



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Εξαμηνιαία Εργασία

στο μάθημα «Μικροηλεκτρονική και Τεχνικές Συσκευασίας»

των φοιτητών

Λυμπεράκης Γεώργιος, Α.Μ: 03118881
Σκόρδα Στεφανία, Α.Μ: 03118852
Καγιάρα Νίκη, Α.Μ: 03118031
Ταξείδη Άρτεμις, Α.Μ:03116044

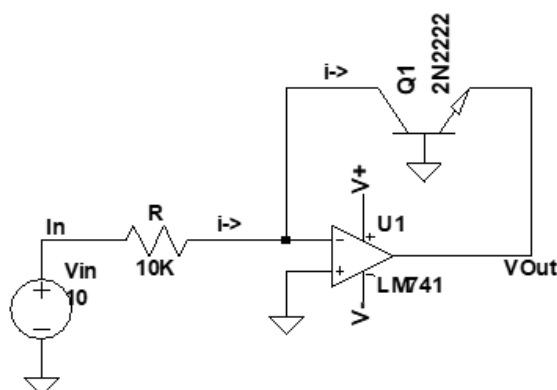
Διδάσκοντες: Χριστοφόρου Ευάγγελος

Αθήνα, Ιανουάριος 2022

Εισαγωγή – Περιγραφή Κυκλώματος

Το κύκλωμα που επιλέξαμε για τις προσομοιώσεις είναι γνωστό ως λογαριθμιστής τάσης, καθώς η τάση εξόδου που παράγει είναι ανάλογη του νεπέριου λογάριθμου της τάσης εισόδου του.

Το κύκλωμα αποτελείται από μια πηγή τάσης, μια αντίσταση, έναν opamp και ένα bjt transistor. Συγκεκριμένα επιλέξαμε ως opamp τον LM741, npn: 2N2222 και $R=10K\Omega$. Το σχηματικό φαίνεται παρακάτω:



Ακολουθεί η απόδειξη πως το κύκλωμα λειτουργεί ως λογαριθμιστής τάσης.

Ως γνωστόν, σε έναν τελεστικό ενισχυτή ισχύει, όπου A το κέρδος του, V_+ , V_- η τάση στον θετικό και τον αρνητικό ακροδέκτη εισόδου αντίστοιχα. Όμως στον ιδανικό opamp $V_{OUT}/A=0$ η αντίσταση εισόδου του τελεστικού είναι και αυτή άπειρη, οπότε δεν περνάει ποτέ ρεύμα από μέσα του καθώς

$$I_+ = I_- = 0.$$

Οπότε το ρεύμα περνάει όλο από την αρνητική ανάδραση, συνεπώς από το bjt. Άρα ισχύει για το ρεύμα του συλλέκτη $I_C = I/R$

Όμως το ρεύμα συλλέκτη ενός bjt δίνεται από τον τύπο: $I_C = I_S * (e^{\frac{V_{CE}}{V_T}} - 1)$, όπου I_S το ρεύμα κορεσμού και V_T η θερμική τάση του bjt (σύμφωνα με το datasheet του 2N2222: $I_S = 1.16 * 10^{-14} A$ και $V_T = 25.28$). Οπότε συνεπάγεται ότι: $\frac{V_{IN}}{R} = I_S * (e^{\frac{V_{CE}}{V_T}} - 1)$

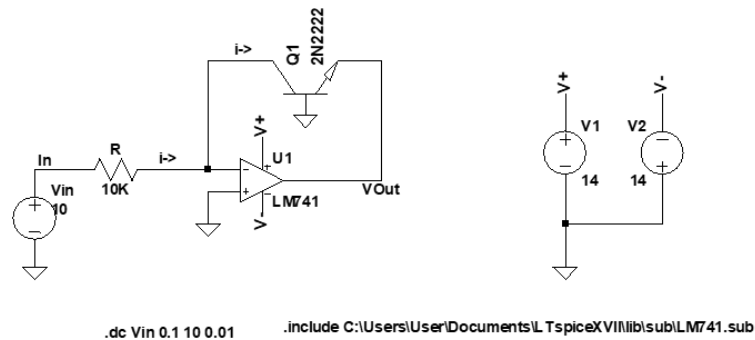
$$\left(e^{\frac{V_{CE}}{V_T}} - 1 \right) \cong I_S * e^{V_{CE}/V_T} \text{ καθώς } e^{V_{CE}/V_T} \gg 1$$

$$V_{CE} = V_- - V_{out} = -V_{out} \Rightarrow \ln\left(\frac{V_{IN}}{R}\right) = \ln(I_S) * \left(-\frac{V_{out}}{V_T}\right) \Rightarrow V_{out} = -V_T * \ln\left(\frac{V_{IN}}{R * I_S}\right)$$

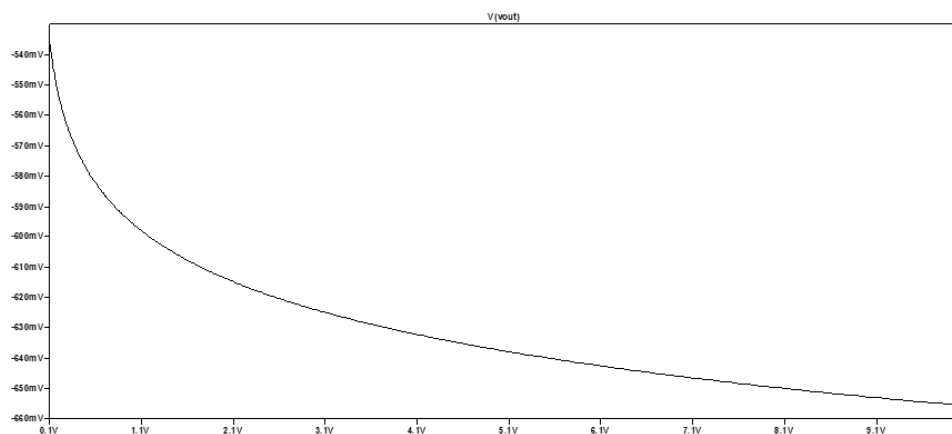
Μια αναμενόμενη τιμή τάσης εξόδου σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο είναι :για $V_{in}=10V$:

$$V_{out}=0.025*\ln(10/10^3*1.16*10^{-14})=592.2mV$$

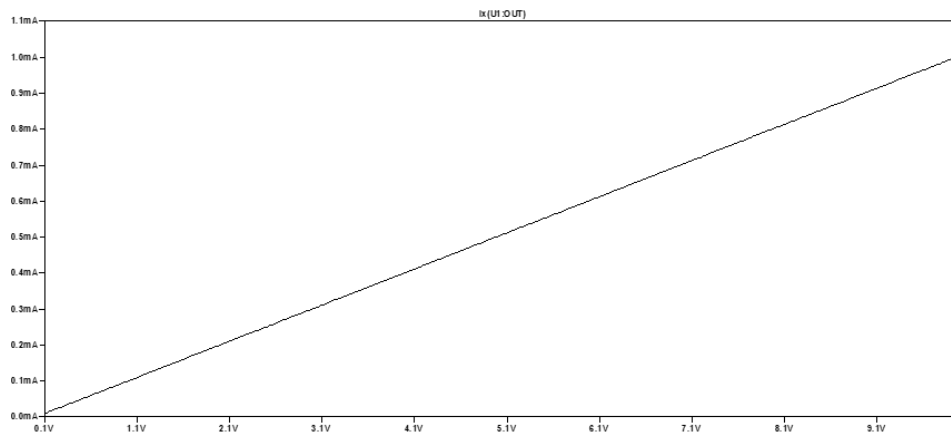
Στην συνέχεια εκτελέσαμε στο LTspice μια dc sweep προσομοίωση για να βεβαιωθούμε ότι το κύκλωμα μας λειτουργάει σωστά. Το spice δεν διαθέτει το μοντέλο του LM741, οπότε έπρεπε να το εισάγουμε εμείς. Όπως είδαμε στο datasheet του LM714, έχει τάση κόρου $\pm 15V$, οπότε βάζουμε $V_+=15-1=14V$ και $V_-=-14V$, ως θετική και αρνητική τάση τροφοδοσίας αντίστοιχα. Ορίσαμε το dc sweep για την V_{in} από 0.1 έως 10V για να δούμε την καμπύλη V_{OUT} συναρτήσεως της τάσης εισόδου. Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα έτοιμο για προσομοίωση.



Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη $V_{OUT}(V_{IN})$, η οποία, όπως φαίνεται, είναι όντως λογαριθμική και οι τιμές της βρίσκονται στην αναμενόμενη τάξη μεγέθους.

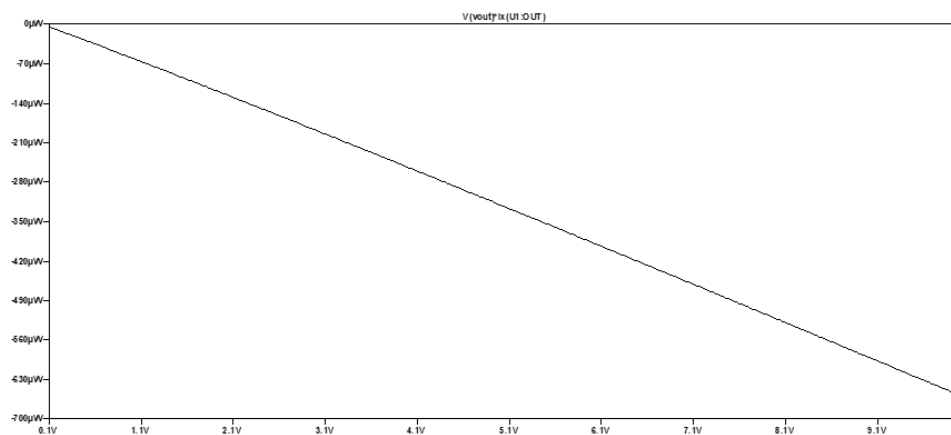


Επίσης πήραμε το ρεύμα στην έξοδο του opamp:

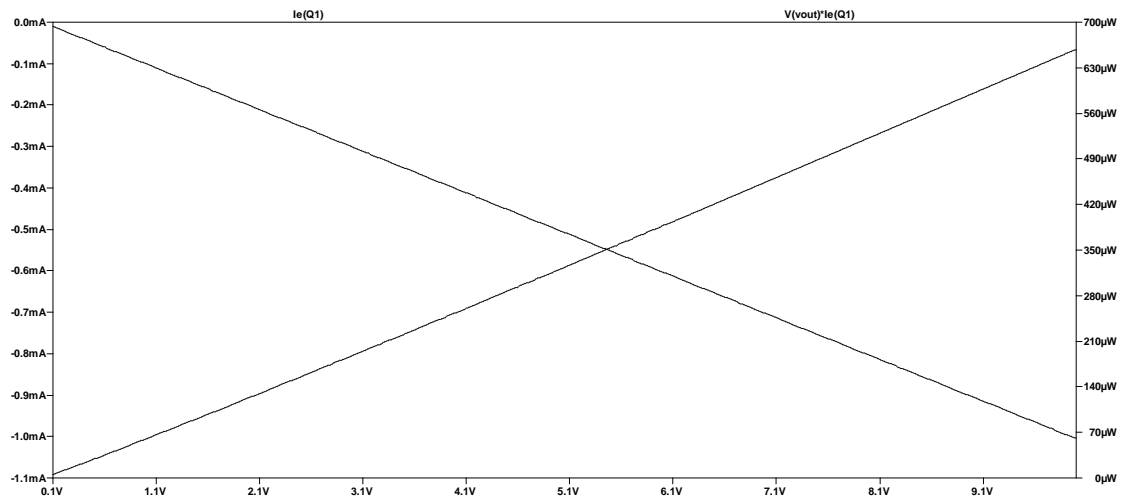


και έτσι υπολογίσαμε την ισχύ στην έξοδο του opamp $P=I_{OUT} \cdot V_{OUT}$:

Παρατηρούμε ότι έχει αρνητικό πρόσημο καθώς ο ενισχυτής καταναλώνει ισχύ που αγγίζει μέχρι τα 700μwatt.



Τέλος υπολογίσαμε το ρεύμα εξόδου από το τρανζίστορ ,το οποίο, όπως ήταν αναμενόμενο έχει το ίδιο μέτρο με του opamp ,αλλά αντίθετο πρόσημο ,καθώς το ρεύμα στον opamp έχει φορά προς τα έξω, οπότε η ισχύς θα είναι θετική.



Σχεδίαση Πλακέτας Κυκλώματος (EAGLE)

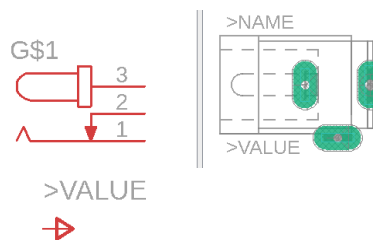
Στο συγκεκριμένο μέρος της αναφοράς, θα γίνει η σχεδίαση του σχηματικού της κυκλωματικής διάταξης που επιλέξαμε, του λογαριθμιστή τάσης, καθώς και η σχεδίαση της πλακέτας για την συγκεκριμένη διάταξη μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος EAGLE.

Το σχεδιαστικό πρόγραμμα EAGLE παρέχει στους χρήστες ένα σχετικά βατό τρόπο εκμάθησης και χρήση του layout editor και σχεδίασης της διάταξης, ενώ επιτρέπει επίσης στους χρήστες να υλοποιούν πιο σύνθετα σχέδια.

Το πρώτο βήμα για τη μετάβαση από μία προσομοίωση της διάταξης μέσω του LTspice, όπως έγινε προηγουμένως, είναι η αναδημιουργία του σχεδίου στο EAGLE προσθέτοντας τα ζητούμενα εξαρτήματα και συνδεοντάς τα στο schematic editor. Για να γίνει αυτό, το EAGLE παρέχει τη δυνατότητα αναζήτησης για τα components που ζητάμε.

