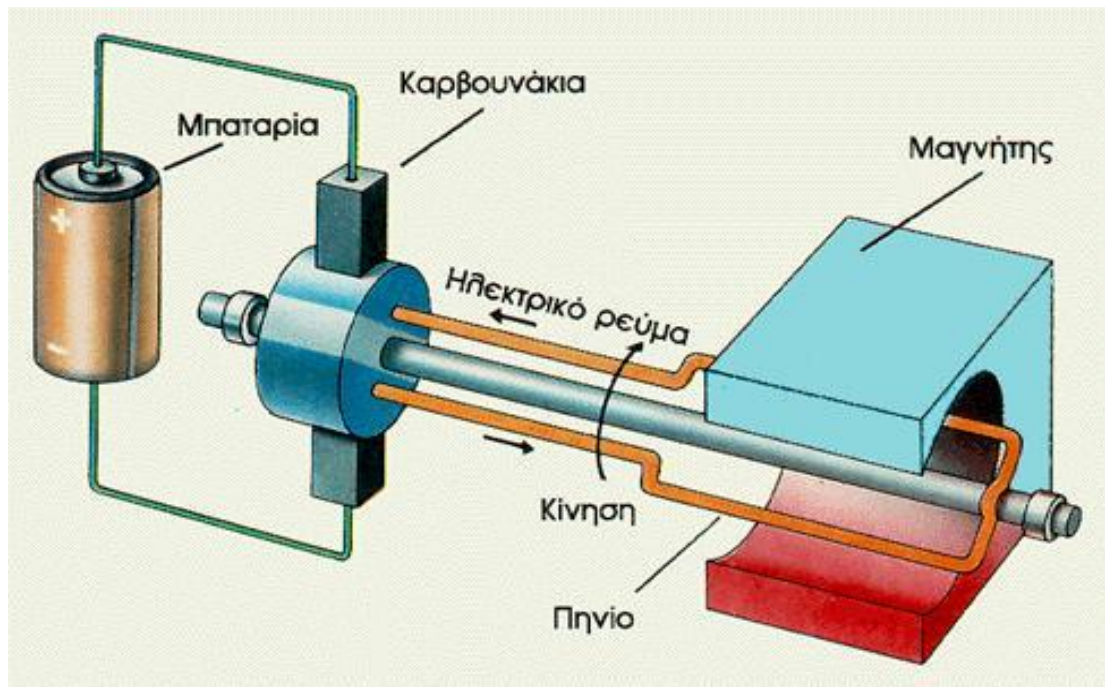
Κεφάλαιο 7: Ηλεκτροκινητήρες

Ο ηλεκτρικός κινητήρας του οποίου η μορφή φαίνεται παρακάτω παράγει κίνηση όταν συρμάτινα τυλίγματα διαρρέονται από ρεύμα βρεθούν μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ηλεκτρομαγνήτες ή μόνιμοι μαγνήτες είναι προσαρμοσμένοι στο ακίνητο τμήμα (στάτορα) και παράγουν το μαγνητικό πεδίο. Ο ρότορας (οπλισμός) αποτελείται από κατάλληλα συρμάτινα τυλίγματα. Με τη χρήση ψηκτρών το κάθε τύλιγμα τροφοδοτείται με ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος αλληλεπιδρά με αυτό του στάτορα και ο ρότορας στρέφεται. Ο ρότορας περιστρέφεται επειδή κάθε τύλιγμα τροφοδοτείται με γρήγορη διαδοχή.

Αρχικά ο κινητήρας DC λειτουργεί μόνο με συνεχές ρεύμα από μπαταρία. Έτσι, το ρεύμα διοχετεύεται στο πηνίο και αυτό περιστρέφεται ανάμεσα στους πόλους ενός μόνιμου μαγνήτη. Τα μαγνητικά πεδία του πηνίου και του μαγνήτη αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και αναγκάζουν το πηνίο να στραφεί. Στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC), ένας "εναλλάκτης" αντιστρέφει κατάλληλα τις συνδέσεις στην μπαταρία σε κάθε μισή στροφή και διατηρεί τη φορά περιστροφής του πηνίου σταθερή.

Ο κινητήρας βηματισμού δεν περιστρέφεται συνεχώς αλλά με σταθερό βήμα. Οι μόνιμοι μαγνήτες του ρότορα έλκονται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα πηνία στο στάτορα, τα οποία ενεργοποιούνται με σταθερή διαδοχή.

Η θεωρία αυτή των ηλεκτρικών κινητήρων παρέμεινε αναλλοίωτη εδώ και χρόνια. Αυτό που αλλάζει είναι η βελτίωση στον έλεγχο λειτουργίας σε πολλές εφαρμογές που στηρίζεται και στην ανάπτυξη της θεωρίας του αυτόματου ελέγχου.



Εικόνα 23: Ηλεκτρικός κινητήρας (Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα)

Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα είναι ο νόμος Laplace, η ανάπτυξη δηλαδή δύναμης Laplace κατάλληλης διεύθυνσης που να οδηγεί στην ανάπτυξη ροπής και τελικά στη περιστροφή του. Όταν ένας αγωγός ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο ασκείται πάνω του δύναμη με μέτρο:

$$F = I * \lambda * B * \eta\mu\phi$$

Όπου:

- I = Ένταση του ρεύματος
- λ = Μήκος Αγωγού
- B = Μαγνητική επαγωγή του πεδίου
- ϕ = η γωνία που σχηματίζει ο αγωγός με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών (B).

Το διάνυσμα της δύναμης είναι κάθετο στο επίπεδο που ορίζουν ο ρευματοφόρος αγωγός και το πεδίο και η κατεύθυνση δίνεται με τον κανόνα των τριών δαχτύλων του δεξιού χεριού (I = αντίχειρας, B = δείκτης, F = δύναμη).

Η διαμόρφωση του αγωγού έχει σαν αποτέλεσμα της εξάσκηση ζεύγους δυνάμεων πάνω σε αυτό, δηλαδή την ανάπτυξη ροπής και έτσι την περιστροφή του.

Είδη ηλεκτρικών κινητήρων

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- κινητήρες συνεχούς ρεύματος(DC motors - DC)
- κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC motors - AC)

Οι AC κινητήρες διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς. Τόσο οι μονοφασικοί όσο και οι πολυφασικοί κινητήρες διακρίνονται σε σύγχρονους κινητήρες και σε κινητήρες επαγωγικούς ή ασύγχρονους. Οι τριφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι περισσότερο εύχρηστοι από τους πολυφασικούς.

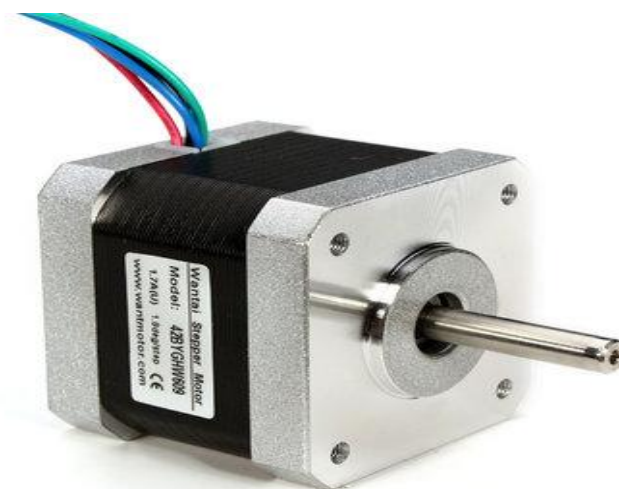
Στις προαναφερόμενες γενικές κατηγορίες αντιστοιχούν διάφοροι τύποι κινητήρων που διαφέρουν ορισμένοι στην αρχή λειτουργίας τους, στο τρόπο διέγερσης καθώς και στη χρήση τους. Αυτοί είναι οι παρακάτω:

- DC κινητήρες
 - ❖ Ξένης διέγερσης
 - ❖ Παράλληλης διέγερσης
 - ❖ Διέγερσης σειράς
 - ❖ Μικτής ή σύνθετης διέγερσης
- AC κινητήρες
 - ❖ Τριφασικοί
 - ❖ Μονοφασικοί
- Ειδικοί κινητήρες
 - ❖ Βηματικοί κινητήρες
 - ❖ Σερβοκινητήρες

Βηματικοί Κινητήρες

Γενικά

Ο Βηματικός κινητήρας είναι ένας κινητήρας επαγωγής, ο οποίος τροφοδοτείται από ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, χρησιμοποιεί δηλαδή ηλεκτρονικούς παλμούς για την κίνησή του. Πρόκειται για μία ηλεκτρομηχανική συσκευή, η οποία όταν ενεργοποιείται ηλεκτρικά περιστρέφεται με διακριτή κίνηση βημάτων κατά μία ιδιαίτερη γωνία κάθε φορά. Όταν ο άξονας περιστραφεί κατά ένα βήμα, σταματά μέχρι να πάρει την επόμενη εντολή οδήγησης.



Εικόνα 24: Βηματικός κινητήρας

Οι βηματικοί κινητήρες σε σύγκριση με άλλους τύπους μηχανών, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να περιστραφούν μέσω των ελεγχόμενων γωνιών της περιστροφής, με μεταβολή των παλμών εντολής από ένα κύκλωμα "οδηγό". Όταν έχει εφαρμοστεί ένας ορισμένος αριθμός παλμών τότε ο άξονας θα έχει περιστραφεί κατά μία ορισμένη γωνία. Έτσι παρατηρούμε ότι ο βηματικός κινητήρας έχει ιδιότητες όπως: γρήγορη έναρξη και παύση και ταχύτητα ή θέση που μπορεί να ελεγχθεί.

Στους βηματικούς κινητήρες, ο στάτης είναι το μόνο τμήμα της μηχανής που φέρει τυλίγματα τα οποία περιελίσσονται στο πυρήνα των πόλων οι οποίοι είναι σε ζεύγη και προεξέχουν. Σε κάθε ζεύγος τα τυλίγματα του κάθε πόλου είναι σε σειρά και περιελιγμένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το ένα να δρα σαν νότιος και το άλλο σαν βόρειος πόλος. Ο ρότορας είναι είτε μόνιμος μαγνήτης, είτε στην περίπτωση των μηχανών μεταβλητής μηχανικής αντίδρασης, ένας οδοντωτός κύλινδρος μαλακού μαγνητικού υλικού.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε ότι ο βηματικός κινητήρας είναι παρόμοιος με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμων μαγνητών. Το μαγνητικό υλικό του πυρήνα του στάτη και του δρομέα είναι σε φύλλα ή και ενιαίο, από μαλακό

σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα μαγνητικά αυτά υλικά για να δημιουργούν υψηλή μαγνητική ροή, πρέπει να παρουσιάσουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα ακόμα κι αν εφαρμόζεται μια χαμηλή ηλεκτρική τάση. Σε πολλές περιπτώσεις ο πυρήνας του στάτη και ο πυρήνας του δρομέα αποτελούνται από ελάσματα συνήθως κράματος χάλυβα με πυρίτιο.

Η κατασκευή του στάτη είναι κοινή σε όλα τα είδη των βηματικών κινητήρων. Ο στάτης αποτελείται από μία συστοιχία ατσάλινων ελασμάτων με προεξέχοντα τμήματα στα οποία είναι ισομερώς κατανεμημένα τα πεδία των πόλων, συνήθως δύο, τριών ή τεσσάρων ζευγών πόλων. Σε κάθε ζεύγος ο ένας πόλος δρα σαν βόρειος και το άλλο σαν νότιος πόλος. Ανάλογα με τη κατασκευή του δρομέα, διακρίνουμε τα εξής είδη βηματικών κινητήρων:

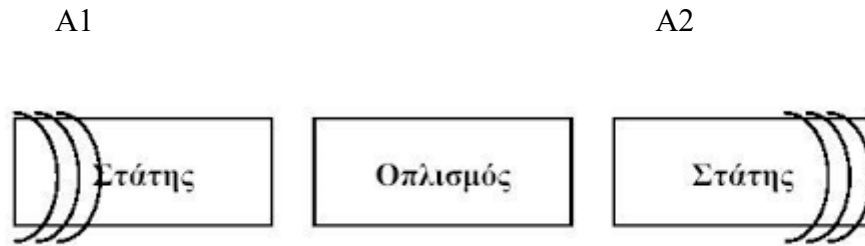
- 1) Βηματικός κινητήρας μόνιμου μαγνήτη
- 2) Βηματικός κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης
- 3) Υβριδικός βηματικός κινητήρας

Αρχή Λειτουργίας

Η συμπεριφορά που χαρακτηρίζει ένα βηματικό κινητήρα βρίσκεται στην "βηματική" περιστροφή του αξονά του. Ένα γωνιακό βήμα εκτελείται κάθε φορά που μία εντολή εκτελείται, δηλαδή εφαρμόζεται ένας παλμός στο στάτη. Η κατασκευή του βηματικού κινητήρα δηλαδή ο αριθμός των πόλων, ορίζει τον ακριβή αριθμό των γωνιακών βημάτων που απαιτούνται για μια πλήρη στροφή του άξονα. Έτσι προκύπτει η χρήση του σε εφαρμογές κίνησης στην περιοχή των συστημάτων αυτόματου ελέγχου.