Τα components που χρησιμοποιήθηκαν για την σχεδίαση του λογαριθμιστή τάσης είναι τα εξής:

DC Power Jack: SPC4077

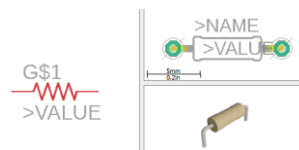


Τροφοδοσία Κυκλώματος: V+,V-

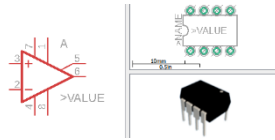
Γείωση(GND):



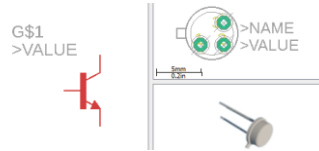
Αντίσταση 10k: R-US_0207/10



OPAMP: LM741P



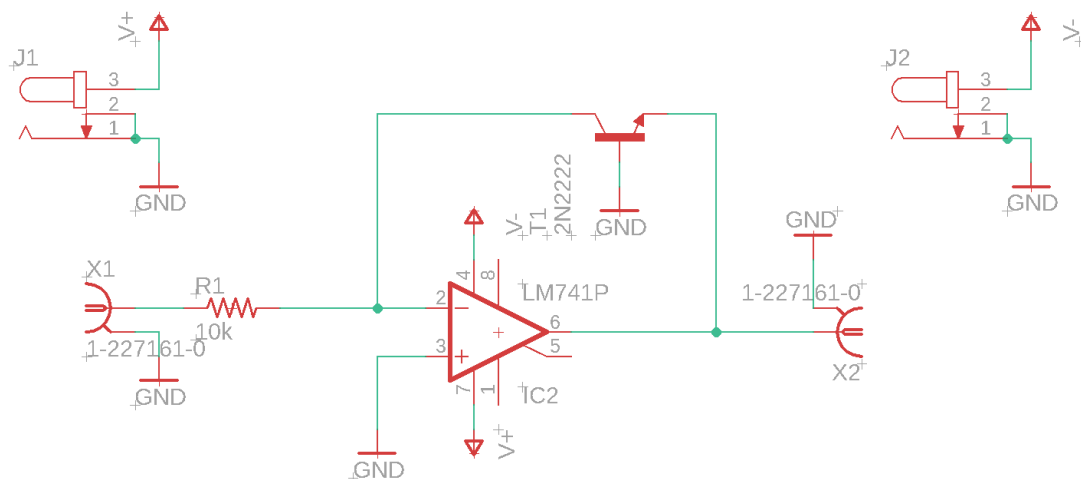
Τρανζίστορ BJT: 2N2222



Ομοαξονικό Καλώδιο(con-coax): 1-227161

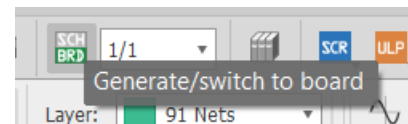


Παρατίθεται το σχηματικό του λογαριθμικού ενισχυτή:

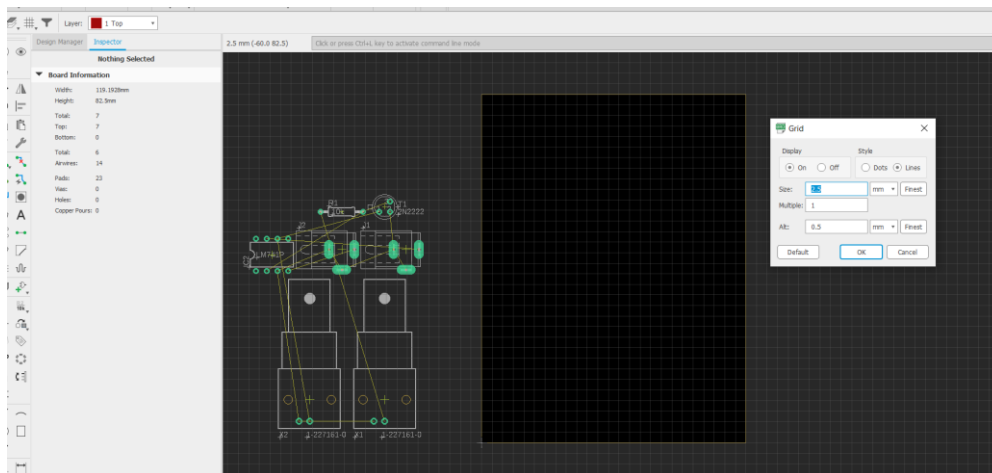


Πατώντας το εικονίδιο ERC, ελέγχθηκε το κύκλωμα για τυχόν σφάλματα. Εφόσον δεν υπήρχαν σφάλματα, συνεχίζουμε στην κατασκευή της πλακέτας.

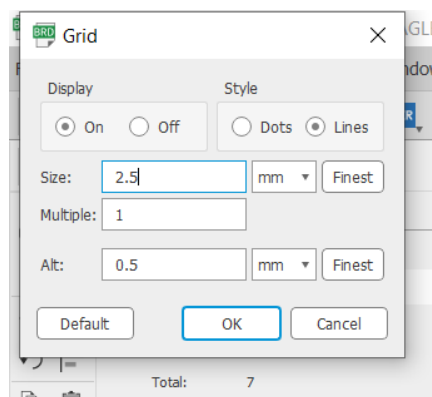
Πατώντας Generate/Switch to board, ξεκινάμε την σχεδίαση και κατασκευή του PCB.



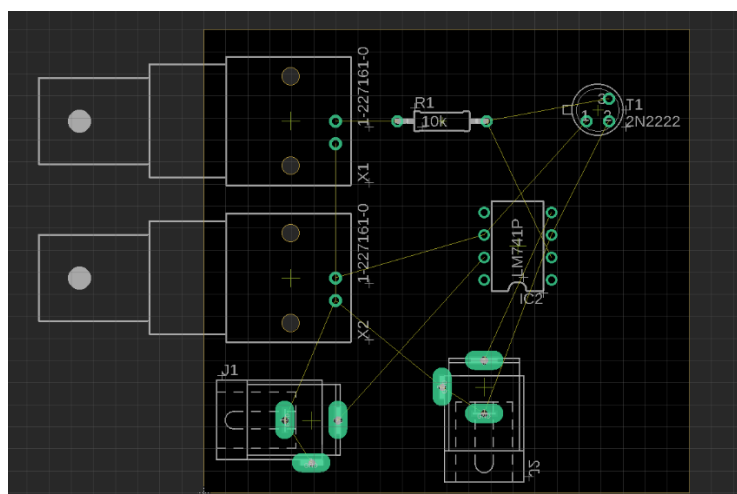
Έχοντας έτοιμο το Schematic, μεταφερόμαστε στο περιβάλλον board layout.



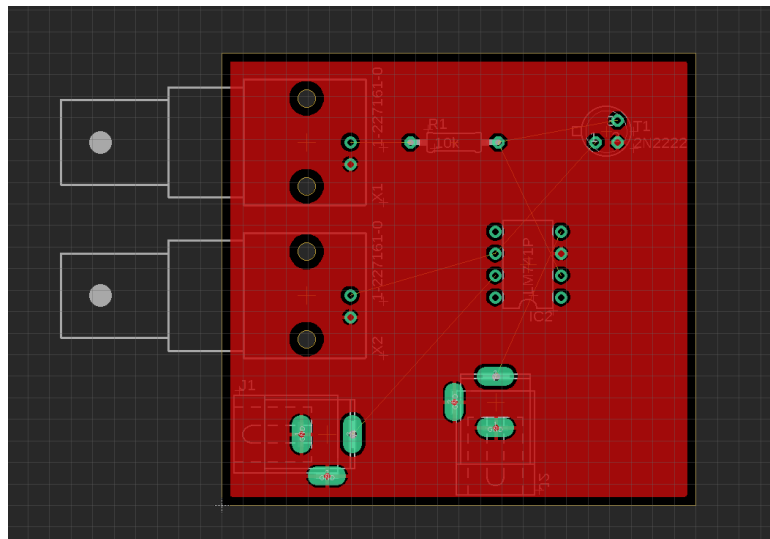
Στη συνέχεια, ορίζουμε τις διαστάσεις του grid για την διευκόλυνση της σχεδίασής μας.



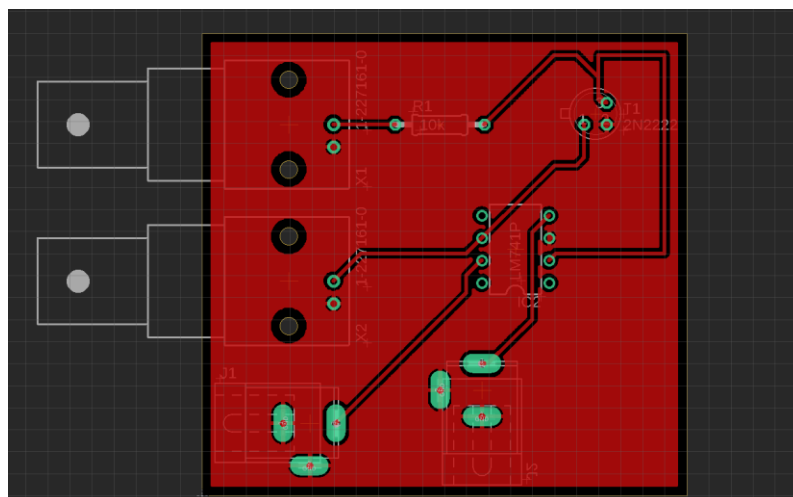
Τοποθετούμε λοιπόν τα εξαρτήματα στον χώρο της πλακέτας με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή αλληλοεπικάλυψη των Airwires.



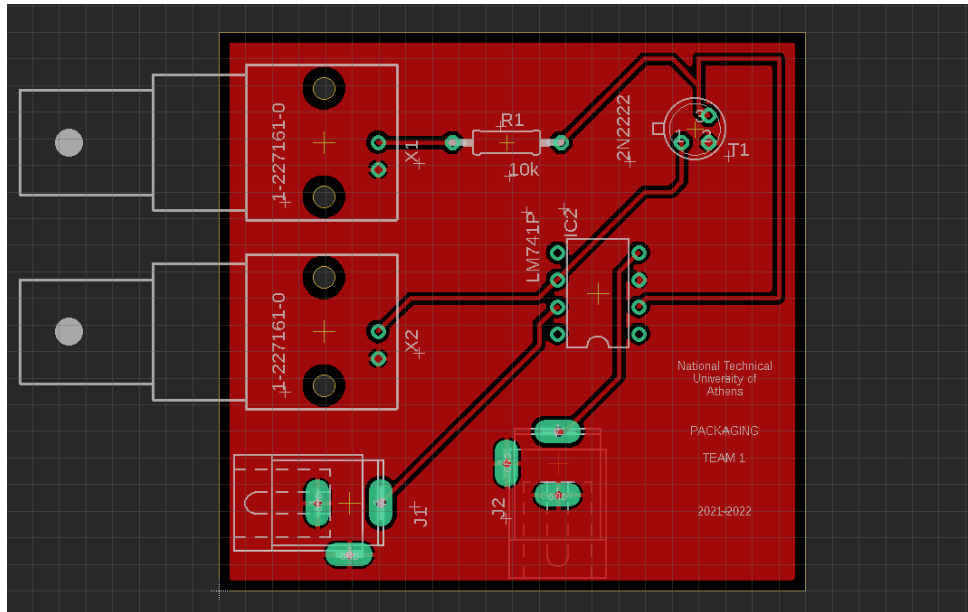
Ορίζουμε στην συνέχεια το Ground plane της πλακέτας με όρθια γωνία, width&isolate : 40.64mil :



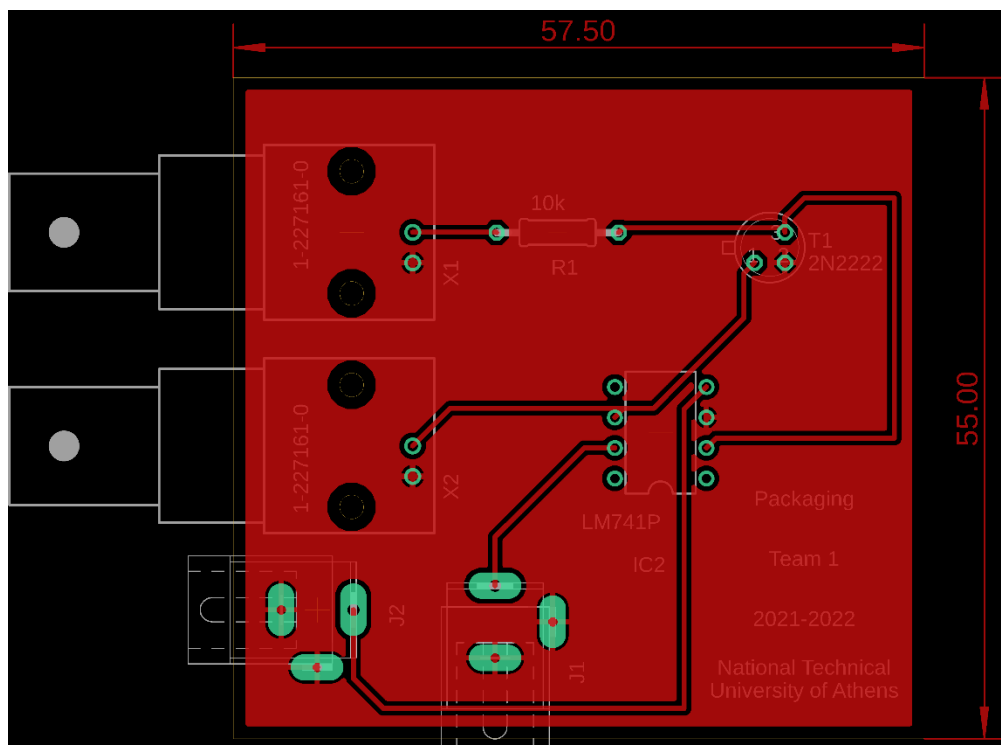
Έπειτα ορίζουμε τους αγωγικούς δρόμους με αμβλεία γωνία και width: 40.64mil :



Αφού ελέγξαμε ότι δεν υπάρχουν Airwires, πατήθηκε το πλήκτρο DRC για έλεγχο της πλακέτας. Με προσαρμογή των θέσεων των ονομάτων του κάθε εξαρτήματος, η τελική πλακέτα PCB είναι η εξής:



Και ως αρχείο tif:



Σχεδίαση και κατασκευή ψυκτρών (Fusion 360)

Σε πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές, η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό σχεδιαστικό παράγοντα. Οι απώλειες μεταγωγής (switching losses) και αγωγιμότητας (conduction losses) θερμαίνουν το πυρίτιο του στοιχείου πάνω από την μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία ένωσης (Maximum Junction Temperature - T_{jmax}), και προκαλούν αποτυχία απόδοσης, βλάβη ή και καταστροφή της διάταξης.