Η λειτουργία των βηματικών κινητήρων στηρίζεται στη βασική αρχή του μαγνητισμού: ομώνυμοι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται ενώ ετερόνυμοι μαγνητικοί πόλοι έλκονται. Όπως θα δούμε και στη παρακάτω εικόνα, ο στάτης είναι οι δύο ηλεκτρομαγνήτες A1 και A2 ενώ ο δρομέας είναι ένας μόνιμος μαγνήτης δηλαδή έχει καθορισμένη και σταθερή φορά μαγνητικού πεδίου.

Όταν η πολικότητα του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα του στάτη είναι τέτοια ώστε ο πόλος A1 να είναι βόρειος πόλος και ο πόλος A2 να είναι νότιος, δηλαδή η φορά του μαγνητικού πεδίου να είναι BA1A2 τότε, ο δρομέας υφίσταται την επίδραση ροπής και περιστρέφεται από μια τυχαία θέση προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά ή το αντίστροφο ανάλογα τη θέση που βρίσκονται μέχρι να βρει τη κατάσταση ισορροπίας δηλαδή την ευθυγράμμιση των μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα (βήμα λειτουργίας-γωνία περιστροφής).



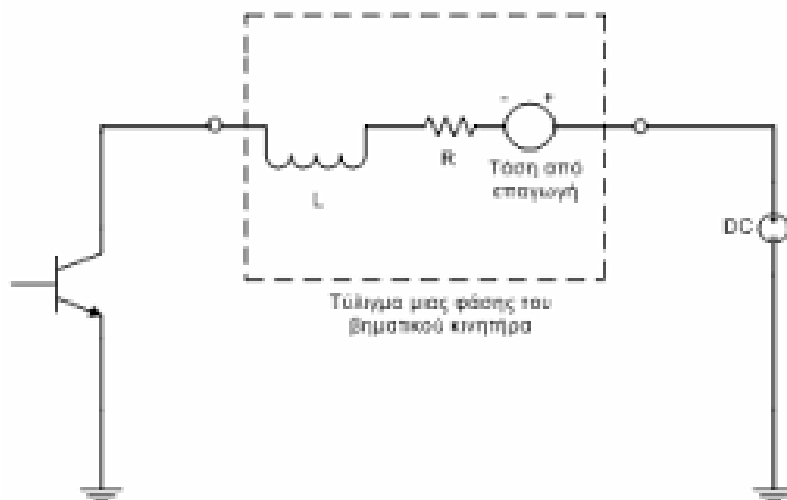
Εικόνα 25: Λειτουργική αναπαράσταση βηματικού κινητήρα

Όπως καταλαβαίνουμε η διάταξη των πηνίων του στάτη (αριθμός φάσεων) και ο αριθμός των δοντιών του δρομέα θα καθορίσουν τη γωνία περιστροφής γ που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα λειτουργίας.

Οι βηματικοί κινητήρες μπορούν να χειριστούν γωνία βήματος από 90° έως και $0,72^\circ$. Η φορά περιστροφής εξαρτάται από την πολικότητα της παλμοδότησης των τυλιγμάτων του στάτη.

Η λειτουργία ενός βηματικού κινητήρα δηλαδή η ταχύτητα του, εξαρτάται από την διαμόρφωση των παλμών της πηγής που τον τροφοδοτεί. Οι παλμοί που έχουν την ωρολογιακή φορά θεωρούνται ότι είναι θετικοί (+), ενώ θεωρούνται αρνητικοί (-) αυτοί που έχουν την αντί-ωρολογιακή φορά. Έτσι, ανά πάσα στιγμή, ο συνολικός αριθμός των παλμών είναι γνωστός, επομένως, ο συνολικός αριθμός περιστροφών του άξονα είναι γνωστός με ακρίβεια ενός βήματος.

Το κύκλωμα της κάθε φάσης του στάτη είναι ένα πηνίο σε σειρά με μια αντίσταση. Κατά τη λειτουργία του κινητήρα εμφανίζεται τάση από επαγωγή στο τύλιγμα που επάγεται λόγω της περιστροφής του δρομέα.



Εικόνα 26: Κόκλωμα μίας φάσης του βηματικού κινητήρα

Έλεγχος βηματικού κινητήρα

Οι βηματικοί κινητήρες διαφέρουν από τους γνωστούς τύπους κινητήρων (DC,AC) στο ότι τροφοδοτούνται με παλμούς και παράγουν ηλεκτρική κίνηση. Ο άξονας τους όμως δεν παράγει μια συνεχή περιστροφική κίνηση, αλλά περιστρέφεται κατά μια ορισμένη γωνία κάθε φορά που δέχεται ένα παλμό. Μετατρέπει δηλαδή τους ψηφιακούς παλμούς σε μηχανικό μέγεθος - θέση αξόνων. Η περιστροφή του κινητήρα έχει μια άμεση σχέση με τον αριθμό παλμών εισόδου έτσι η ταχύτητα του συσχετίζεται με τη συχνότητα των παλμών.

Οι βηματικοί κινητήρες είναι απλοί, αξιόπιστοι και χρησιμοποιούνται για ανοιχτούς ή κλειστούς ελεγχόμενους βρόχους συστημάτων ελέγχου. Λόγω της ευκολίας χρήσης και στις απλές ανάγκες ελέγχου αλλά και τον ακριβή έλεγχο, οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές μέτρησης και ελέγχου. Με έναν βηματικό κινητήρα είναι δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας και της θέσης μετακίνησης του φορτίου.

Οι βηματικοί κινητήρες είναι υψηλής ακρίβειας και παρουσιάζουν σφάλμα γωνίας θέσης κοντά στο 5% χωρίς να είναι αθροιστικό με τον αριθμό των περιστροφών. Επειδή ο κινητήρας στρέφεται με διακριτά γωνιακά βήματα, ο δρομέας επιταχύνεται και επιβραδύνεται συνεχώς, ακόμα και όταν φαίνεται να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Στην πραγματικότητα όμως η ταχύτητα μεταβάλλεται παλμικά.

Τέλος ο έλεγχος ενός βηματικού κινητήρα έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

1. Δεν απαιτείται ανάδραση για τον έλεγχο ταχύτητας ή θέσης.
2. Το σφάλμα θέσης δεν είναι αθροιστικό
3. Οι βηματικοί κινητήρες είναι συμβατοί με τον ψηφιακό εξοπλισμό των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Έλεγχος ανοιχτού βρόγχου

Η μέθοδος ανοιχτού βρόγχου χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων. Μετρώντας τον αριθμό και τις εναλλαγές των παλμών που αποστέλλονται από τον ελεγκτή προς το κινητήρα, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του κάθε χρονική στιγμή. Δεν χρειάζεται να υπάρχει ανάδραση πληροφορίας από κάποιον αισθητήρα θέσης προς τον ελεγκτή, κάτι που είναι απαραίτητο στον έλεγχο κλειστού βρόγχου.

Έλεγχος κλειστού βρόγχου

Ο έλεγχος γίνεται για να ρυθμιστεί η ταχύτητα και η θέση του κινητήρα. Η ρύθμιση αυτή βασίζεται σε ένα σήμα ανάδρασης που προκύπτει από ένα κλειστό σύστημα ελέγχου που αποτελείται από:

1. Ελεγκτής - Controller
Καθορίζει τη λειτουργία του κινητήρα θέτοντας τις παραμέτρους λειτουργίας όπως ταχύτητα, κατεύθυνση, απόσταση, ρυθμός επιτάχυνσης, επιβράδυνσης. Τη λειτουργία του ελέγχου μπορεί να αναλάβει και ο κεντρικός Η/Υ αυτόνομα ή μέσω περιφερειακών μονάδων εξυπηρέτησης.
2. Drive
Μεταφέρει την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία του κινητήρα ανάλογα με τα σήματα χαμηλής ισχύος που δέχεται από τον ελεγκτή.
3. Feedback loop
Η λειτουργία ανάδρασης αποσκοπεί στο συνεχή έλεγχο των εντολών θέσης και ταχύτητας που δίνονται προς το κινητήρα, ο οποίος προκύπτει από τη σύγκριση της παρούσας και επιθυμητής κατάστασης βάσει ενός αλγορίθμου ελέγχου δίνοντας τις εντολές στο drive.

Κινητήρες Συνεχούς τάσης

Γενικά

Ένας κινητήρας DC αποτελείται από δύο μέρη, το ακίνητο σώμα του κινητήρα ονομάζεται “Stator” και το εσωτερικό μέρος που περιστρέφεται το οποίο δημιουργεί την κίνηση ονομάζεται “Rotor”. Για τους DC κινητήρες ο ρότορας συνήθως ονομάζεται “Armature”. Γενικά σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ο στάτης αποτελείται από ένα ζεύγος σταθερών μόνιμων μαγνητών που παράγουν μια ομοιόμορφη και σταθερή μαγνητική ροή μέσα στον κινητήρα, δίνοντας σε αυτά τα είδη κινητήρων το όνομα των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη συνεχούς ρεύματος (PMDC).



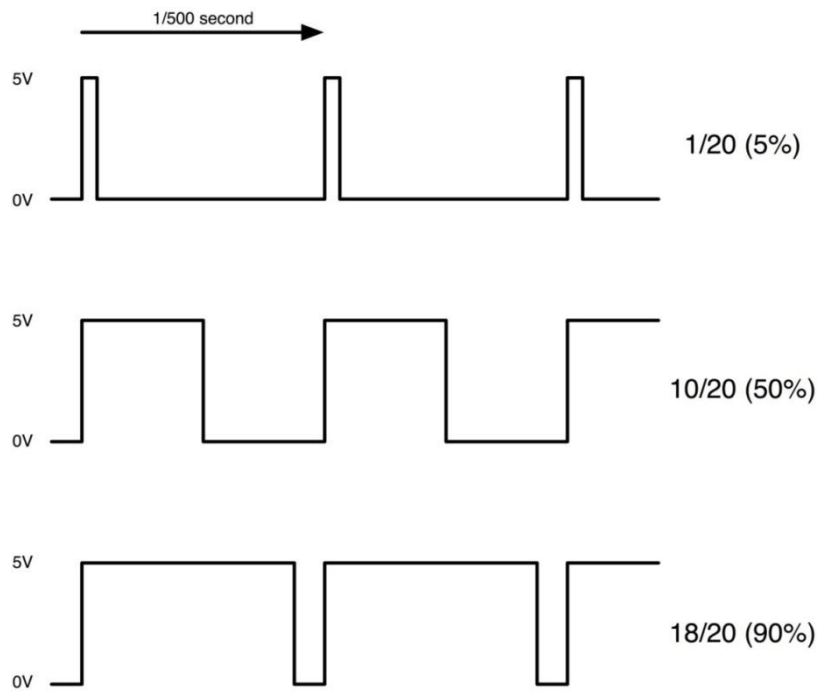
Εικόνα 27: Κινητήρας συνεχούς τάσης

Ο οπλισμός των κινητήρων αποτελείται από μεμονωμένα ηλεκτρικά πηνία που συνδέονται μεταξύ τους σε κυκλική διαμόρφωση γύρω από το μεταλλικό σώμα του και παράγουν ένα βόρειο πόλο, στη συνέχεια ένα νότιο πόλο και συνεχίζεται ακριβώς με την ίδια σειρά, έναν τύπο διαμόρφωσης συστήματος πεδίου. Το ρεύμα που ρέει μέσα σε αυτά τα πηνία του ρότορα παράγει το απαραίτητο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το κυκλικό μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τις περιελίξεις των βραχιόνων παράγει τόσο βόρειους όσο και νότιους πόλους γύρω από τον οπλισμό, οι οποίοι απωθούνται ή έλκονται από τους μόνιμους μαγνήτες του στάτορα και παράγουν περιστροφική κίνηση γύρω από τον κεντρικό άξονα των κινητήρων. Καθώς ο οπλισμός περιστρέφεται, το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από τους ακροδέκτες των κινητήρων στο επόμενο σετ περιελίξεων του οπλισμού μέσω των

συρμάτων (βουρτσών) άνθρακα που βρίσκονται γύρω από τον εναλλάκτη και παράγουν ένα άλλο μαγνητικό πεδίο και κάθε φορά που περιστρέφουμε τον οπλισμό ένα νέο σετ περιελίξεων οπλισμού ενεργοποιείται και αναγκάζει τον οπλισμό να περιστρέφεται περισσότερο. Έτσι, η ταχύτητα περιστροφής ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος εξαρτάται από την αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων, ένα από τους στάσιμους μαγνήτες και το άλλο από τους ηλεκτρομαγνήτες που περιστρέφονται από τους βραχίονες και ελέγχοντας αυτή την αλληλεπίδραση μπορούμε να ελέγξουμε την ταχύτητα περιστροφής. Το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες του στάτορα είναι σταθερό και επομένως δεν μπορεί να αλλάξει, αλλά αν αλλάξουμε την ισχύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου των οπλίων ελέγχοντας το ρεύμα που ρέει μέσα από τις περιελίξεις, τότε θα παράγεται περισσότερη ή λιγότερη μαγνητική ροή με αποτέλεσμα μια ισχυρότερη ή ασθενέστερη αλληλεπίδραση και επομένως μια ταχύτερη ή βραδύτερη ταχύτητα.

Διαμόρφωση πλάτους παλμού για τον έλεγχο DC Motor

Πολλοί άνθρωποι προσπαθούν να ελέγξουν την ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιώντας μια μεγάλη μεταβλητή αντίσταση σε σειρά με τον κινητήρα. Ένας απλός και εύκολος τρόπος για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα είναι η ρύθμιση της ποσότητας τάσης στους ακροδέκτες του και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση “ Pulse Width Modulation” ή PWM. Όπως υποδηλώνει και η ονομασία του, ο ρυθμιστής ταχύτητας διαμόρφωσης πλάτους παλμού λειτουργεί με την οδήγηση του κινητήρα με μια σειρά παλμών “ON-OFF” και μεταβάλλοντας τον κύκλο λειτουργίας, το κλάσμα του χρόνου που η τάξη εξόδου είναι “ON” σε σύγκριση με όταν είναι “OFF” διατηρώντας παράλληλα την συχνότητα σταθερή. Η ισχύς που εφαρμόζεται στον κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας το πλάτος αυτών των εφαρμοζόμενων παλμών και με τον τρόπο αυτό μεταβάλλοντας τη μέση τάση συνεχούς ρεύματος που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες των κινητήρων. Με την αλλαγή ή τη ρύθμιση του χρονισμού αυτών των παλμών μπορεί να ελεγχθεί η ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή όσο μακρύτερος ο παλμός είναι “ON”, τόσο πιο γρήγορα ο κινητήρας περιστρέφεται και ομοίως, όσο πιο σύντομα ο παλμός είναι “ON” τόσο πιο αργά θα περιστραφεί ο κινητήρας. Με άλλα λόγια, όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος των παλμών, τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση τάση που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του κινητήρα, τόσο ισχυρότερη είναι η μαγνητική ροή μέσα στις περιελίξεις οπλισμού και τόσο πιο γρήγορα ο κινητήρας περιστρέφεται και αυτό το βλέπουμε παρακάτω.



Σχήμα 17: Pulse Width Modulation

Κάθε $1/500$ του δευτερολέπτου, η έξοδος PWM θα παράγει έναν παλμό. Το μήκος αυτού του παλμού ελέγχει την ποσότητα ενέργειας που παίρνει ο κινητήρας. Χωρίς παλμό ο κινητήρας δεν θα γυρίσει ενώ με έναν σύντομο παλμό θα γυρίσει τον κινητήρα αργά. Εάν ο παλμός είναι ενεργός για το μισό του χρόνου, τότε ο κινητήρας θα λάβει το μισό της ισχύος που θα είχε αν ο παλμός έμενε ψηλά μέχρι να εμφανιστεί ο επόμενος παλμός.

Έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα συνεχούς ρεύματος μέσω RPi.

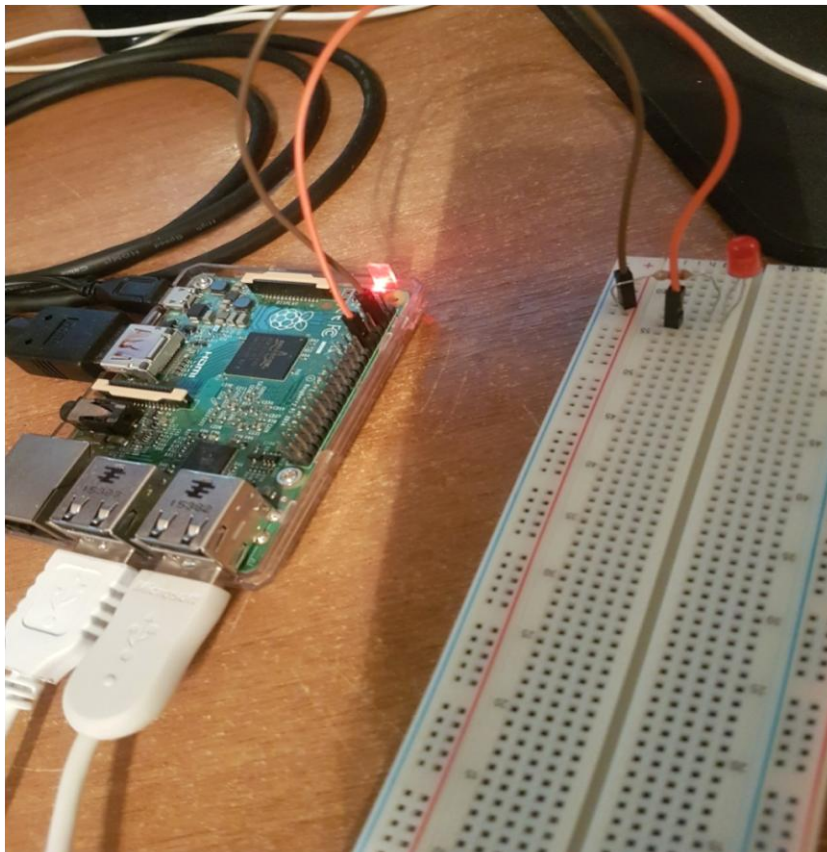
Όπως γνωρίζετε σε ορισμένα σημεία, πρέπει να ελέγξουμε και την ταχύτητα των κινητήρων. Αυτό επιτυγχάνεται καθώς μπορούμε να παράγουμε παλμούς τάσης από τους ακροδέκτες GPIO του RPi μέσω PWM (διαμόρφωση πλάτους παλμού) και την τάση εξόδου ελέγχου του pin GPIO. Η ρύθμιση πλάτους παλμού είναι μια πολύ απλή διαδικασία από την οποία μπορούμε να ελέγξουμε τη συχνότητα τάσης της πηγής. Η μονάδα PWM είναι διαθέσιμη για GPIO στο RPi και όπως γνωρίζουμε χρονική περίοδος = $1/\text{συχνότητα}$. Έτσι, αν επιλέξουμε μια συχνότητα 100Hz αυτό σημαίνει ότι η χρονική περίοδος είναι 10 δευτερόλεπτα. Η μπαταρία που τροφοδοτεί με 5V τον κινητήρα ή στην περίπτωση μας το τροφοδοτικό πρίζας που χρησιμοποιούμε για να δίνουμε τάση στον κινητήρα μας, για να μειωθεί η ταχύτητα πρέπει να μειώσουμε την τάση. Έτσι αν θέλουμε να μειώσουμε την ταχύτητα στο μισό θα πρέπει να αλλάξουμε το duty cycle στο 50 (το ποσοστό δηλαδή της χρονικής περιόδου για την οποία η τάση είναι υψηλή).

Κεφάλαιο 8: Πειράματα Εργασίας

Εκτός από το θεωρητικό κομμάτι της πτυχιακής μας εργασίας, μέσα από το οποίο αναλύσαμε πολλές πληροφορίες πάνω στο κομμάτι των ηλεκτρομηχανικών διατάξεων με το σύστημα Raspberry Pi, φέραμε εις πέρας και κάποια πειράματα που μέσα από τα οποία βλέπουμε αρκετό από το θεωρητικό μέρος στην πράξη. Αρχικά κάνουμε μια περιγραφή της γλώσσας python μέσα από κάποια βασικά πειράματα εισόδου εξόδου στο σύστημα Raspberry Pi, χρησιμοποιώντας led, αντιστάσεις και κάποια switches.

1^ο Πείραμα με LED

Πρόγραμμα σε Python που να ανάβει το led που είναι συνδεδεμένο στην πόρτα 12 του GPIO και στην συνέχεια το σβήνει με τη χρήση του GPIO.BOARD. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρειάστηκαν ένα led, αντίσταση 220Ω και δύο καλώδια αρσενικό σε θηλυκό. Έτσι η συνδεσμολογία του κυκλώματος μας είναι η παρακάτω:



Εικόνα 28: Πρώτο πείραμα με LED

Στη συνέχεια, συνδέσαμε το κύκλωμά μας με το Raspberry Pi και εκτελέσαμε τον παρακάτω κώδικα, ο οποίος μεταγλωττίστηκε με επιτυχία και πήραμε το αποτέλεσμα που θέλαμε, δηλαδή καταφέραμε να ανάψει το led. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο εξής:

Κώδικας πειράματος

```
import RPi.GPIO as GPIO

import time

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

GPIO.setwarnings(False)

GPIO.setup(12, GPIO.OUT)

print "Led on"

GPIO.output(12, GPIO.HIGH)

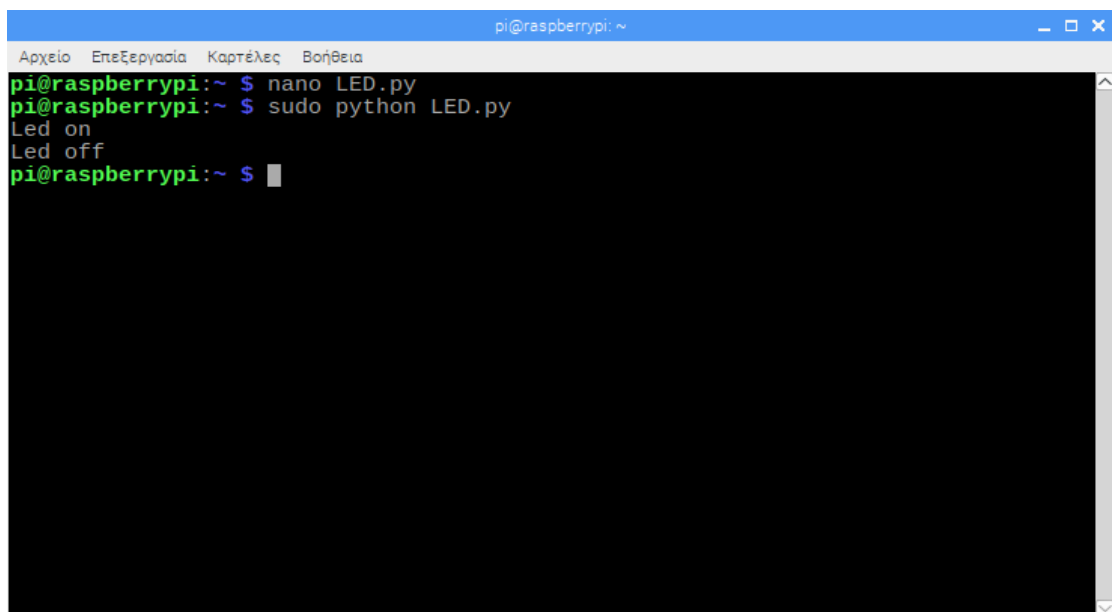
time.sleep(1)

print "Led off"

GPIO.output(12, GPIO.LOW)

time.sleep(1)

GPIO.cleanup()
```