Η διαχείριση του θερμικού φορτίου προσδιορίζεται στο στάδιο σχεδιασμού του PCB με σχεδίαση κατάλληλων ψυκτρών (ενεργών ή παθητικών), προσφέροντας δυνατότητα βελτιστοποίησης του συστήματος, μεγαλύτερη ευελιξία, περισσότερες επιλογές και περιορισμό των πιθανών αστοχιών μετά την ολοκλήρωση του σχεδιασμού. Στόχος της προσάρτησης ψυκτρών στα κρίσιμα στοιχεία της διάταξης είναι η μείωση της T_j έτσι ώστε να μην υπερβαίνει την T_{jmax} του στοιχείου.

Παράμετροι σχεδίασης ψύκτρας

Η σχεδίαση της ψύκτρας (σχήμα, υλικό κ.ο.κ.) βασίζεται στους τρόπους μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, θερμική ακτινοβολία) και τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτώνται. Πιο συγκεκριμένα:

- **Μετάδοση της θερμότητας με αγωγή:**

Σύμφωνα με τον Νόμο Fourier, η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εκφράζει τη ροή θερμότητας Q από ένα σώμα στο άλλο μέσω επαφής.

$$Q = \frac{kA_c}{t} \cdot (T_1 - T_2)$$

Q : Θερμότητα (Watt)

k : Θερμική αγωγιμότητα θερμαινόμενου υλικού (W/m-°C)

A_c : Επιφάνεια επαφής (m^2)

T : Θερμοκρασία (C)

t : πάχος του υλικού (m)

Επομένως για μέγιστη μετάδοση θερμότητας από το στοιχείο ενδιαφέροντος στο εξωτερικό περιβάλλον η ψύκτρα πρέπει να έχει μεγάλη επιφάνεια επαφής με το στοιχείο (άρα η επιφάνεια επαφής πρέπει να είναι λεία), μικρό πάχος (στην επιφάνεια επαφής) και να αποτελείται από υλικό με υψηλή θερμική αγωγιμότητα (τόσο η ψύκτρα όσο και η πάστα κόλλησης της).

- **Μετάδοση της θερμότητας με (ελεύθερη) μεταφορά (συναγωγή):**

Μεταφορά θερμότητας στα υγρά και τα αέρια όπου ποσότητες κινούμενου ρευστού θερμαίνονται και μεταφέρονται σε ψυχρότερη περιοχή, όπου και προκαλούν την θέρμανσή της. Μπορεί να υπάρξει διάδοση μεταξύ στερεού και υγρού ή αέριου σώματος.

$$Q = h_c A_s \cdot (T_s - T_a)$$

h_c : συντελεστής μεταφοράς (εξαρτάται από το ρευστό και την ταχύτητα του)

A_s : επιφάνεια επαφής με το ρευστό

T_s : θερμοκρασία επιφάνειας

T_a : θερμοκρασία ρευστού

Στην περίπτωση των ψυκτρών η συναγωγή είναι ροή αέρα (σε θερμοκρασία περιβάλλοντος χωρίς εξαναγκασμένη ροή/άγνωστη ταχύτητα) ανάμεσα στα “πτερύγια” (fins) που προκαλείται από δυνάμεις άνωσης λόγω διαφορετικών πυκνοτήτων, που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας στο ρευστό. Επομένως, από τα παραπάνω, τα πτερύγια πρέπει να είναι κάθετα ευθυγραμμισμένα και η μεταξύ τους απόσταση να είναι τυπικά μεγαλύτερη των 0.6mm ώστε να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής ρευστού-ψύκτρας.

▪ Μετάδοση με θερμική ακτινοβολία:

Η θερμική ακτινοβολία διαδίδεται στο χώρο με την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ δύο επιφανειών. Από την εξίσωση Stefan-Boltzmann :

$$Q = \varepsilon \sigma A_r (T_s^4 - T_a^4)$$

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_a)(T_s^2 - T_a^2)$$

ε : emissivity (χαρακτηριστικό υλικού)

A_r : επιφάνεια ακτινοβολήσης

T_s : θερμοκρασία επιφάνειας

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$ η σταθερά Stefan-Boltzmann

T_a : θερμοκρασία ρευστού

h_r : συντελεστής μεταφοράς θερμικής ακτινοβολίας

Επομένως για μέγιστη μετάδοση θερμότητας από το στοιχείο ενδιαφέροντος στο εξωτερικό περιβάλλον η ψύκτρα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ελεύθερη εκτιθέμενη επιφάνεια και να αποτελείται από υλικό με υψηλό emissivity.

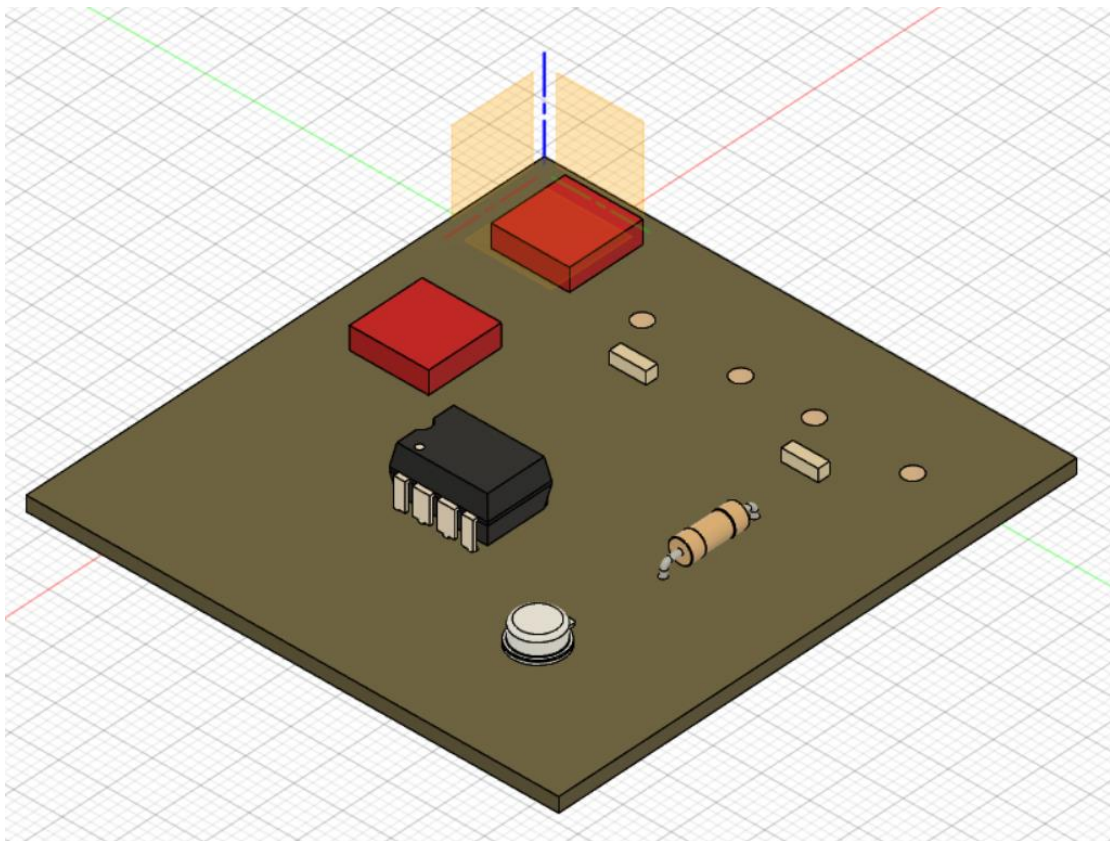
Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω κανόνες για βέλτιστη σχεδίαση ψυκτρών και με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Fusion 360, ακολουθεί η σχεδίαση και

εφαρμογή ψυκτρών στα κρίσιμα στοιχεία της διάταξης (τελεστικός ενισχυτής, διπολικό τρανζίστορ).

Σχεδίαση ψυκτρών στο Fusion 360

Έχοντας σχεδιάσει το κύκλωμα και το PCB στο Eagle, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, λαμβάνεται το step αρχείο της διάταξης, από το οποίο με εισαγωγή στο Fusion 360 προκύπτει η τρισδιάστατη αναπαράσταση της διάτρητης πλακέτας που σχεδιάστηκε (σχήμα 1).

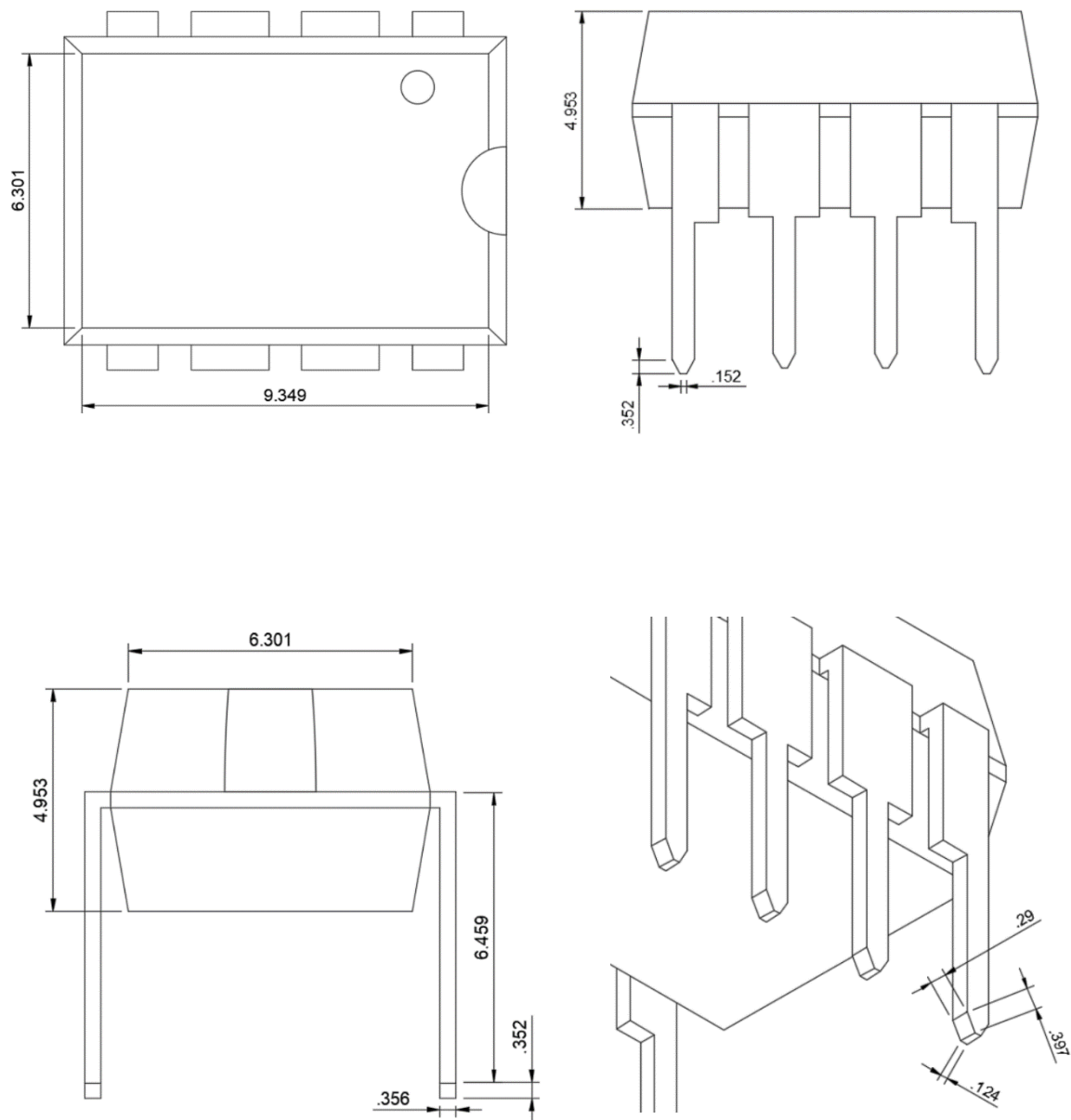
Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης ψυκτρών για κάθε ένα από τα δύο στοιχεία.



Σχήμα 1: Τρισδιάστατη αναπαράσταση PCB στο fusion 360

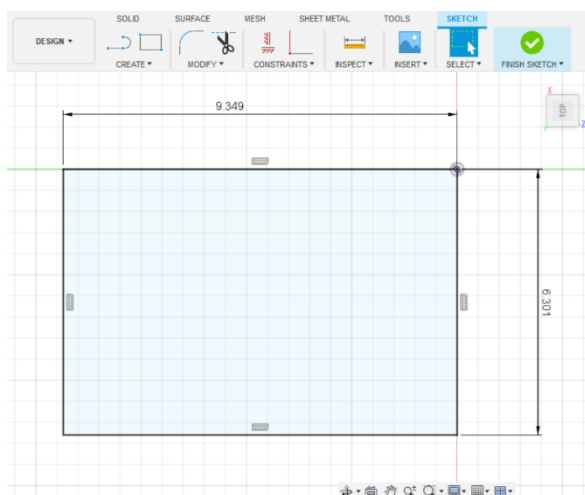
- Op Amp LM741

Από την τρισδιάστατη απεικόνιση του PCB απομονώνεται ο τελεστικός ενισχυτής και με το εργαλείο inspect μετρούνται οι βασικές διαστάσεις του LM741P, οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

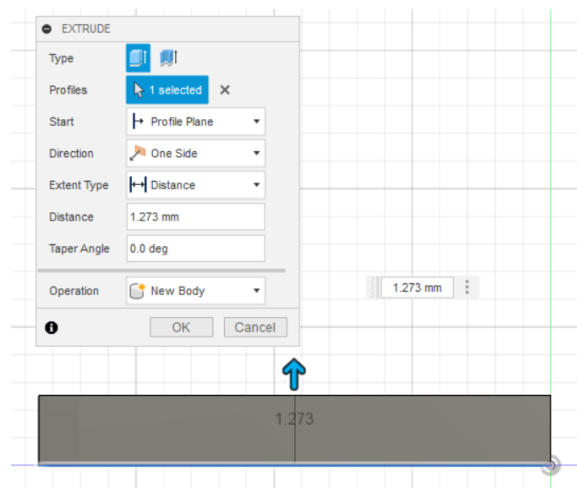


Σχήμα 2: Διαστασιολόγηση τελεστικού ενισχυτή

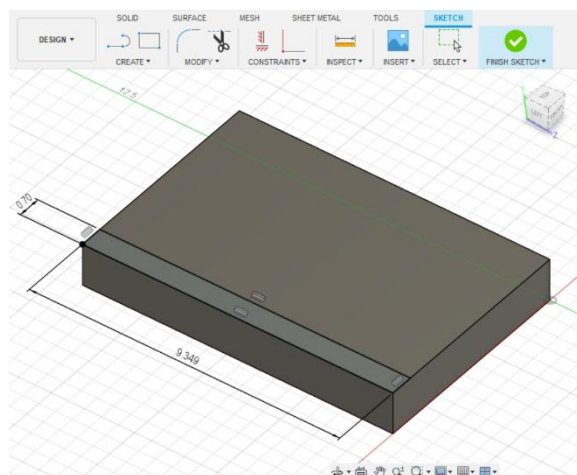
1^η Σχεδίαση:



Σχήμα 3: 1ο Βήμα Σχεδίασης



Σχήμα 4: 2ο Βήμα Σχεδίασης

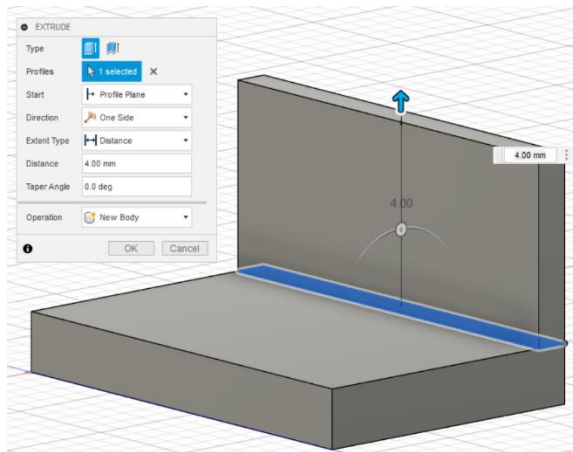


Σχήμα 5: 3ο Βήμα Σχεδίασης

Σε νέο project δημιουργείται sketch το οποίο επιλέγεται να είναι ορθογώνιο σχεδιασμένο με βάση το κέντρο του. Επειδή η ψύκτρα του or amp θα προσκολληθεί στην άνω βάση του (μεγάλη επιφάνεια επαφής με το στοιχείο - βέλτιστη επιλογή σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε) επιλέγονται διαστάσεις ορθογωνίου 9.349 mm, 6.301 mm και οριστικοποιείται η σχεδίαση (σχήμα 3).

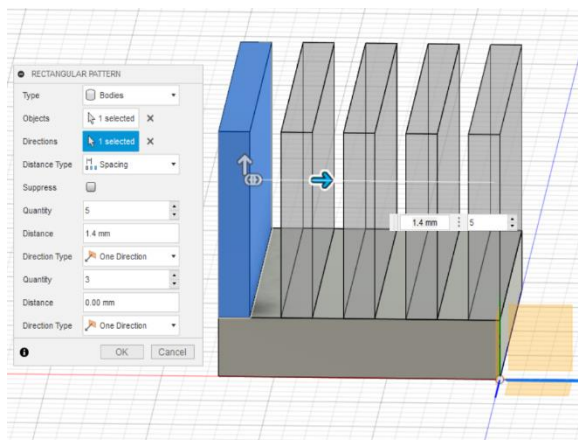
Για την δημιουργία τρισδιάστατης βάσης, με δεξί κλικ πάνω στο sketch επιλέγεται το εργαλείο press pull. Ορίζεται ως πάχος 1.273 mm (επιλέχθηκε περίπου ως το $\frac{1}{4}$ του πάχους του LM741 – ικανοποιητική επιλογή δεδομένου ότι η ψύκτρα πρέπει να διαθέτει μικρό πάχος στην επιφάνεια επαφής του στοιχείου) στην θετική φορά του κάθετου στο επίπεδο άξονα και δημιουργείται νέο στερεό σώμα (σχήμα 4).

Δεδομένης της ανάλυσης των παραμέτρων σχεδίασης ψύκτρας που προηγήθηκε (πτερύγια κάθετα στην βάση - μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια) δημιουργείται ορθογώνιο sketch στο άνω επίπεδο της βάσης με μήκος το μήκος της μεγάλης διάστασης της και πλάτος 0.7mm (προσάρτηση 5 όμοιων fins με ίσα μεταξύ τους διαστήματα $\rightarrow 6.301/9 \sim 0.7\text{mm}$) και οριστικοποιείται η σχεδίαση (σχήμα 5).



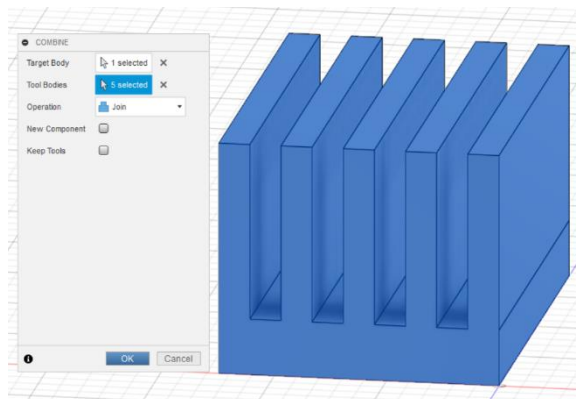
Σχήμα 6: 4ο Βήμα Σχεδίασης

Για δημιουργία τρισδιάστατου fin, με δεξί κλικ πάνω στο sketch επιλέγεται το εργαλείο press pull. Ορίζεται ως πάχος 4mm (επιλέχθηκε περίπου όσο του πάχους του LM741) στην θετική φορά του κάθετου στην βάση άξονα και δημιουργείται νέο στερεό σώμα (όχι joint ώστε να είναι δυνατή η επιλογή του ως ξεχωριστό σώμα- χρήσιμο στο επόμενο βήμα για προσθήκη των υπόλοιπων fins) (σχήμα 6).



Σχήμα 7: 5ο Βήμα Σχεδίασης

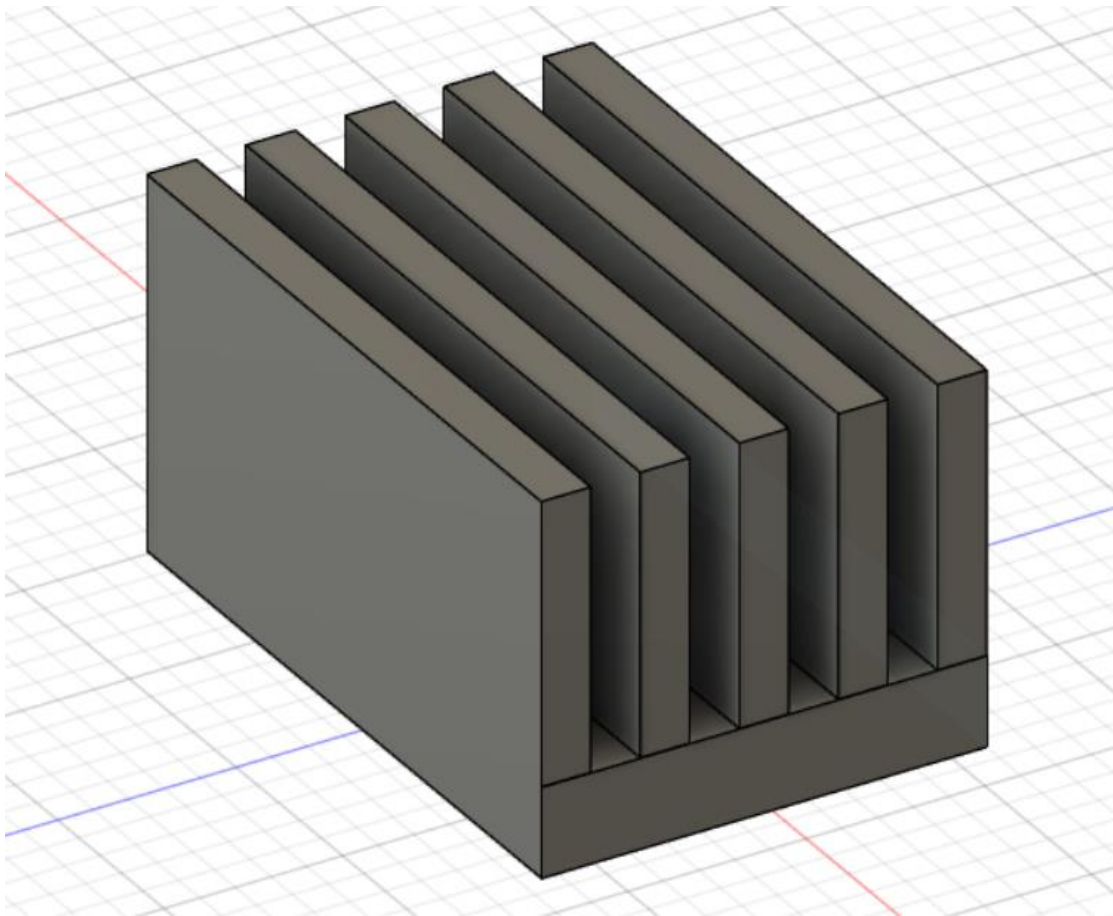
Για ταχύτερη δημιουργία των fins, από το μενού επιλέγεται create → pattern → rectangular pattern που επαναλαμβάνει το αντικείμενο της επιθυμίας μας. Για επιλογή όλου του περυγίου ορίζεται type → bodies ενώ ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο x, ως τρόπος διάταξης των fins η μεταξύ τους απόσταση η οποία ισούται με 1.4mm (0.7 διάκενο + 0.7 από την αρχή του προηγούμενου fin) και αριθμός περυγίων στο 5 (σχήμα 7).



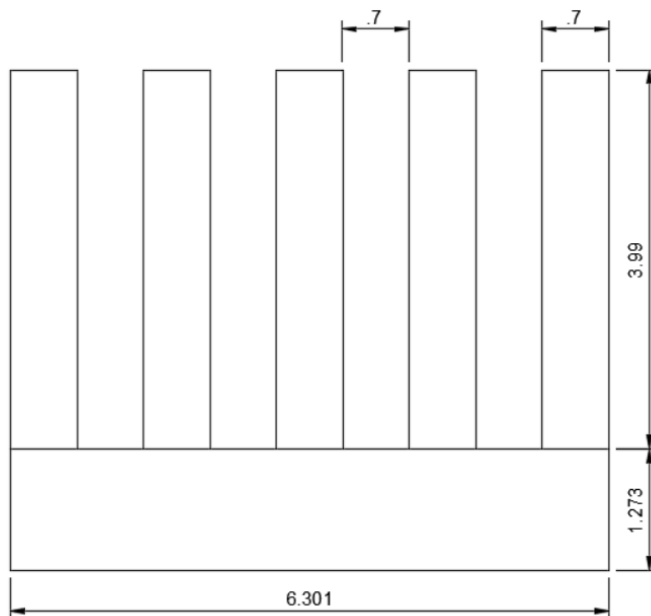
Σχήμα 8: 6ο Βήμα Σχεδίασης

Το τελικό βήμα είναι η ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων (fins, base της ψύκτρας). Από από το μενού επιλέγεται modify → combine, ορίζεται operation → join και διαλέγονται τα στοιχεία που θα ενοποιηθούν. Με αυτό τον τρόπο η ψύκτρα ορίζεται ως ενιαίο στερεό (σχήμα 8).