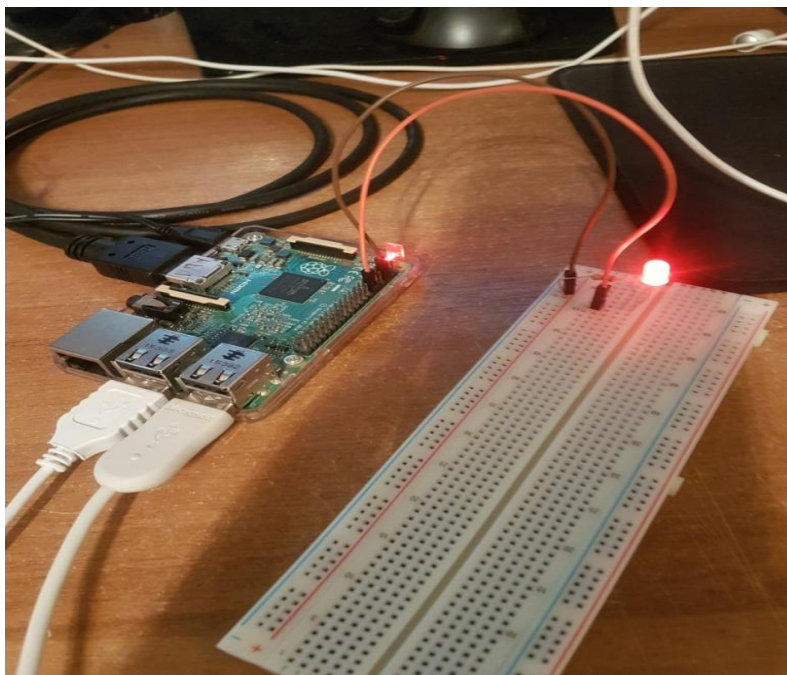
```
pi@raspberrypi: ~
Αρχείο Επεξεργασία Καρτέλες Βοήθεια
pi@raspberrypi:~$ nano LED.py
pi@raspberrypi:~$ sudo python LED.py
Led on
Led off
pi@raspberrypi:~$
```

Εικόνα 29: Terminal πρώτου πειράματος

```
pi@raspberrypi: ~  
Arχείο Επεξεργασία Καρτέλες Βοήθεια  
GNU nano 2.7.4 File: LED.py  
import RPi.GPIO as GPIO  
import time  
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)  
GPIO.setwarnings(False)  
GPIO.setup(12, GPIO.OUT)  
print "Led on"  
GPIO.output(12, GPIO.HIGH)  
time.sleep(1)  
print "Led off"  
GPIO.output(12, GPIO.LOW)  
time.sleep(1)  
GPIO.cleanup()  
[ Read 12 lines ]  
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos  
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Linter ^_ Go To Line
```

Εικόνα 30: Κώδικας πρώτου πειράματος

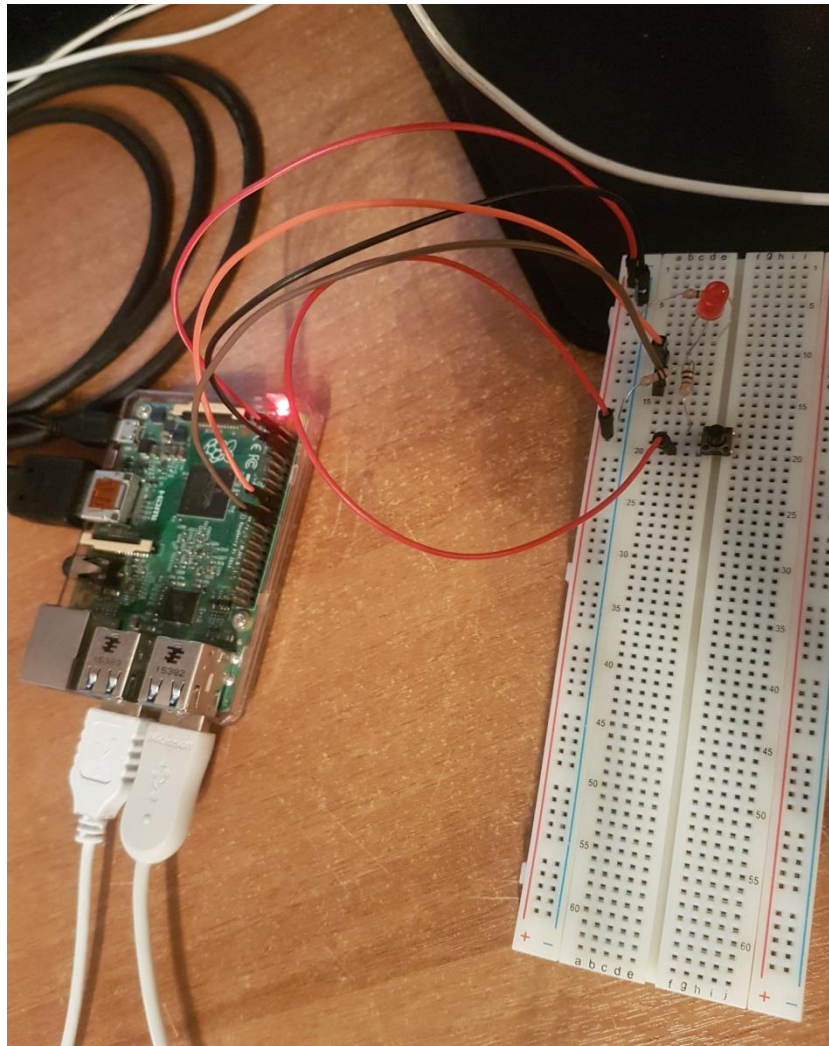
Το αποτέλεσμα του πειράματος ήταν να ανάψει το led με το οποίο είχαμε φτιάξει το κύκλωμα. Βλέπουμε παρακάτω ξανά το κύκλωμα με το led αναμμένο.



Εικόνα 31: Αποτέλεσμα πρώτου πειράματος

2^ο Πείραμα με LED

Πρόγραμμα που διαβάζει την τιμή της ακίδας εισόδου 22 του GPIO στην οποία είναι συνδεδεμένος διακόπτης και την τοποθετεί στην ακίδα 18 στην οποία είναι συνδεδεμένο led. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρειάστηκαν ένα led, μια αντίσταση 220Ω, μια αντίσταση 1K, μια αντίσταση 10K και τέλος ένα tact switch. Η συνδεσμολογία του κυκλώματος είναι η παρακάτω:



Εικόνα 32: Δεύτερο πείραμα με LED

Στη συνέχεια, συνδέσαμε το κύκλωμά μας με το Raspberry Pi και εκτελέσαμε τον παρακάτω κώδικα, ο οποίος μεταγλωττίστηκε με επιτυχία και πήραμε το αποτέλεσμα που θέλαμε. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο εξής:

Κώδικας πειράματος

```
import RPi.GPIO as GPIO

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

GPIO.setwarnings(False)

GPIO.setup(18, GPIO.OUT)

GPIO.setup(22, GPIO.IN)

GPIO.output(18, True)

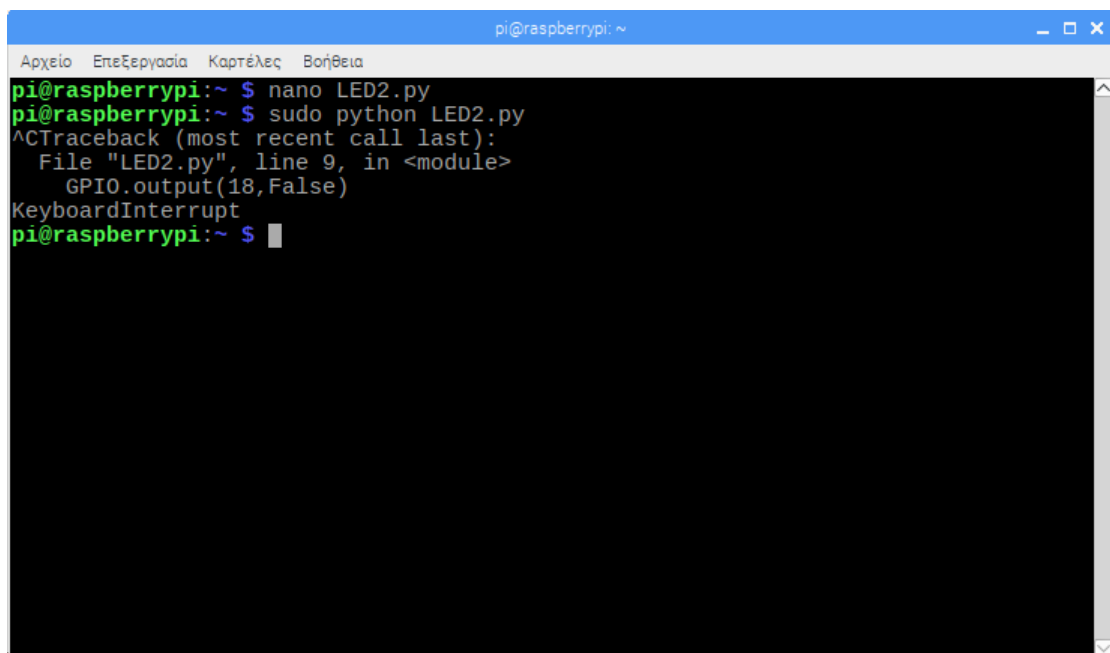
while 1:

    if GPIO.input(22) == 0:

        GPIO.output(18, False)

    else:

        GPIO.output(18, True)
```



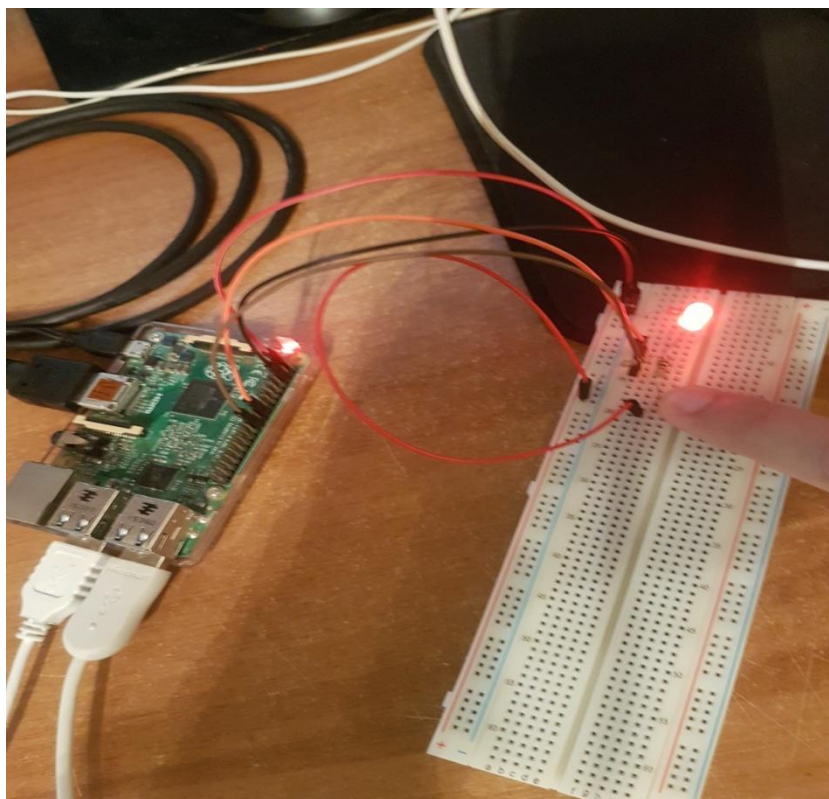
```
pi@raspberrypi: ~
Αρχείο Επεξεργασία Καρτέλες Βοήθεια
pi@raspberrypi:~ $ nano LED2.py
pi@raspberrypi:~ $ sudo python LED2.py
^CTraceback (most recent call last):
  File "LED2.py", line 9, in <module>
    GPIO.output(18, False)
KeyboardInterrupt
pi@raspberrypi:~ $
```

Εικόνα 33: Terminal δεύτερου πειράματος

```
pi@raspberrypi: ~
Arχειο Επεξεργασία Καρτέλες Βοήθεια
GNU nano 2.7.4 File: LED2.py
import RPi.GPIO as GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
GPIO.setwarnings(False)
GPIO.setup(18, GPIO.OUT)
GPIO.setup(22, GPIO.IN)
GPIO.output(18, True)
while 1:
    if GPIO.input(22)==0:
        GPIO.output(18, False)
    else:
        GPIO.output(18, True)
[ Read 11 lines ]
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Linter ^_ Go To Line
```

Εικόνα 34: Κώδικας δεύτερου πειράματος

Το αποτέλεσμα του πειράματος ήταν να ανάψει το led με το οποίο είχαμε φτιάξει το κύκλωμα. Βλέπουμε παρακάτω ξανά το κύκλωμα με το led αναμμένο.



Εικόνα 35: Αποτέλεσμα δεύτερου πειράματος

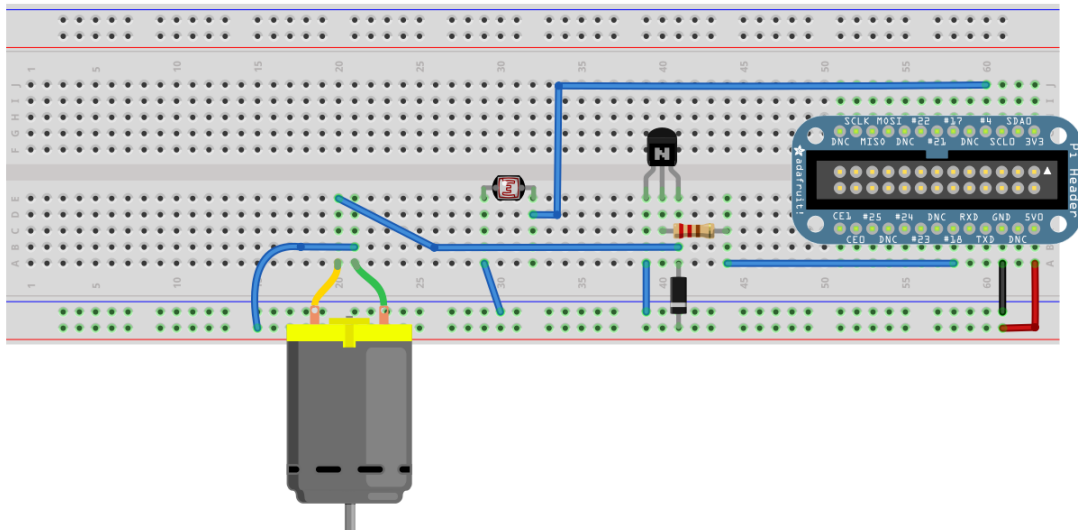
Πείραμα DC Motor

Λίστα εξαρτημάτων του πειράματος

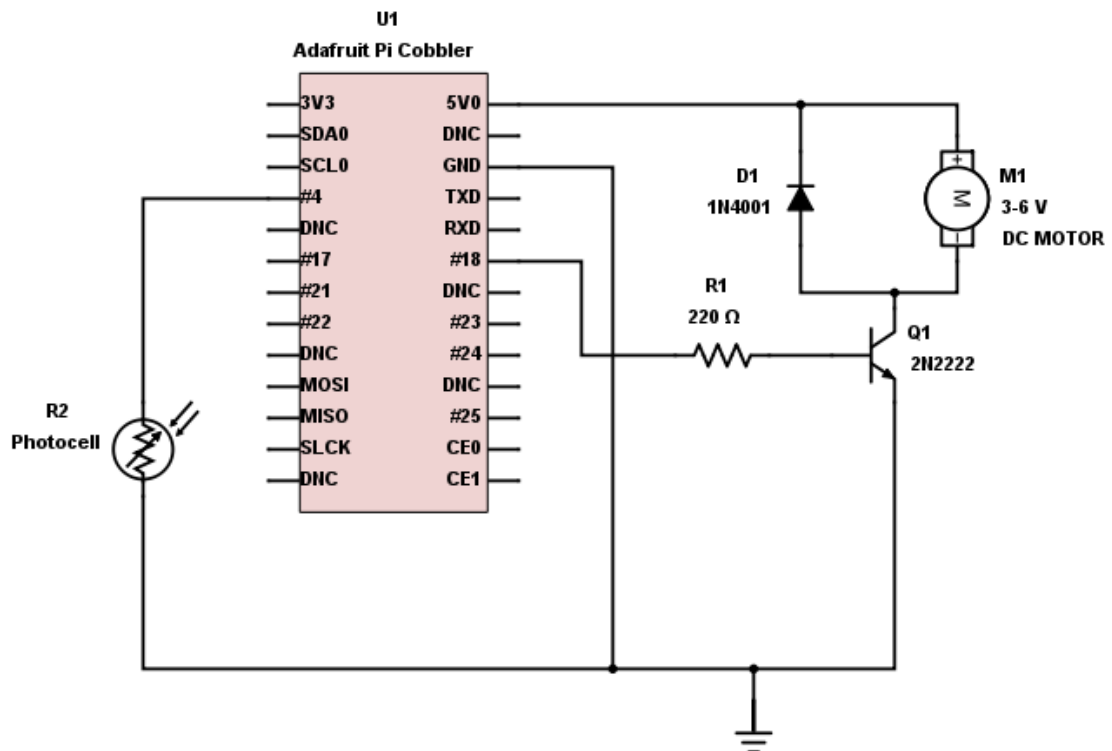
- Raspberry Pi 2 (Model b)
- (Q1) 2N2222 NPN τρανζίστορ
- (R1) 220Ω αντίσταση(κόκκινο,κόκκινο,καφέ,χρυσό)
- (D1) 1N4001 δίοδος
- (M1) 3-6VDC motor
- (R2) φωτοαντίσταση (photocell)
- Breadboard

Στο παρακάτω πείραμα θα δούμε την λειτουργία ενός DC Motor, το οποίο διαλέξαμε για να δείξουμε κάποιες από τις λειτουργίες του. Πιο συγκεκριμένα στο κύκλωμα που θα δούμε παρακάτω χρησιμοποιούμε ένα Raspberry Pi 2 Model b, ένα NPN τρανζίστορ, μια αντίσταση 220Ω, μια αντίσταση 10K για να πετύχουμε το pull up, μια δίοδο και τέλος μια φωτοαντίσταση. Η χρήση της φωτοαντίστασης στο συγκεκριμένο κύκλωμα είναι διαφορετική. Αυτό σημαίνει ότι όταν ξεκινήσουμε να τρέχουμε τον κώδικα μας και για παράδειγμα το μοτέρ ξεκινήσει να δουλεύει, περνώντας και ακουμπώντας το χέρι μας στην φωτοαντίσταση, τότε το μοτέρ μας σταματάει να δουλεύει μέχρι να ακουμπήσουμε ξανά το δάχτυλο μας πάνω στην φωτοαντίσταση. Όπως καταλαβαίνουμε η φωτοαντίσταση στο κύκλωμα μας χρησιμοποιείται σαν διακόπτης. Έτσι το κύκλωμα μας μαζί με τον κώδικα συνεχίζουν να τρέχουν και να λειτουργούν, βάζοντας σε λειτουργία ή όχι του μοτέρ, μέχρι εμείς να σταματήσουμε να το τρέχουμε.

Η τελική ηλεκτρική καλωδίωση για τον ελεγκτή μοτέρ συνεχούς ρεύματος πρέπει να συνδέσει το κύκλωμα του οδηγού με το Raspberry Pi. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την καλωδίωση χωρίς συγκολλητικό για τον ανιχνευτή μοτέρ DC. Και πάλι, το σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος που φαίνεται στο σχήμα 11 παρέχεται ως πρόσθετος πόρος καλωδίωσης. Στο παρακάτω κύκλωμα δεν βλέπουμε την αντίσταση 10K που χρησιμοποιούμε για το pull up γιατί είναι μια δική μας παρέμβαση στο κύκλωμα αλλά και στον κώδικα.

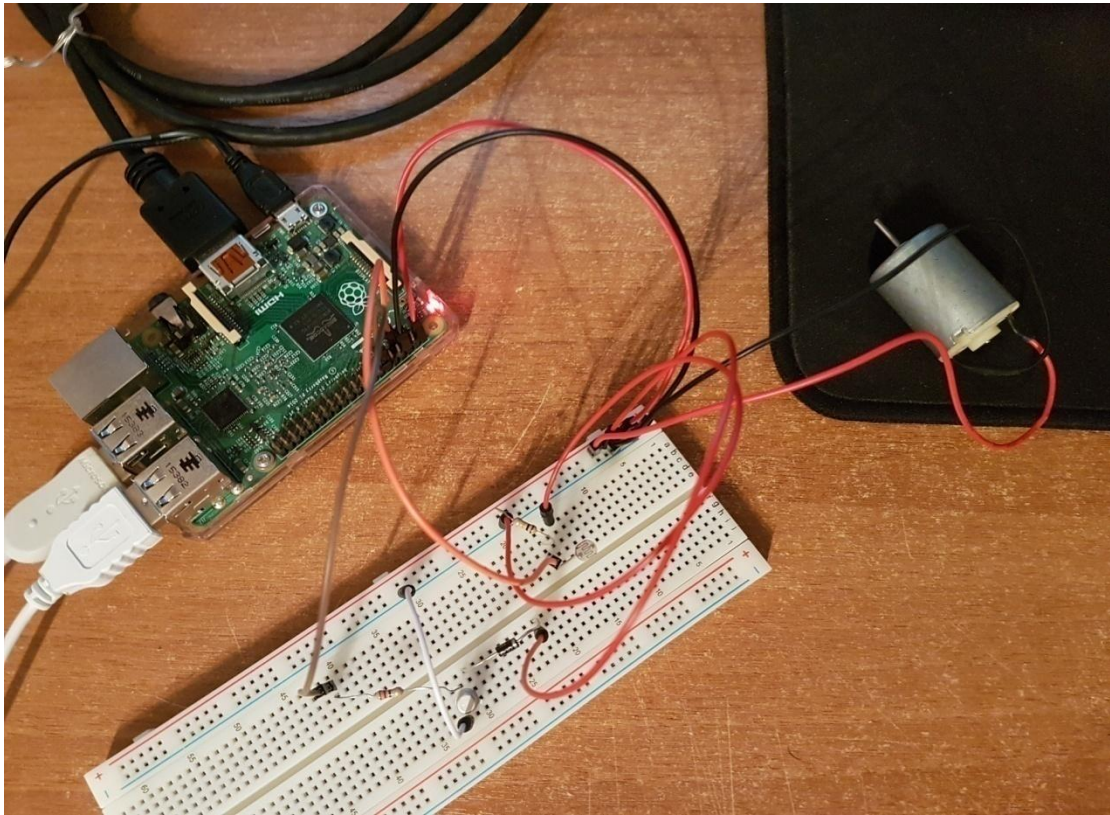


Εικόνα 36: Κύκλωμα πειράματος DC Motor



Εικόνα 37: Το σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού κυκλώματος για τον ελεγκτή κινητήρα DC ανίχνευσης αντικειμένων

Παρακάτω θα δούμε την μορφή του κυκλώματος μας με τα υλικά που αναφέραμε παραπάνω ότι θα χρησιμοποιήσουμε.