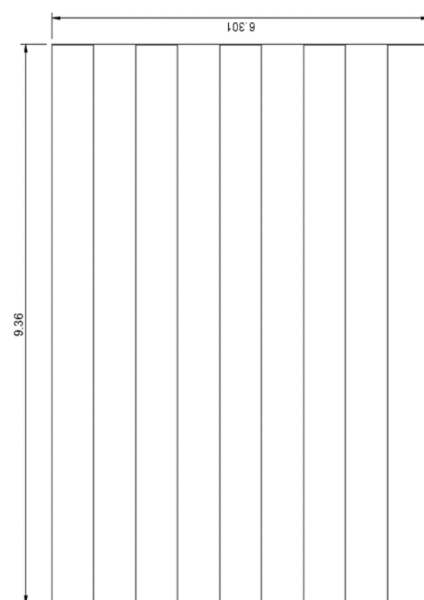
Ακολουθούν όψεις και τομές της 1^{ης} ψύκτρας που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 9: Τελικό αποτέλεσμα σχεδίασης 1ης ψύκτρας στο fusion 360



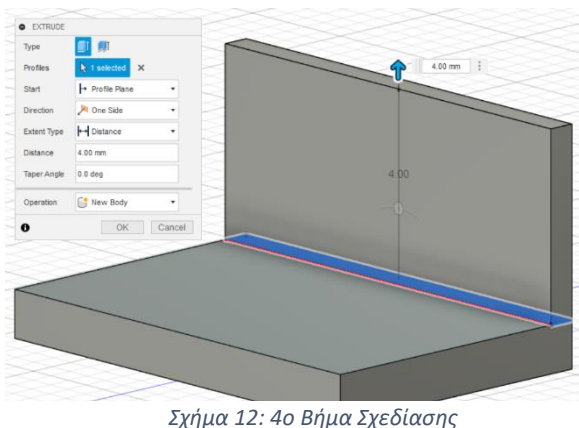
Σχήμα 10: Πρόσοψη ψύκτρας



Σχήμα 11: Κάτοψη ψύκτρας

2^η Σχεδίαση:

Τα βήματα που περιγράφηκαν παραπάνω είναι κοινά και για τις 2 σχεδιάσεις, με μικρές διαφοροποιήσεις. Οπότε για λόγους συντομίας θα παρουσιαστούν μόνο οι διαφορές τους.

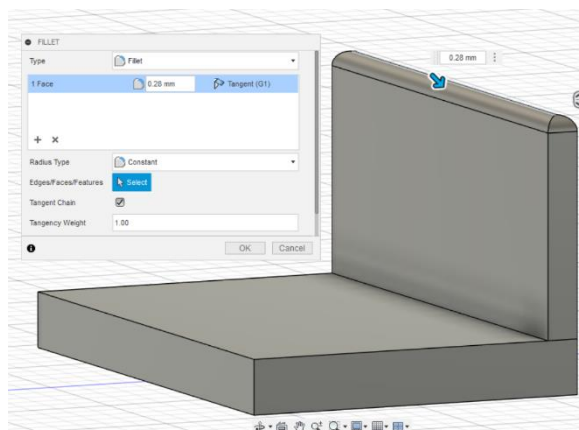


Σχήμα 12: 4ο Βήμα Σχεδίασης

Έχοντας βάση πάχους 1mm

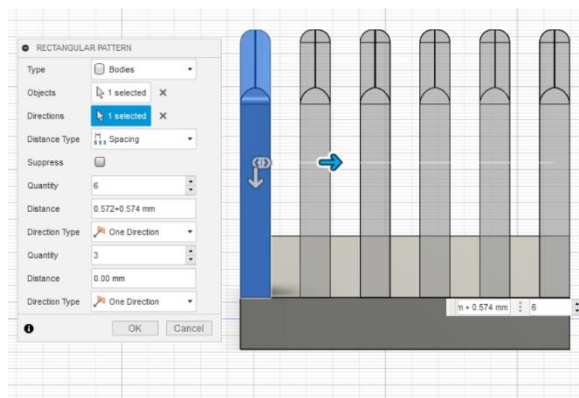
(βήματα 1-2) δημιουργούνται περυγία πλάτους 0.572 mm (προσάρτηση 6 όμοιων fins με μεταξύ τους διαστήματα 0.574 mm), μήκους 9.349mm (βήμα 3) και ύψους 4mm (βήμα 4).

(σχήμα 12)



Σχήμα 13: 5ο Βήμα Σχεδίασης

Δεδομένης της ανάλυσης των παραμέτρων σχεδίασης ψύκτρας που προηγήθηκε, στην δεύτερη περίπτωση “φιλετάρουμε” την κορυφή του fin ώστε να αυξηθεί η ελεύθερη επιφάνεια του. Από το μενού επιλέγεται modify → fillet, διαλέγουμε την άνω επιφάνεια του περυγίου και ορίζεται εφαπτόμενη γραμμή μήκους 0.28 mm βάση της οποίας θα γίνει η κυκλική τομή (σχήμα 13).

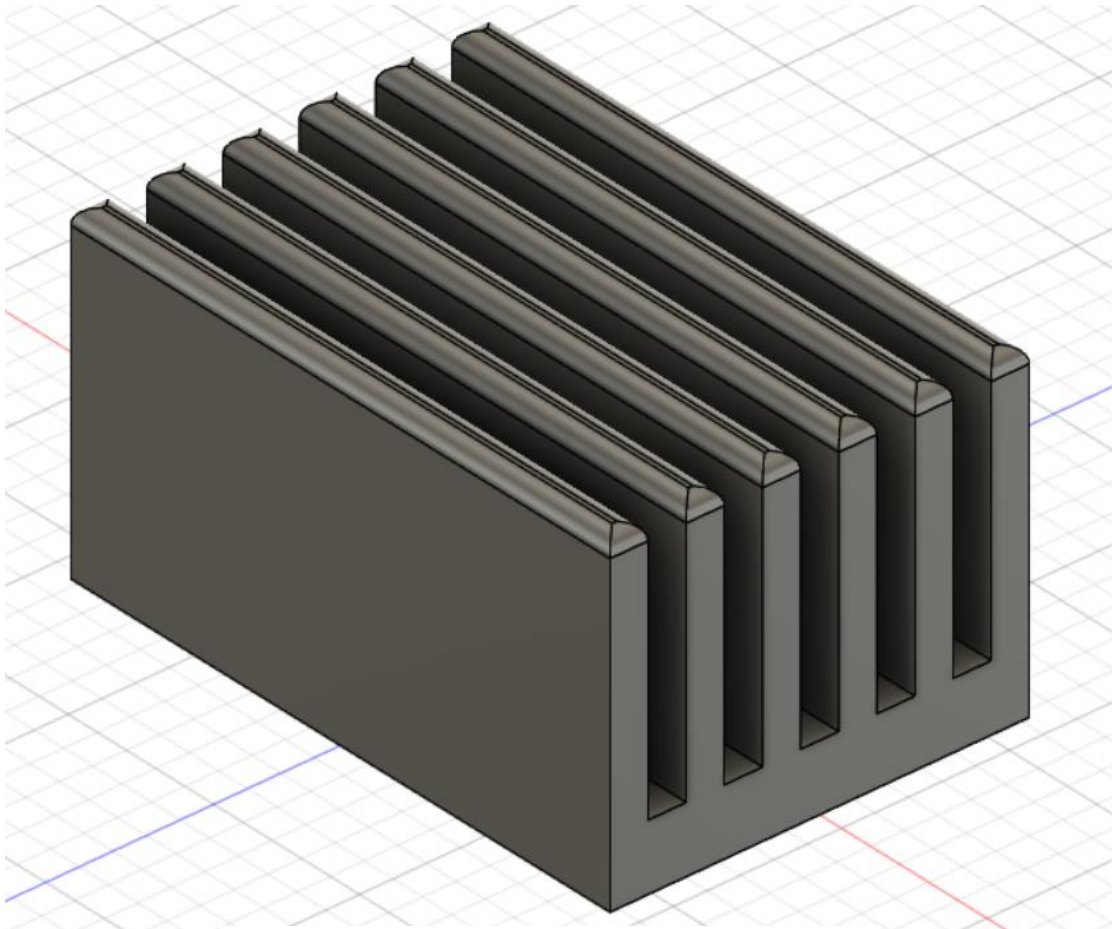


Σχήμα 14: 6^ο και 7^ο Βήμα Σχεδίασης

επιμέρους τμημάτων της ψύκτρας (όπως στο βήμα 6 1^{ης} σχεδίασης), προσδίδοντας της ιδιότητες συμπαγούς στερεού εξαρτήματος.

Ομοίως με την πρώτη σχεδίαση από το μενού επιλέγεται create → pattern → rectangular pattern που. Για επιλογή όλου του περυγίου ορίζεται type → bodies ενώ ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο z, η διάταξη των fins να γίνεται με βάση την μεταξύ τους απόσταση η οποία ισούται με 1.4mm (0.574 mm διάκενο + 0.572 από την αρχή του προηγούμενου fin) και ως αριθμός περυγίων 6 (σχήμα 14). Στο τέλος γίνεται η ενοποίηση των

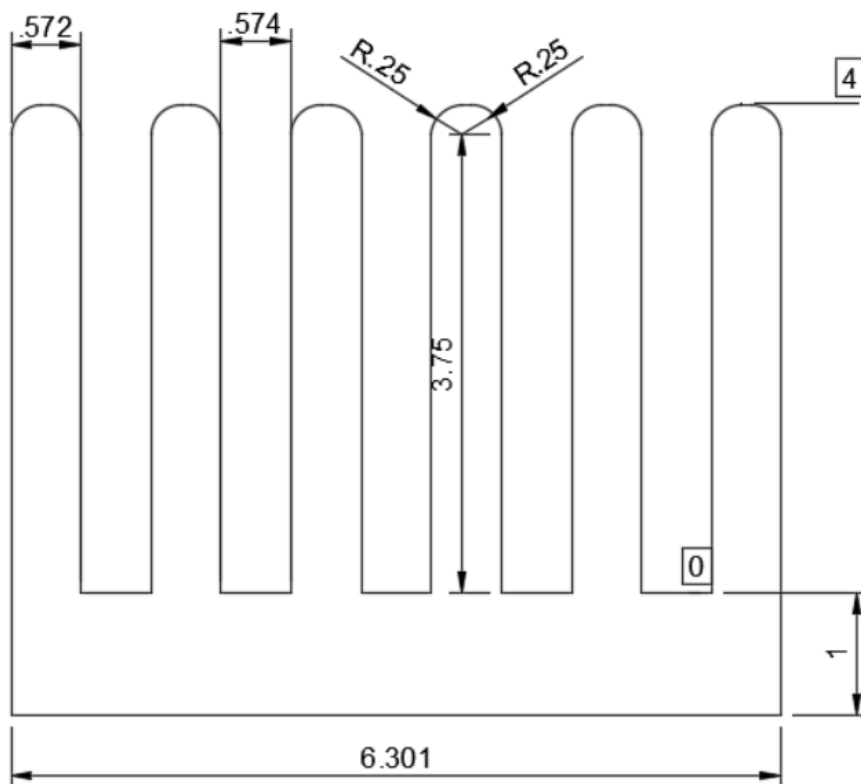
Ακολουθούν όψεις και τομές της 2^{ης} ψύκτρας που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 15: Τελικό αποτέλεσμα σχεδίασης 2ης ψύκτρας στο fusion 360



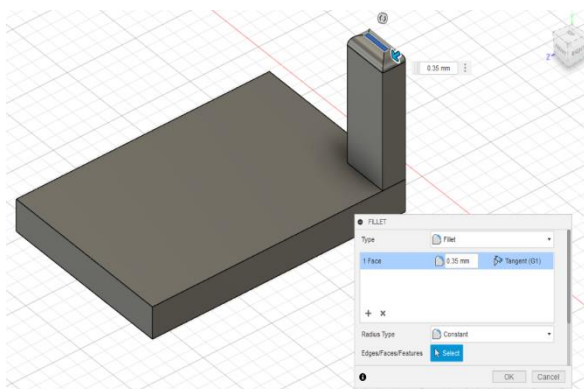
Σχήμα 16: Κάτοψη ψύκτρας



Σχήμα 17: Πρόσοψη ψύκτρας

3^η Σχεδίαση:

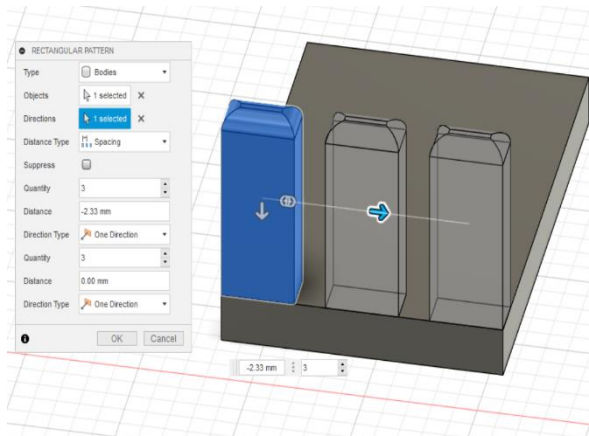
Στην τρίτη σχεδίαση, δημιουργείται ψύκτρα της οποίας τα περύγια δεν είναι ενιαία όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά κάθε γραμμή αποτελείται από 3 όμοια fins πλάτους 0.849 mm, μήκους 1.633 mm, μέγιστου ύψους 4 mm και μεταξύ τους απόσταση 0.697 mm. Το μοτίβο αυτό επαναλαμβάνεται κατά μήκος της ψύκτρας σε συνολικά 6 γραμμές των 3 περυγίων. Σκοπός είναι η αύξηση της ελεύθερης επιφάνειάς τους και η διευκόλυνση της ροής αέρα για αυξημένη απαγωγή θερμότητας.



Σχήμα 18: 5ο Βήμα Σχεδίασης

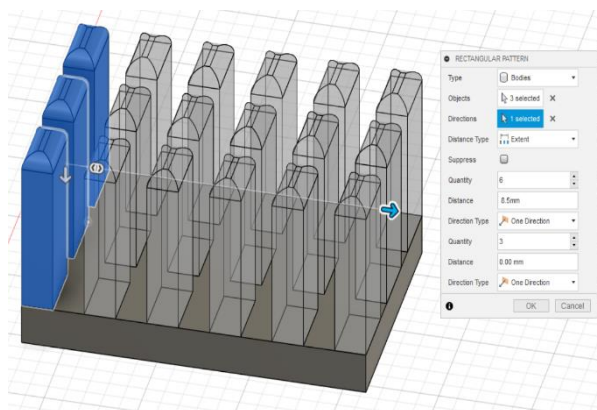
Έχοντας βάση πάχους 1mm

(βήματα 1,2) δημιουργούνται περύγια πλάτους 0.849 mm, μήκους 1.633 mm, και ύψους 4 mm (βήμα 4). Από το μενού επιλέγεται modify → fillet, διαλέγουμε την άνω επιφάνεια του περυγίου και ορίζεται εφαπτόμενη γραμμή μήκους 0.35 mm, βάση της οποίας γίνεται η κυκλική τομή (σχήμα 18).