Εικόνα 38: Φωτογραφία κυκλώματος DC Motor φτιαγμένο από εμάς

Μετά την συνδεσμολογία, σειρά έχει ο κώδικας που γράψαμε για την λειτουργία του κυκλώματος μας. Συνδέουμε λοιπόν το κύκλωμα μας στις κατάλληλες θύρες του Raspberry και εκτελούμε τον κώδικα.

Κώδικας πειράματος

```
import RPi.GPIO as GPIO

import time

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

GPIO.setwarnings(False)

photocell_pin=7

motor_pin=12

GPIO.setup(photocell_pin,GPIO.IN)

GPIO.setup(motor_pin,GPIO.OUT)

motor_state=False

old_input_event=True

while True:

    new_input_event=GPIO.input(photocell_pin)

    print new_input_event

    if new_input_event==True and old_input_event==True:

        motor_state=not motor_state

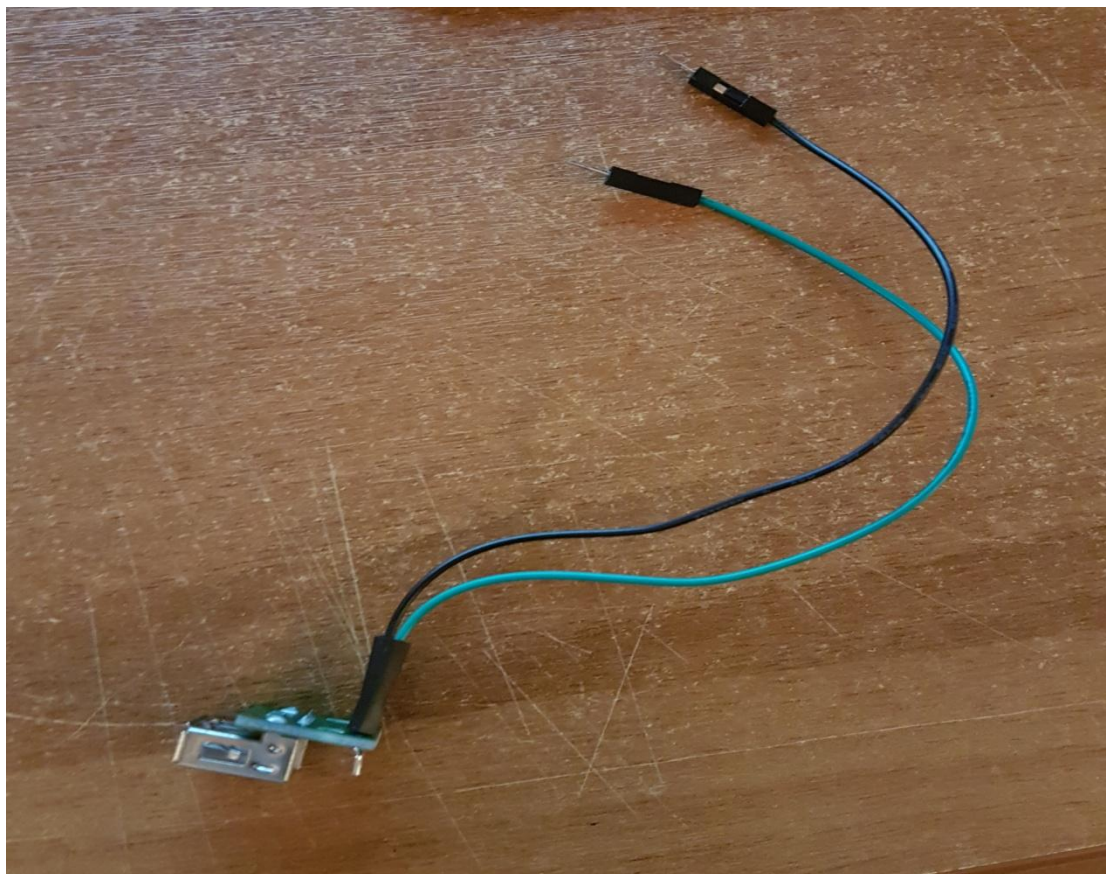
    old_input_event=new_input_event

    GPIO.output(motor_pin,motor_state)

    time.sleep(0.5)
```

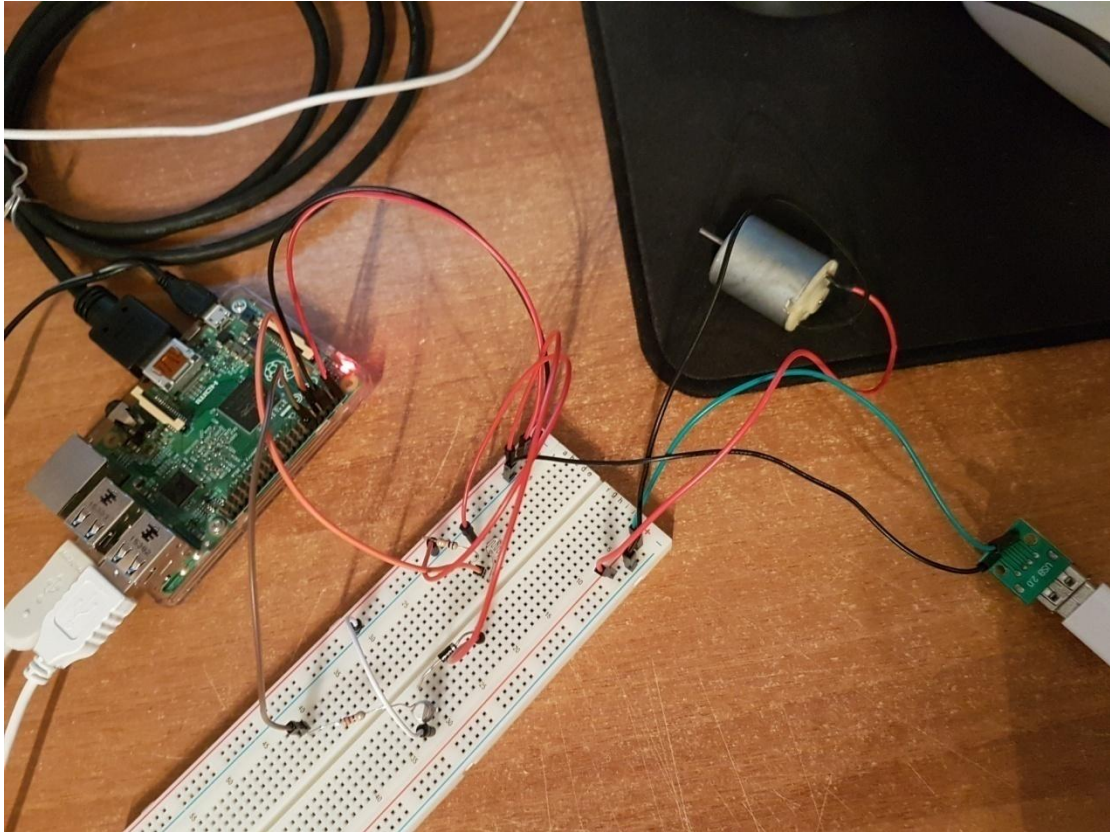

Πείραμα για DC Motor σε συνδυασμό με Pulse Width Modulation

Τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούμε στο συγκεκριμένο πείραμα είναι ακριβώς τα ίδια με το προηγούμενο, εκτός από την τροφοδοσία του μοτέρ. Στην προκειμένη περίπτωση χρειαστήκαμε μια θύρα USB (εικόνα 13) από την οποία βγαίνουν 2 καλώδια, Vbus(πράσινο) και Ground(μαύρο). Τα καλώδια αυτά συνδέονται αντίστοιχα στο breadboard που έχουμε τοποθετήσει και τα υπόλοιπα εξαρτήματα μας, το Vbus μπαίνει στην κόκκινη μεριά του breadboard στο πάνω ή στο κάτω μέρος που αυτό μας δείχνει το (+) και το Ground στην γείωση(-). Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε αυτή τη θύρα USB θα χρειαστούμε έναν μετασχηματιστή πρίζας και ένα καλώδιο USB σε USB. Η μια άκρη του καλωδίου αυτού συνδέεται στον μετασχηματιστή και στην συνέχεια στη πρίζα, ενώ η άλλη άκρη του καλωδίου στην θύρα USB που αναφέραμε. Έπειτα παίρνουμε το μοτέρ και βάζουμε το καλώδιο του ρεύματος (κόκκινο) δίπλα στο πράσινο καλώδιο της θύρας USB και το μαύρο καλώδιο στη γείωση.



Εικόνα 41: Μετασχηματιστής πρίζας με θύρα USB

Στο παρακάτω πείραμα θα δούμε ξανά την λειτουργία ενός DC Motor αλλά αυτή τη φορά σε συνδυασμό με το Pulse Width Modulation. Αυτό σημαίνει ότι όταν ξεκινήσουμε να τρέχουμε τον κώδικα μας και για παράδειγμα το μοτέρ ξεκινήσει να δουλεύει, θα έχουμε αύξηση της συχνότητας και ταυτόχρονα της ταχύτητας του μοτέρ. Βλέπουμε στη συνέχεια την συνδεσμολογία του κυκλώματος.



Εικόνα 42: Φωτογραφία κυκλώματος DC Motor μαζί με τη χρήση του μετασχηματιστή πρίζας

Μετά την συνδεσμολογία, σειρά έχει ο κώδικας που γράψαμε για την λειτουργία του κυκλώματος μας. Συνδέουμε λοιπόν το κύκλωμα μας στις κατάλληλες θύρες του Raspberry και εκτελούμε τον κώδικα.

Κώδικας πειράματος

```
import RPi.GPIO as GPIO

from time import sleep

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

GPIO.setwarnings(False)

GPIO.setup(12,GPIO.OUT)

pwm=GPIO.PWM(12,100)

pwm.start(0)

pwm.ChangeDutyCycle(50)

GPIO.output(12, True)

sleep(5)

GPIO.output(12, False)

pwm.ChangeDutyCycle(75)

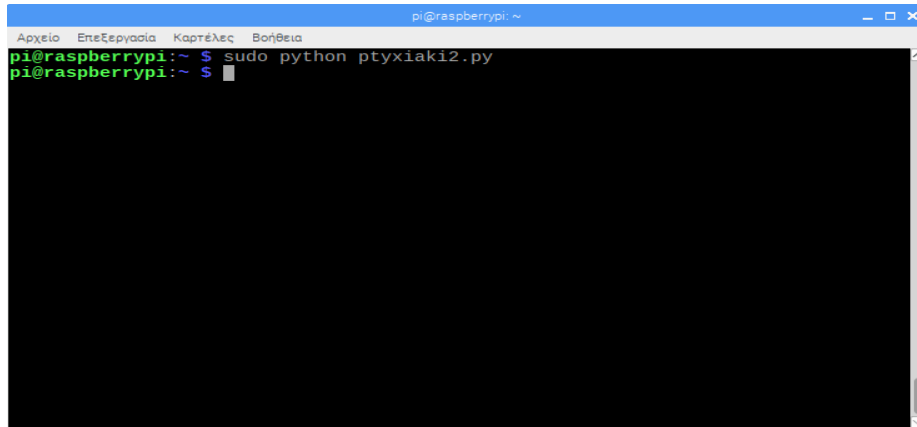
GPIO.output(12, True)

sleep(3)

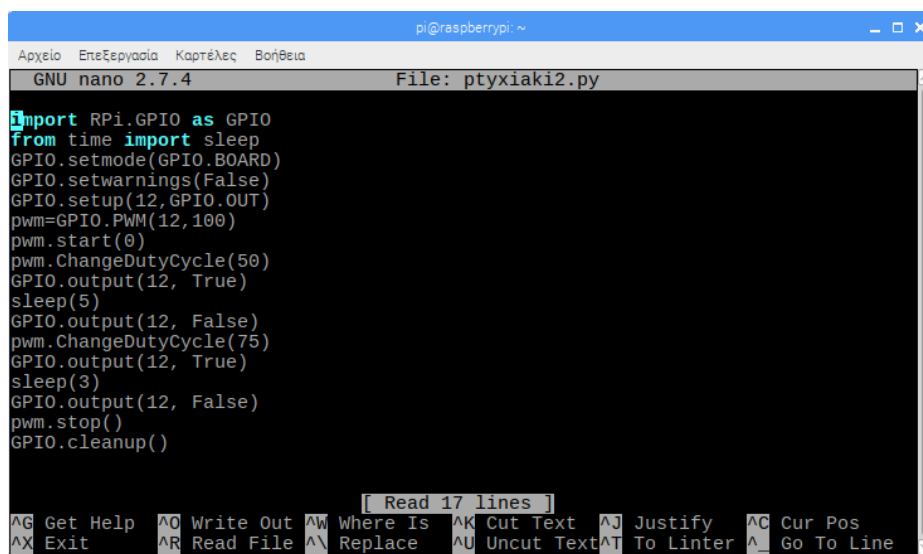
GPIO.output(12, False)

pwm.stop()

GPIO.cleanup()
```