Σχήμα 19: 6ο Βήμα Σχεδίασης

Για ταχύτερη δημιουργία των fins της 1^{ης} γραμμής, από το μενού επιλέγεται create → pattern → rectangular pattern. Για επιλογή όλου του περυγίου ορίζεται type → bodies ενώ ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο x, ως τρόπος διάταξης των fins η μεταξύ τους απόσταση η οποία ισούται με -2.33mm (0.633 διάκενο + 1.697 από την αρχή του προηγούμενου fin) και ως αριθμός περυγίων τίθεται 3 (σχήμα 19).

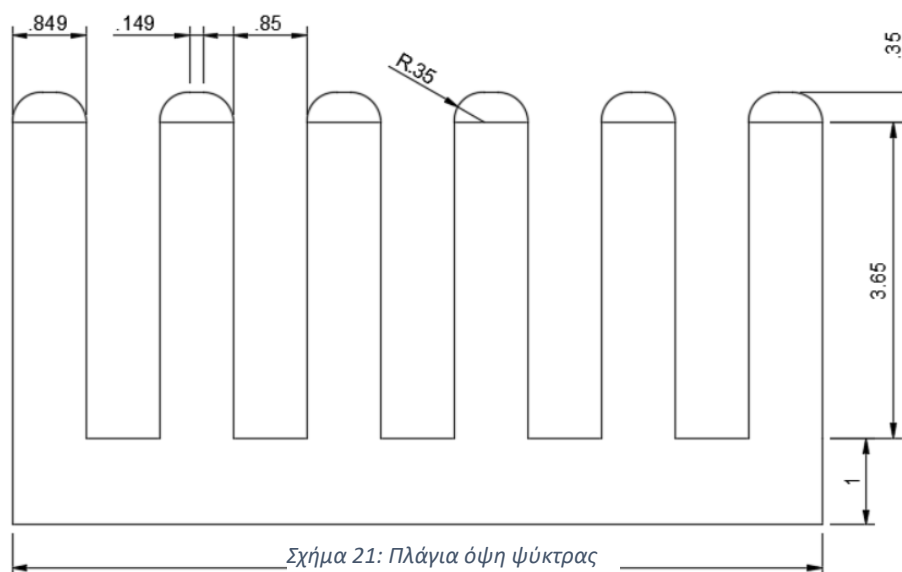


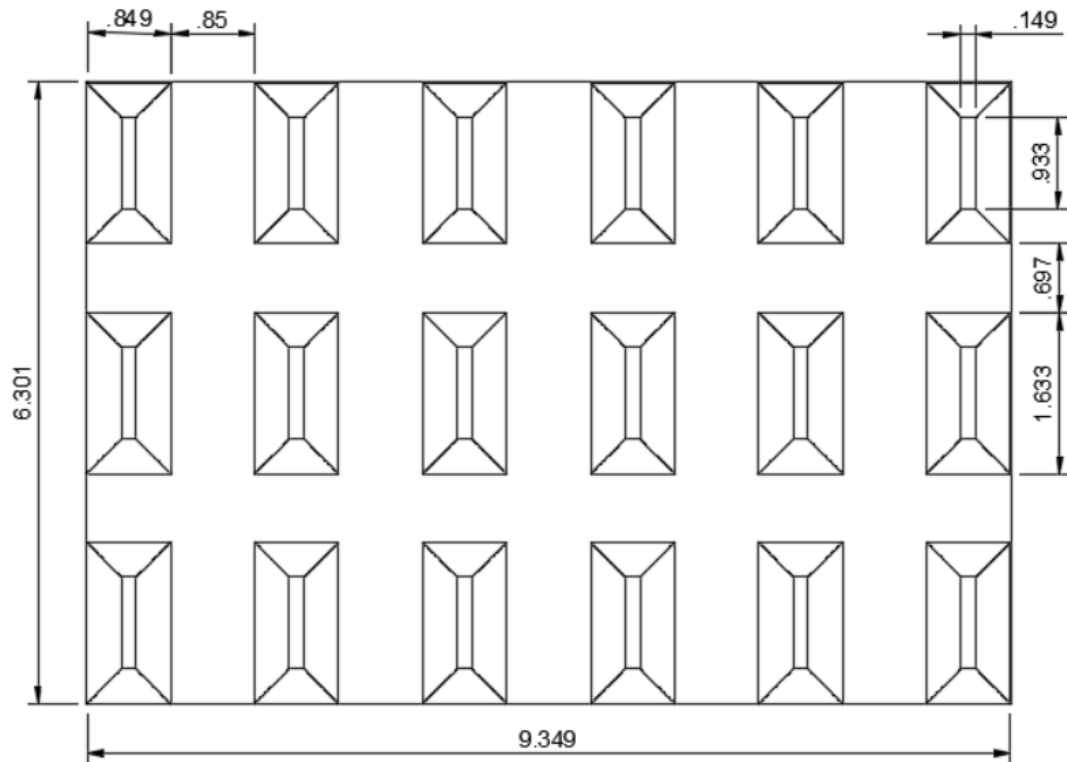
Σχήμα 20: 7ο Βήμα Σχεδίασης

Ομοίως για την δημιουργία των 6 σειρών κατά μήκος της ψύκτρας από το μενού επιλέγεται create → pattern → rectangular pattern. Επιλέγονται τα 3 fin της 1^{ης} γραμμής, ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο x, ως τρόπος διάταξης των fin το μήκος που θα εκτείνονται, το οποίο ισούται με 8.5mm (9.349 μήκος ψύκτρας - 0.849 από την αρχή του πρώτου περυγίου), και ως αριθμός επαναλήψεων τίθεται 6 (σχήμα 20). Στο τέλος γίνεται η ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων της

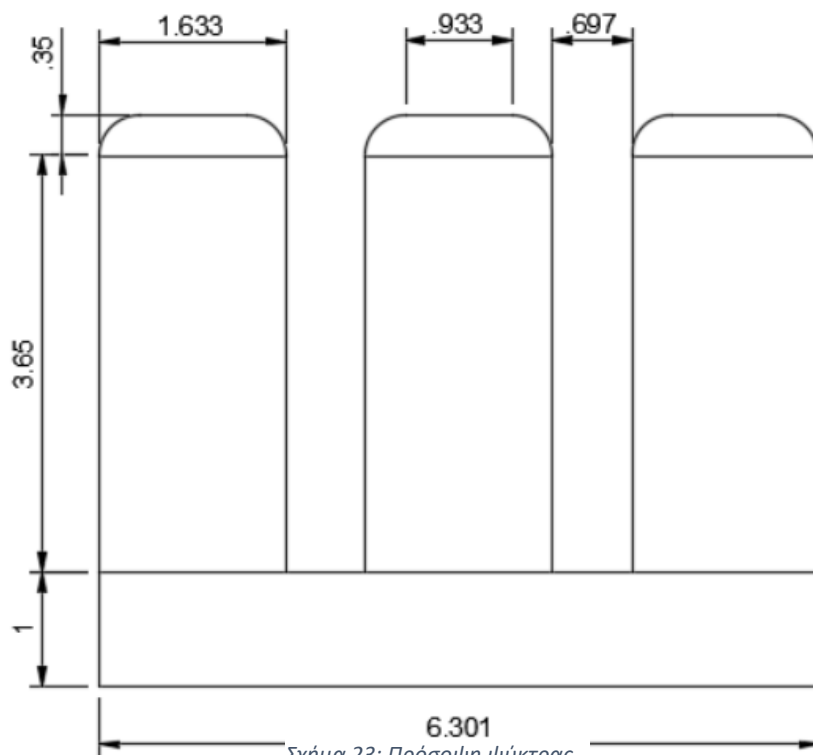
ψύκτρας (όπως στο βήμα 6 1^{ης} σχεδίασης), προσδίδοντάς της ιδιότητες συμπαγούς στερεού εξαρτήματος.

Ακολουθούν όψεις και τομές της 3^{ης} ψύκτρας που σχεδιάστηκε.

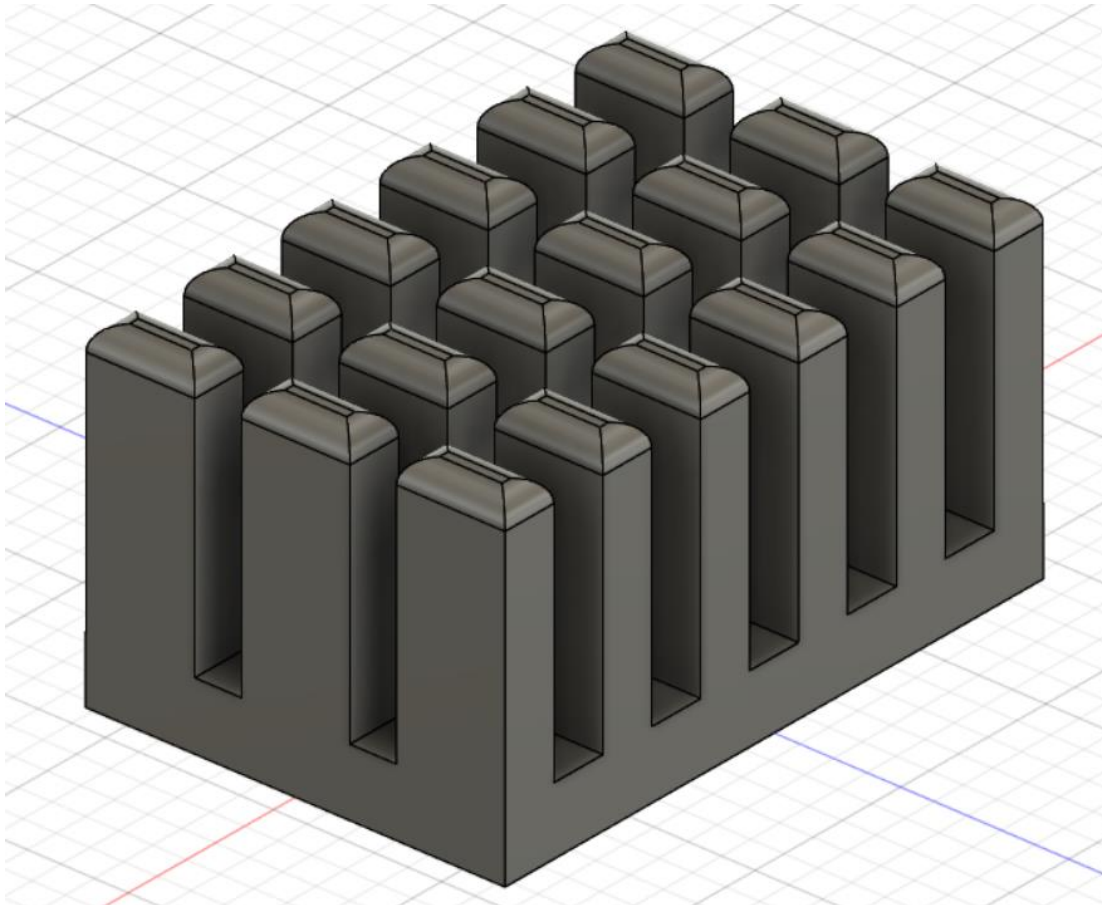




Σχήμα 22: Κάτοψη ψύκτρας



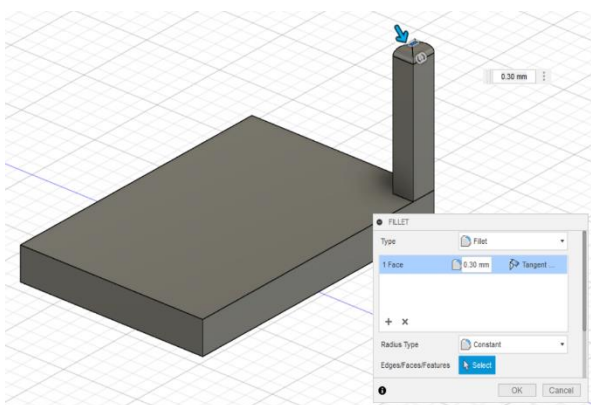
Σχήμα 23: Πρόσοψη ψύκτρας



Σχήμα 24: Τελικό αποτέλεσμα σχεδίασης 3ης ψύκτρας στο fusion 360

4^η Σχεδίαση:

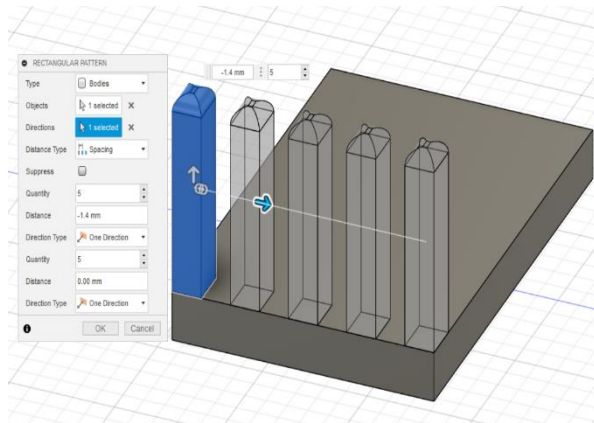
Στην τέταρτη σχεδίαση, δημιουργείται ψύκτρα όπως στην 3^η με την διαφορά ότι κάθε γραμμή αποτελείται από 5 όμοια fins πλάτους 0.849 mm, μήκους 0.7 mm, μέγιστου ύψους 4 mm και μεταξύ τους απόσταση 0.7 mm. Το μοτίβο αυτό επαναλαμβάνεται και πάλι κατά μήκος της ψύκτρας σε συνολικά 6 γραμμές των 5 πτερυγίων. Σκοπός είναι η περεταίρω αύξηση της ελεύθερης επιφάνειάς τους και η ακόμα μεγαλύτερη αύξηση απαγωγής θερμότητας.