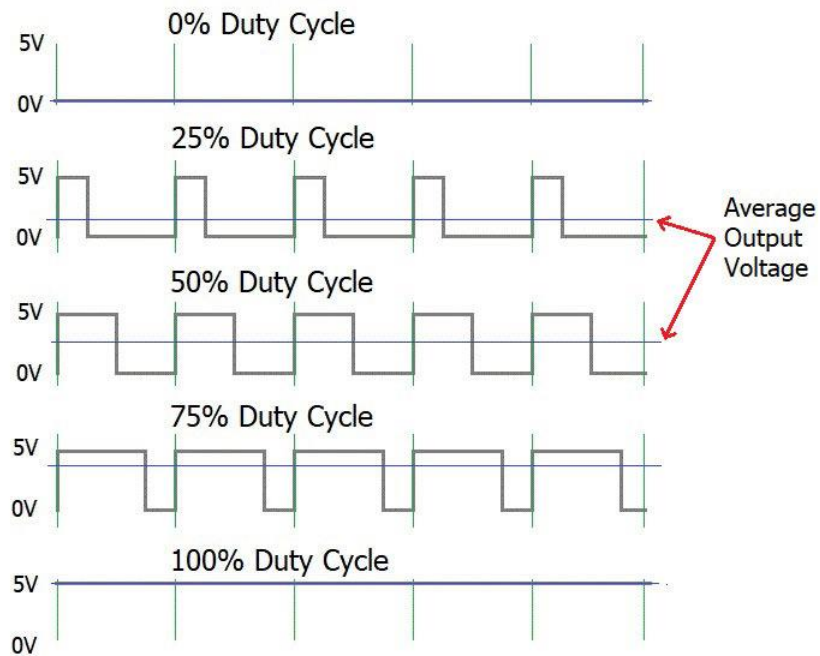


Εικόνα 43: Terminal πειράματος DC Motor με PWM



Εικόνα 44: Κώδικας κυκλώματος DC Motor με PWM

Μια ενδεικτική φωτογραφία με το πώς δουλεύει το PWM (Pulse Width Modulation) είναι η παρακάτω.

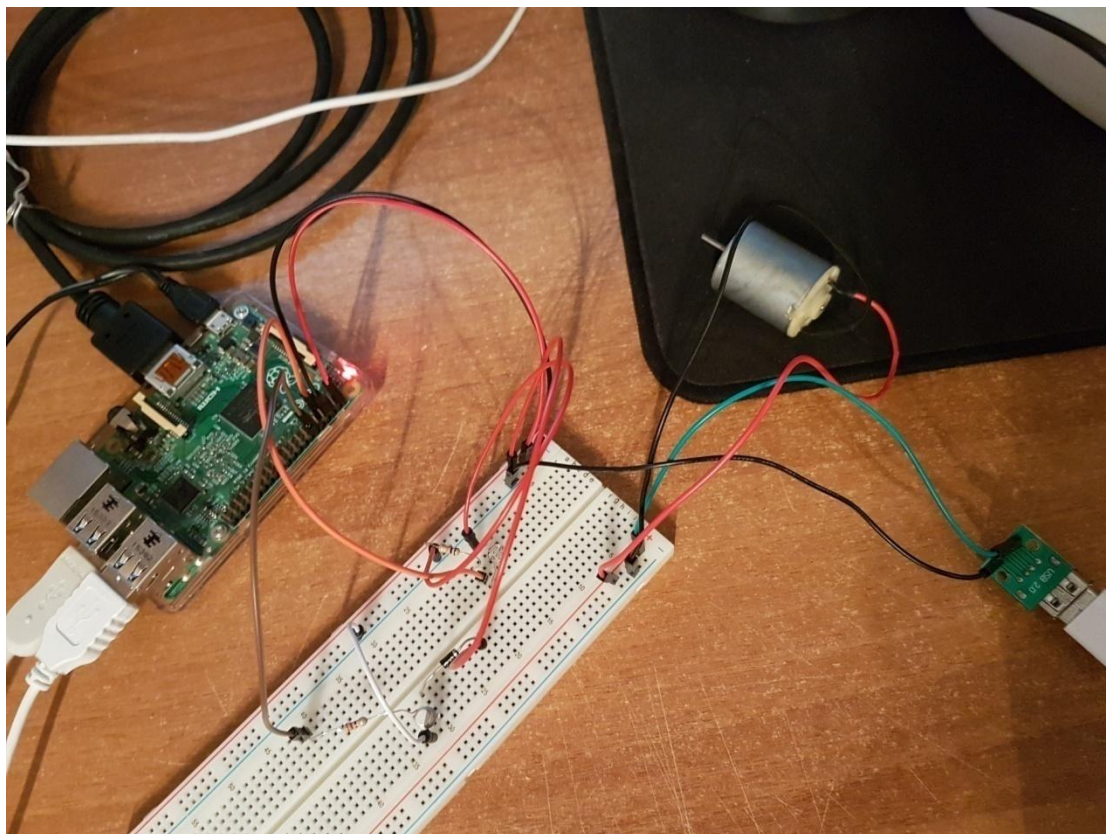


Εικόνα 45: Λειτουργία PWM (Pulse Width Modulation)

Βλέπουμε ότι όσο αυξάνεται το Duty Cycle, τόσο μεγαλώνει και το φάσμα λειτουργίας του μοτέρ.

Πείραμα για DC Motor σε συνδυασμό με Pulse Width Modulation 2

Στο συγκεκριμένο πείραμα εκτελούμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με παραπάνω, με την διαφορά ότι τώρα έχουμε διαμορφώσει τον κώδικα μας με τέτοιο τρόπο ώστε ο χρήστης που εκτελεί το πρόγραμμα να δίνει ο ίδιος την ταχύτητα που θέλει να έχει το μοτέρ μας. Παρακάτω έχουμε το κύκλωμα που δημιουργήσαμε για να τρέξουμε τον κώδικα μας.



Εικόνα 46: Φωτογραφία κυκλώματος DC Motor μαζί με τη χρήση του μετασχηματιστή πρίζας

Μετά την συνδεσμολογία, σειρά έχει ο κώδικας που γράψαμε για την λειτουργία του κυκλώματος μας. Συνδέουμε λοιπόν το κύκλωμα μας στις κατάλληλες θύρες του Raspberry και εκτελούμε τον κώδικα.

Κώδικας πειράματος

```
import RPi.GPIO as GPIO

from time import sleep

answer = 'yes'

while answer == 'yes':

    num = input("Enter a number: ")

    GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

    GPIO.setup(12, GPIO.OUT)

    pwm=GPIO.PWM(12, num)

    pwm.start(0)

    GPIO.output(12, True)

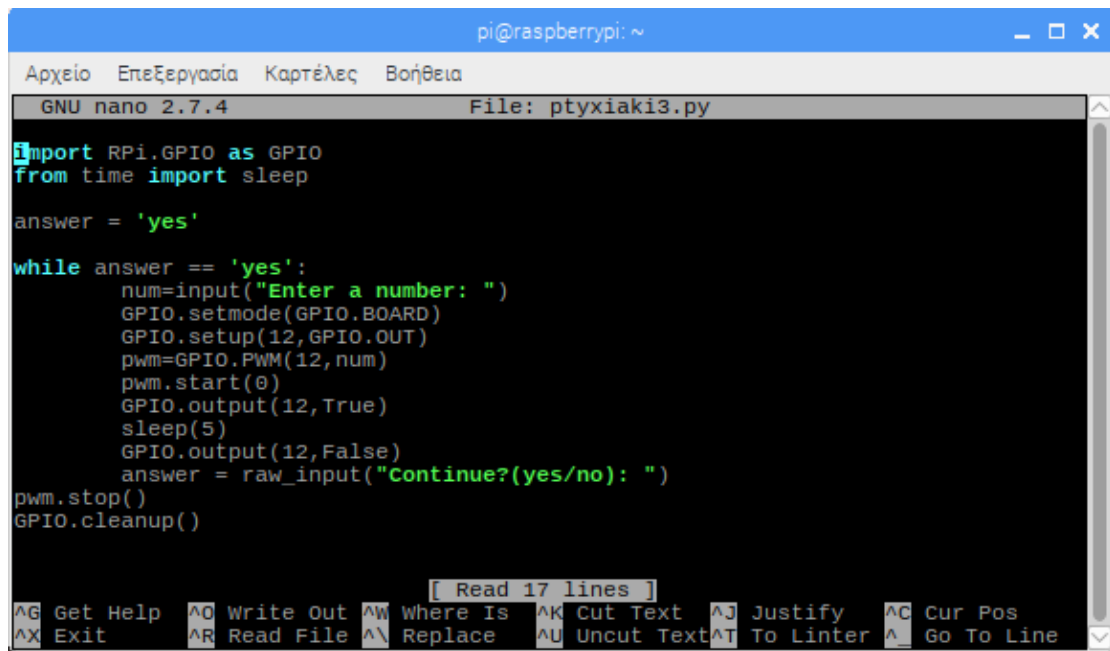
    sleep(5)

    GPIO.output(12, False)

    answer = raw_input("Continue?(yes/no): ")

pwm.stop()

GPIO.cleanup()
```



The image shows a terminal window titled "pi@raspberrypi: ~" with a menu bar containing "Αρχείο", "Επεξεργασία", "Καρτέλες", and "Βοήθεια". The terminal content is as follows:

```
GNU nano 2.7.4 File: ptyxiaki3.py
import RPi.GPIO as GPIO
from time import sleep

answer = 'yes'

while answer == 'yes':
    num=input("Enter a number: ")
    GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
    GPIO.setup(12, GPIO.OUT)
    pwm=GPIO.PWM(12, num)
    pwm.start(0)
    GPIO.output(12, True)
    sleep(5)
    GPIO.output(12, False)
    answer = raw_input("Continue?(yes/no): ")

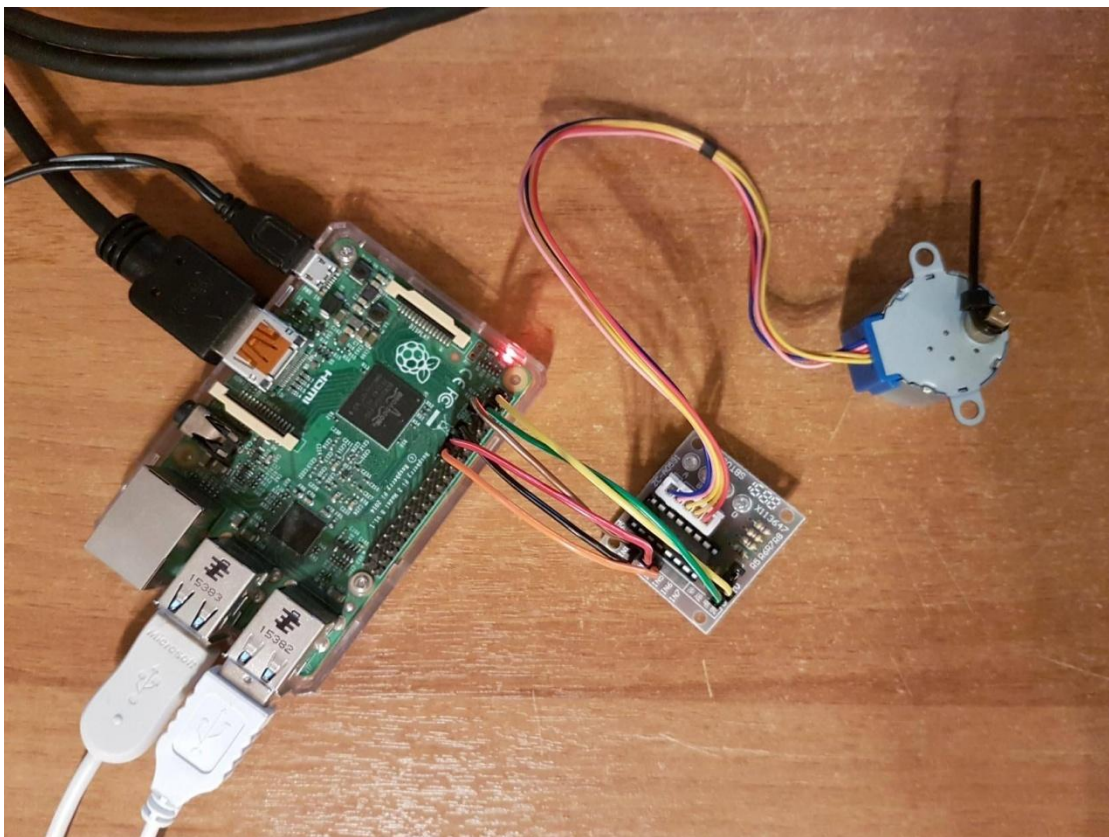
pwm.stop()
GPIO.cleanup()
```

At the bottom of the terminal, there is a status bar with the text "[Read 17 lines]" and a list of keyboard shortcuts: ^G Get Help, ^O Write Out, ^W Where Is, ^K Cut Text, ^J Justify, ^C Cur Pos, ^X Exit, ^R Read File, ^\ Replace, ^U Uncut Text, ^T To Linter, ^_ Go To Line.

Εικόνα 47: Κώδικας κυκλώματος DC Motor με PWM

Πείραμα Stepper Motor

Στο παρακάτω πείραμα με το stepper motor θέλουμε να καταφέρουμε μέσω του κώδικα που γράψαμε, να κάνουμε το μοτεράκι να γυρίσει για μισό βήμα ενώ με μια αλλαγή στον κώδικα μας μπορεί να κάνει και ένα πλήρες βήμα. Αρχικά κάνουμε εισαγωγή τα GPIO pins όπως και τον χρόνο(time) για να προσθέσουμε παρακάτω μια καθυστέρηση ανάμεσα στα pins έτσι ώστε να πετύχουμε ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των ακίδων ελέγχου. Στη συνέχεια έχουμε τον πίνακα με τα αντίστοιχα pin που θα χρησιμοποιήσουμε. Παρακάτω βλέπουμε τον πίνακα που έχουμε φτιάξει από τον οποίο παίρνει τα στοιχεία το πρόγραμμα για να κάνει μισό βήμα το μοτέρ. Ο δυσδιάστατος πίνακας που δημιουργήσαμε συγκρατεί την ακολουθία 8 βημάτων για το μισό βήμα. Το i θα πάρει τιμές μέχρι 512 γιατί 512 φορές σημαίνει πλήρης περιστροφή δηλαδή 8 κύκλους. Για παράδειγμα αν το halfstep είναι 0 και το pin 0 αυτό σημαίνει αντίστοιχα ότι παίρνουμε το κομμάτι του πίνακα [1,0,0,0] και το pin [7]. Άρα επειδή το pin [7] είναι HIGH και είναι ίσο με την γραμμή 0 και θέση 0 αυτό συνεπάγεται σε 1 και έτσι γίνεται HIGH. Έτσι αντίστοιχα συνεχίζει το πρόγραμμα μας για τα υπόλοιπα pin που έχουμε δηλώσει.



Εικόνα 48: Φωτογραφία κυκλώματος STEPPER Motor

Κώδικας πειράματος

```
import RPi.GPIO as GPIO

import time

GPIO.setmode(GPIO.BOARD)

control_pins=[7,11,13,15]

for pin in control_pins:

    GPIO.setup(pin, GPIO.OUT)

    GPIO.output(pin, 0)

halfstep_seq = [

    [ 1,0,0,0],

    [1,1,0,0],

    [0,1,0,0],

    [0,1,1,0],

    [0,0,1,0],

    [0,0,1,1],

    [0,0,0,1],

    [1,0,0,1]

]

for i in range(512):

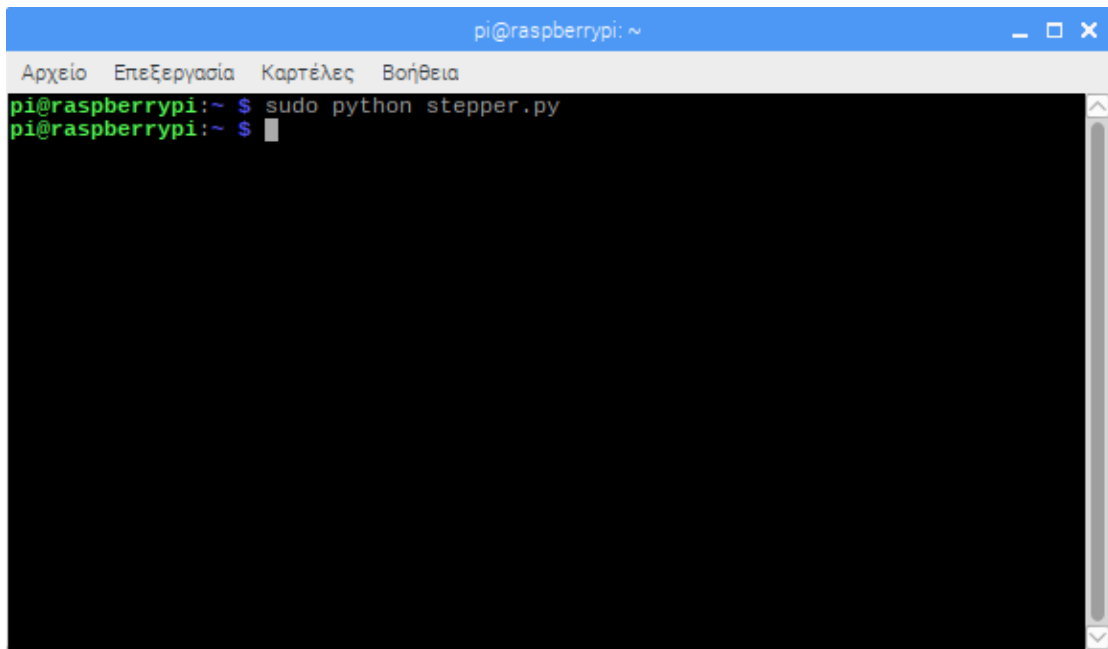
    for halfstep in range(8):

        for pin in range(4):

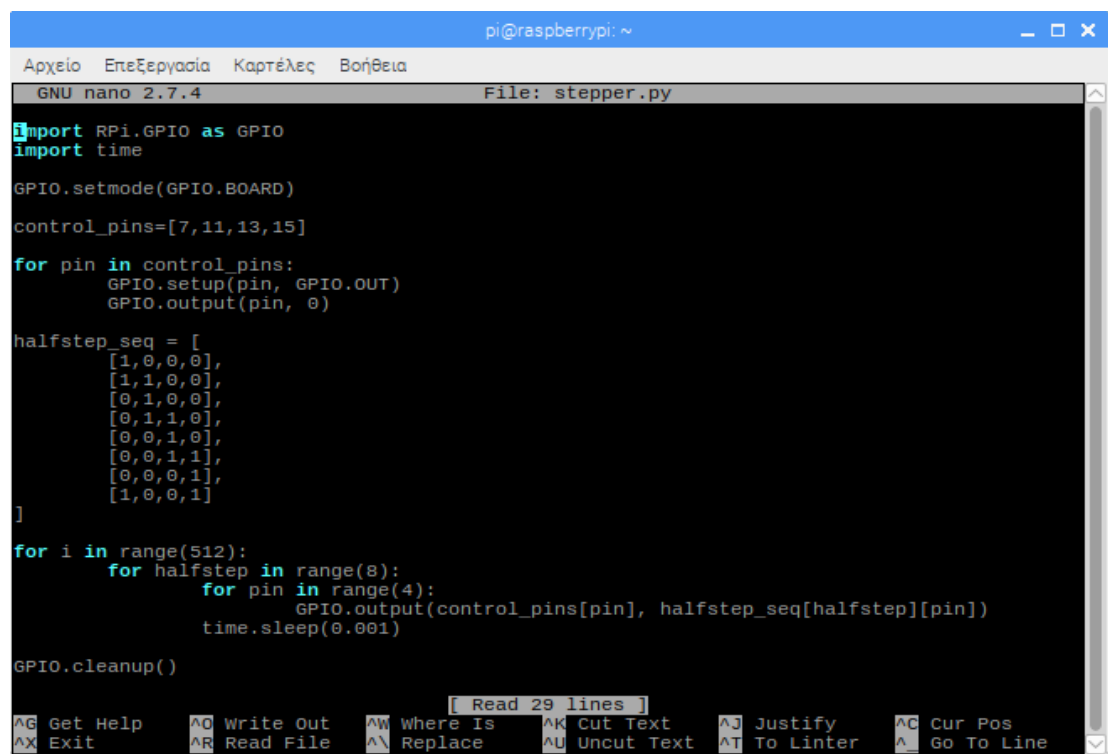
            GPIO.output (control_pins[pin], halfstep_seq[halfstep][pin])

        time.sleep(0.001)

GPIO.cleanup()
```



Εικόνα 49: Terminal πειράματος STEPPER Motor με PWM



Εικόνα 50: Κώδικας κυκλώματος STEPPER Motor

Δικτυογραφία

1. <https://www.doctorandroid.gr/2018/12/raspberry-pi-basics.html>
2. <https://www.pcsteps.gr/52828-%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%BF-raspberry-pi/>
3. <http://www.peatonet.com/el/raspberry-pi-y-los-pines-gpio-que-son-y-que-usos-practicos-les-podemos-dar/>
4. <https://en.wikipedia.org/wiki/Raspbian>
5. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B9%CF%84%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE_ARM
6. <https://www.electronics-tutorials.ws/blog/pulse-width-modulation.html>
7. <https://www.instructables.com/id/DC-Motor-Control-With-Raspberry-Pi-and-L293D/>
8. <https://learn.adafruit.com/adafruit-raspberry-pi-lesson-9-controlling-a-dc-motor/pwm>
9. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%84%CF%81%CE%B1%CE%BD%CE%B6%CE%AF%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81
10. http://users.sch.gr/siliadakis/images/docs/light%20sensors%203_4.pdf
11. <https://www.ardumotive.com/how-to-use-a-photoresistor-gr.html>
12. <https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY482/notes/mosfet.pdf>
13. http://users.tem.uoc.gr/~komineas/Teaching/MEM104_2017/Lectures/01_1_lecture.html
14. <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/200206+Raspberry+Pi+4+1GB+2GB+4GB+Product+Brief+PRINT.pdf>
15. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
16. <https://www.noesis.edu.gr/%CE%B5%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B7-%CE%BA%CE%B1%CE%B9-%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1/%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82/%CF%84%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1/%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82-%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B1%CF%82/>
17. <http://repository.library.teimes.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5631/BHMATIKOI%20KINHTH%CE%A1%CE%95%CE%A3%20%CE%9A>

[%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%95%CE%A5%CE%97%20%CE%9A%CE%91%CE%99%20%CE%9C%CE%95%CE%98%CE%9F%CE%94%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%93%CE%99%CE%91%20%CE%95%CE%9B%CE%95%CE%93%CE%A7%CE%9F%CE%A5.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

18. https://medium.com/@Keithweaver_/controlling-stepper-motors-using-python-with-a-raspberry-pi-b3fbd482f886

Βιβλιογραφία

1. Τεχνολογία Υλικού Υπολογιστικών Συστημάτων, Κωνσταντίνος Π. Ευσταθίου
2. Raspberry Pi - A Quick-Start Guide, Schmidt Maik
3. Ψηφιακή σχεδίαση και αρχιτεκτονική υπολογιστών - Έκδοση ARM, Sarah L. Harris & David Money Harris