Σχήμα 25: 5ο Βήμα Σχεδίασης

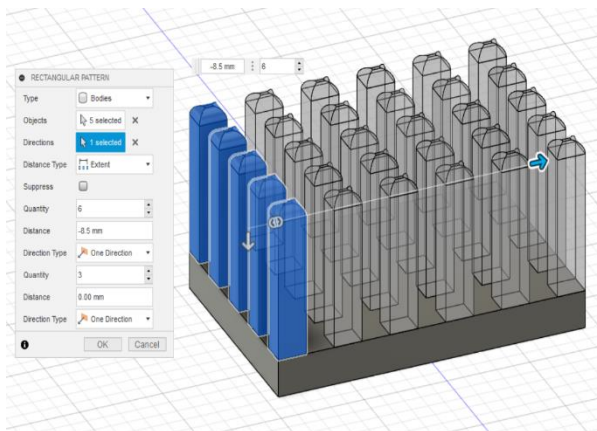
Έχοντας βάση πάχους 1mm

(βήματα 1,2) δημιουργούνται περύγια πλάτους 0.849 mm, μήκους 0.7 mm, και ύψους 4 mm (βήμα 4). Από το μενού επιλέγεται modify → fillet, διαλέγουμε την άνω επιφάνεια του πτερυγίου και ορίζεται εφαπτόμενη γραμμή μήκους 0.3 mm, βάση της οποίας γίνεται η κυκλική τομή (σχήμα 25).



Σχήμα 26: 6ο Βήμα Σχεδίασης

Για ταχύτερη δημιουργία των fins της 1^{ης} γραμμής, από το μενού επιλέγεται create → pattern → rectangular pattern. Για επιλογή όλου του περυγίου ορίζεται type → bodies ενώ ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο x, ως τρόπος διάταξης των fins η μεταξύ τους απόσταση η οποία ισούται με -1.4mm (0.7 διάκενο + 0.7 από την αρχή του προηγούμενου fin) και ως αριθμός περυγίων τίθεται 5 (σχήμα 26).

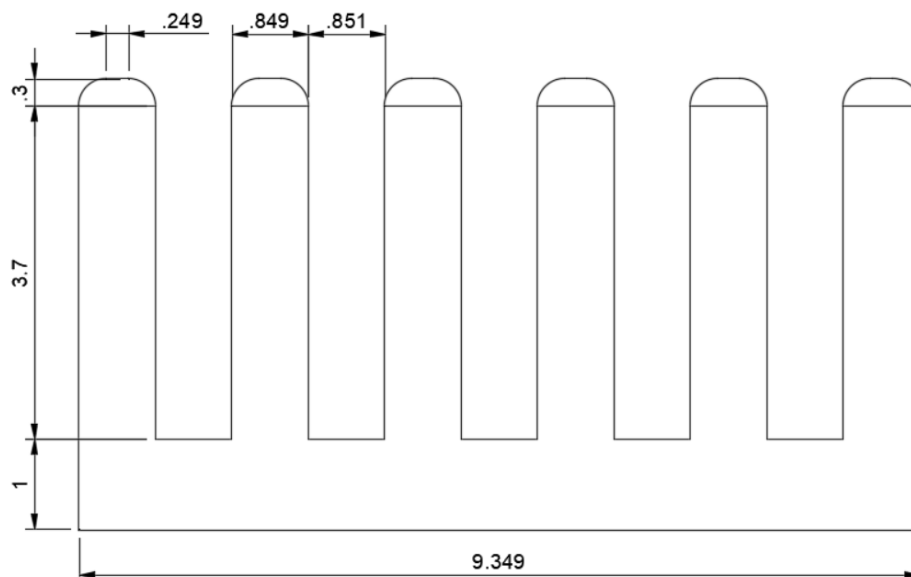


Σχήμα 27: 7ο Βήμα Σχεδίασης

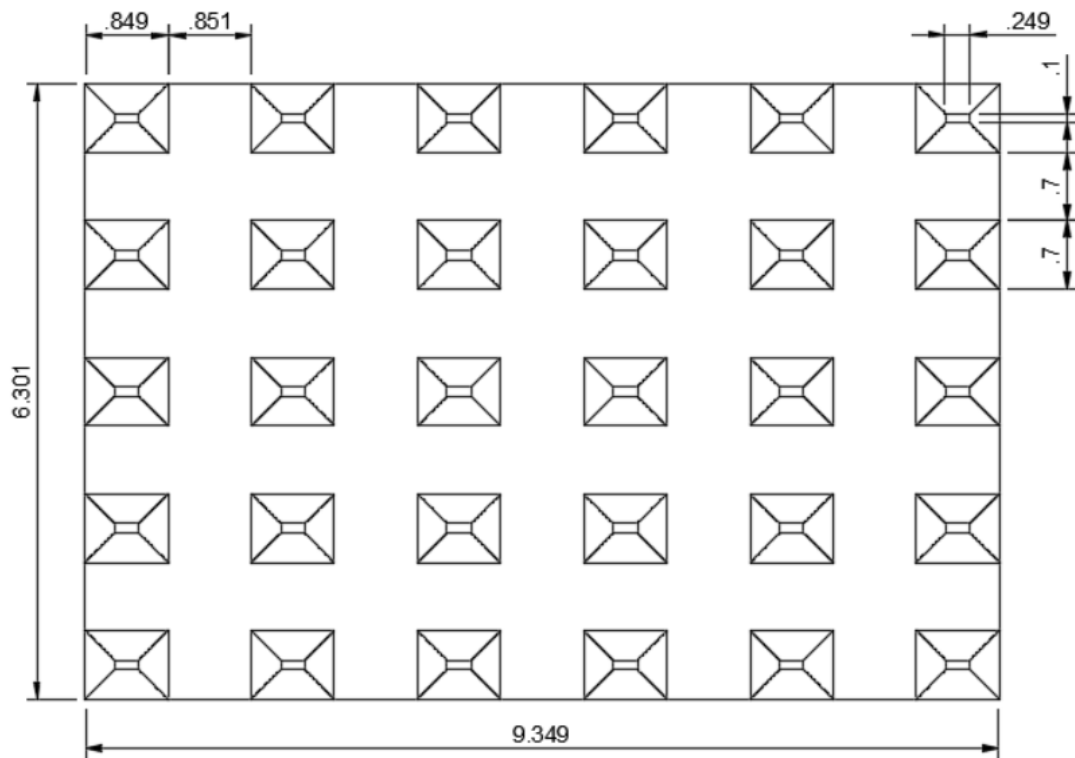
Ομοίως για την δημιουργία των 6 σειρών κατά μήκος της ψύκτρας από το μενού επιλέγεται create → pattern → rectangular pattern. Επιλέγονται τα 5 fin της 1^{ης} γραμμής, ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο x, ως τρόπος διάταξης των fin το μήκος που θα εκτίνονται, το οποίο ισούται με 8.5mm (9.349 μήκος ψύκτρας - 0.849 από την αρχή του πρώτου περυγίου), και ως αριθμός επαναλήψεων τίθεται 6 (σχήμα 27). Στο τέλος γίνεται η ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων της

ψύκτρας (όπως στο βήμα 6 1^{ης} σχεδίασης), προσδίδοντάς της ιδιότητες συμπαγούς στερεού εξαρτήματος.

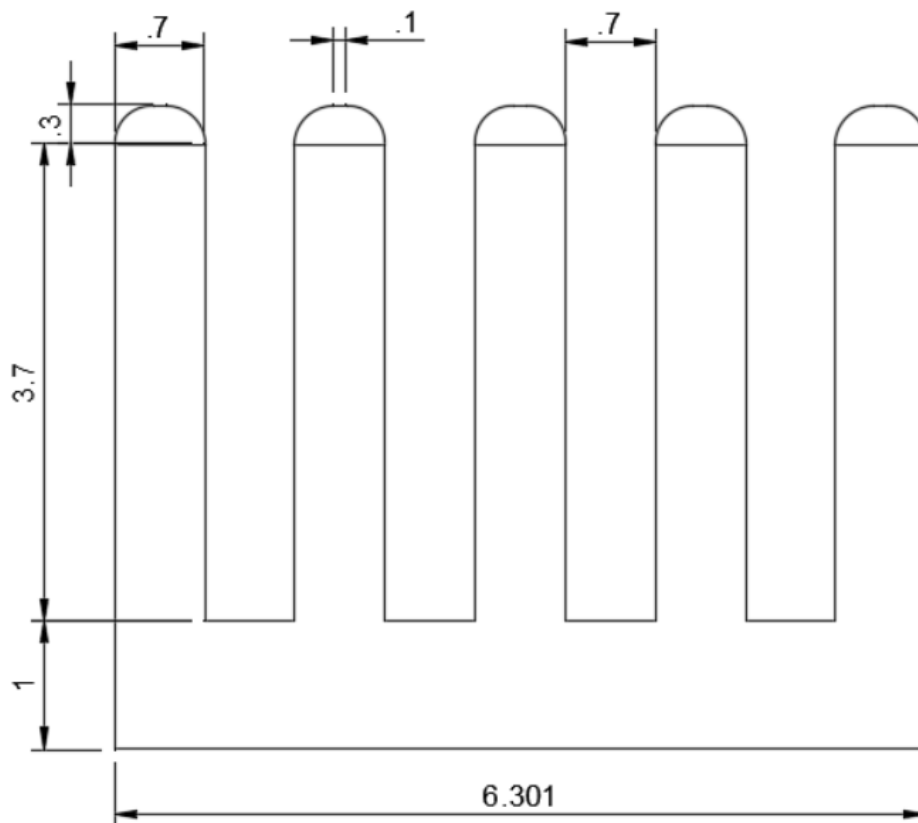
Ακολουθούν όψεις και τομές της 4^{ης} ψύκτρας που σχεδιάστηκε.



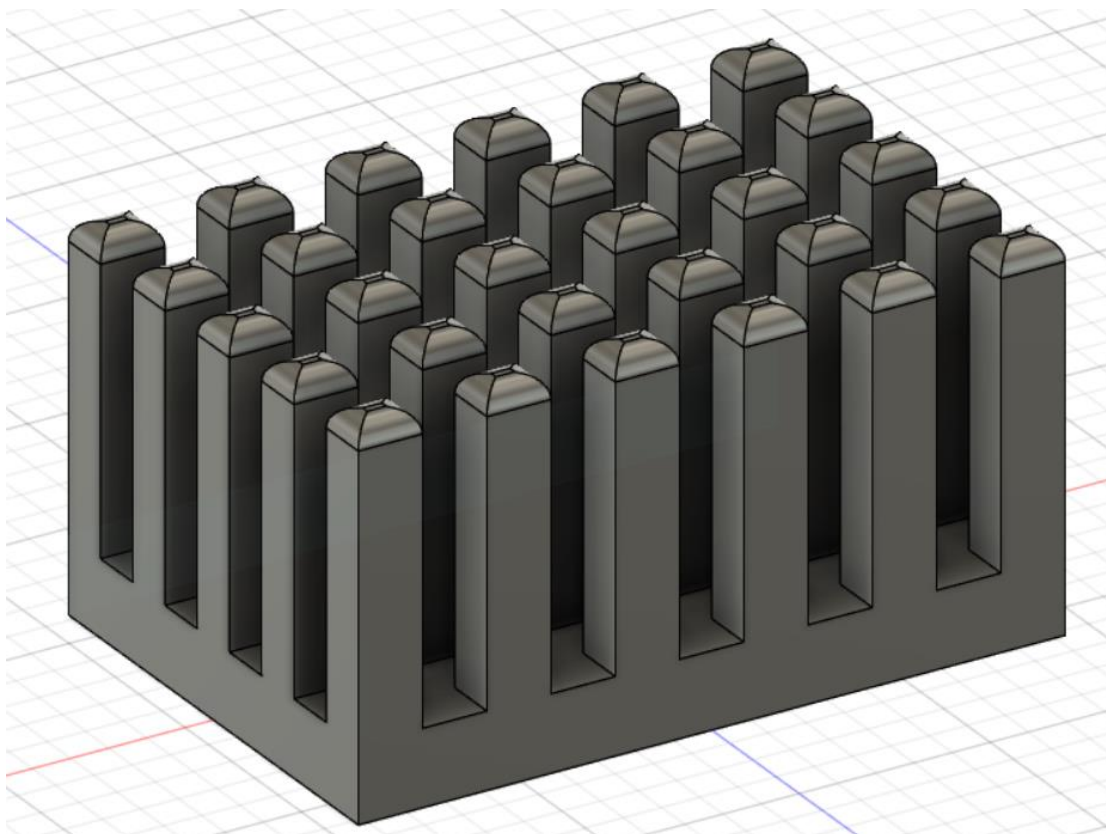
Σχήμα 28: Πλάγια όψη ψύκτρας



Σχήμα 29: Κάτοψη ψύκτρας



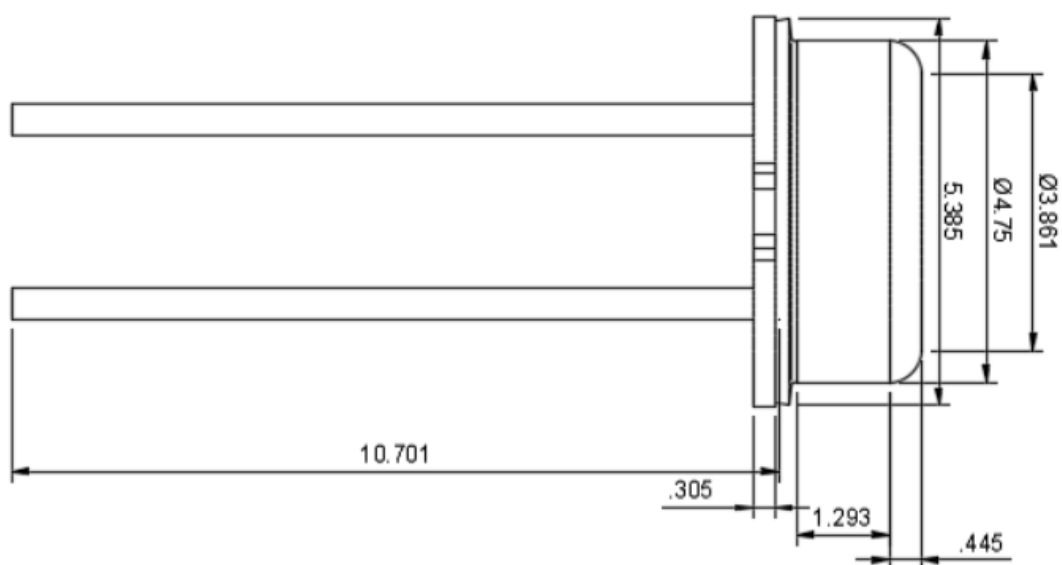
Σχήμα 30: Πρόσοψη ψύκτρας



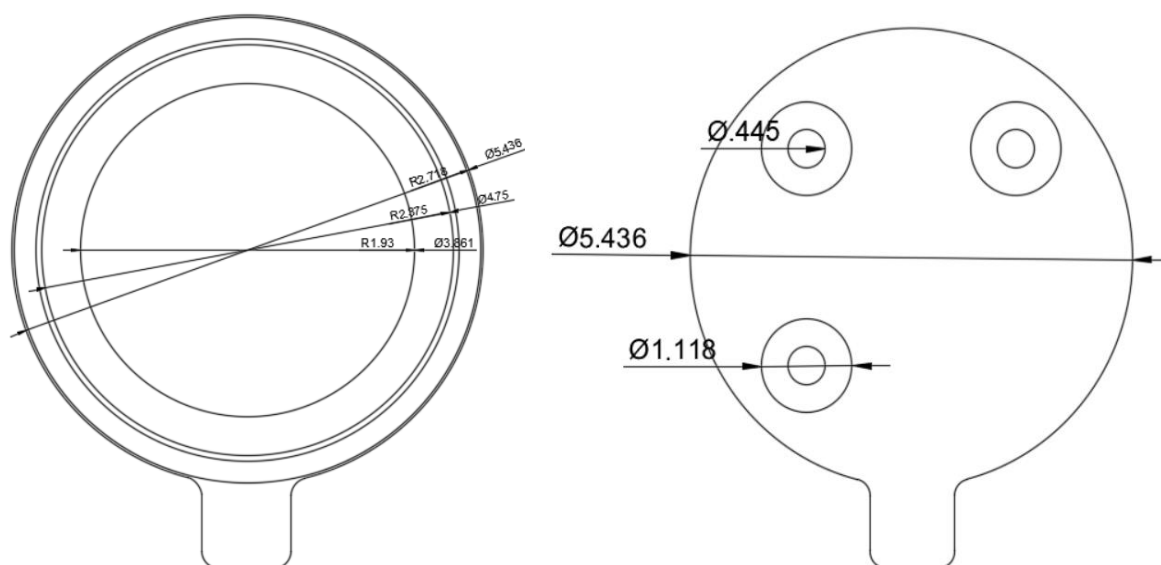
Σχήμα 31: Τελικό αποτέλεσμα σχεδίασης 4ης ψύκτρας στο fusion 360

- BJT 2N2222

Από την τρισδιάστατη απεικόνιση του PCB απομονώνεται το διπολικό τρανζίστορ και με το εργαλείο inspect μετρώνται οι βασικές διαστάσεις του 2N2222P, οι οποίες

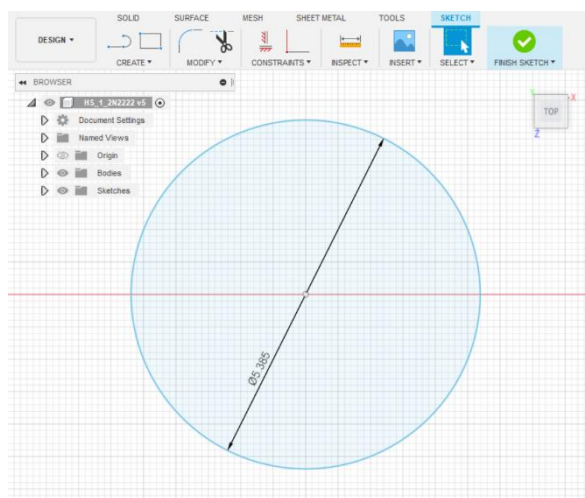


παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



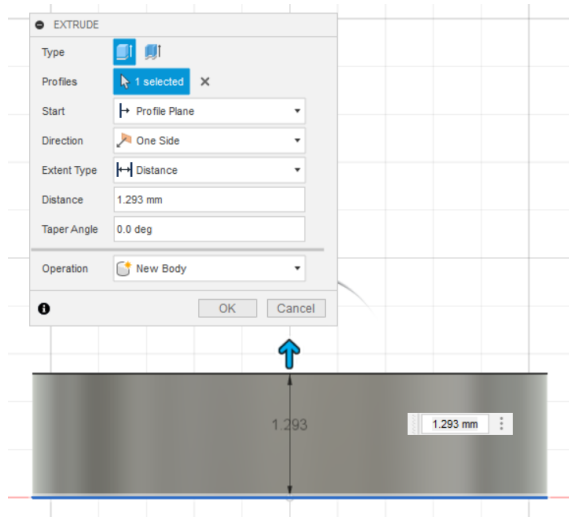
Σχήμα 32: Διαστασιολόγηση BJT 2N2222

1^η Σχεδίαση:



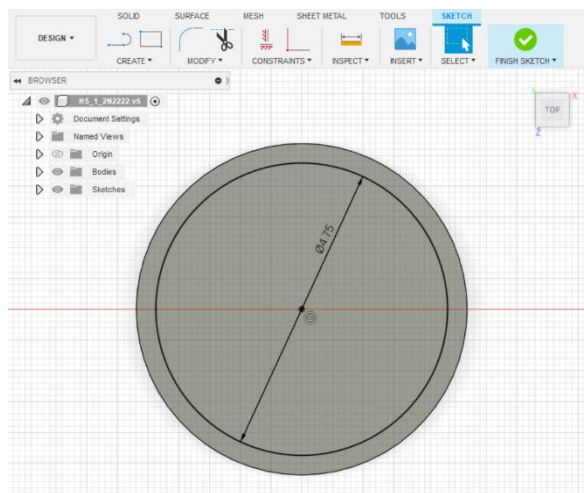
Σχήμα 33: 1ο Βήμα Σχεδίασης

Σε νέο project δημιουργείται sketch → κυκλικός δίσκος. Επειδή η ψύκτρα bjt θα προσαρτηθεί περιμετρικά στην παράπλευρη επιφάνεια διαμέτρου 4.75 mm (μεγάλη επιφάνεια επαφής με το στοιχείο) επιλέγεται διάμετρος 5.385mm (πάχος ψύκτρας= 5.385 – 4.75 διάμετρος διπολικού= 0,635mm / ικανοποιητική επιλογή δεδομένου ότι η ψύκτρα πρέπει να διαθέτει μικρό πάχος στην επιφάνεια επαφής του στοιχείου) και οριστικοποιείται η σχεδίαση (σχήμα 33).



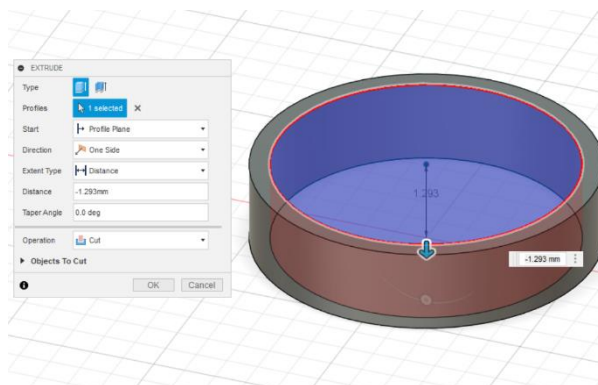
Σχήμα 35: 3^ο Βήμα Σχεδίασης

Για την απόκτηση τρισδιάστατης υπόστασης, με δεξί κλικ πάνω στο sketch επιλέγεται το εργαλείο press pull. Ορίζεται ως πάχος 1.293 mm (όσο και το ύψος της παράπλευρης επιφάνειας που θα προσαρτηθεί) στην θετική φορά του κάθετου στο επίπεδο άξονα και δημιουργείται νέο στερεό σώμα (σχήμα 34).



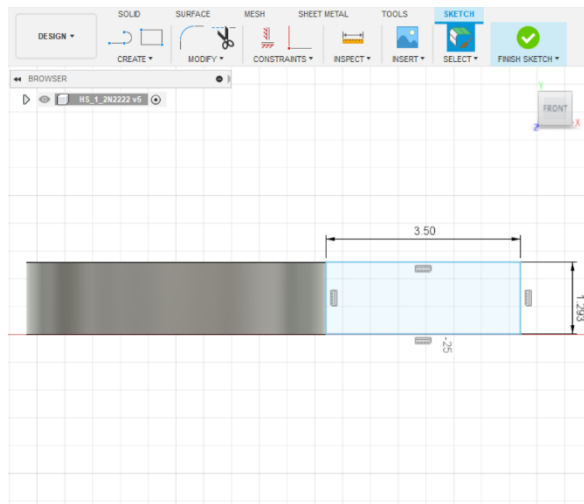
Σχήμα 34: 2^ο Βήμα Σχεδίασης

Η ολοκλήρωση της βάσης της ψύκτρας απαιτεί την δημιουργία οπής στο συμπαγές στερεό σώμα που έχει σχεδιαστεί. Για τον σκοπό αυτό, σε πρώτο στάδιο, δημιουργείται sketch → κυκλικός δίσκος, ομόκεντρος με την κυκλική βάση και πάνω στο επίπεδό της με διάμετρο 4.75 mm, όση και η διάμετρος του διπολικού τρανζίστορ και οριστικοποιείται η σχεδίαση (σχήμα 35).



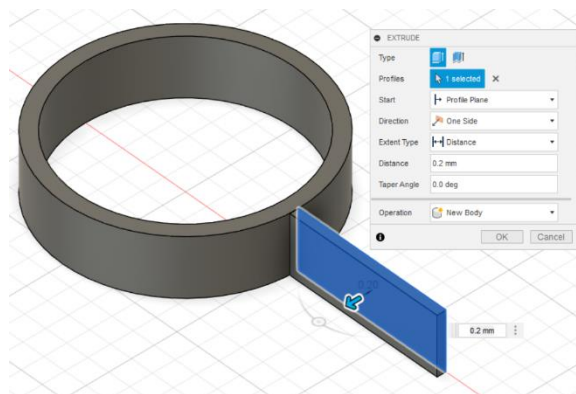
Σχήμα 36: 4^ο Βήμα Σχεδίασης

Σε δεύτερο στάδιο, για την δημιουργία οπής στο στερεό, με δεξί κλικ πάνω στο sketch επιλέγεται το εργαλείο press pull. Ορίζεται ως πάχος 1.293 mm (ώστε να διαπεράσει το στερεό) στην αρνητική φορά του κάθετου στο επίπεδο άξονα και επιλέγεται ως διεργασία που θα πραγματοποιηθεί “cut” που θα αφαιρέσει το επιθυμητό τμήμα (σχήμα 36).



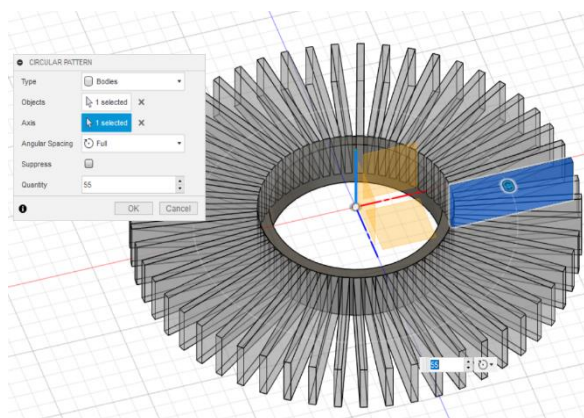
Σχήμα 37: 5^ο Βήμα Σχεδίασης

Δεδομένης της ανάλυσης των παραμέτρων σχεδίασης ψύκτρας που προηγήθηκε (πτερύγια κάθετα στην βάση - μεγάλη ελεύθερη επιφάνεια) δημιουργείται ορθογώνιο sketch στο πλάγιο επίπεδο της βάσης με μήκος 3.5mm (επιλέχθηκε ώστε σε άθροισμα με το πάχος της βάσης να μην ξεπερνά την διάμετρο του διπολικού τρανζίστορ) και πλάτος 1.293 mm, όσο και το ύψος της βάσης, και οριστικοποιείται η σχεδίαση (σχήμα 37).



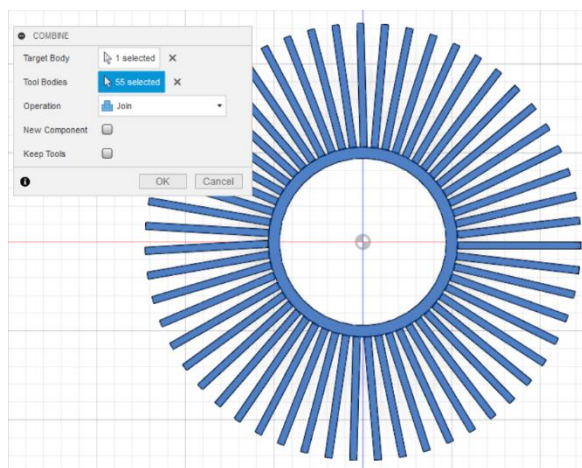
Σχήμα 38: 6^ο Βήμα Σχεδίασης

Για δημιουργία τρισδιάστατου fin, με δεξί κλικ πάνω στο sketch επιλέγεται το εργαλείο press pull. Ορίζεται ως πάχος 0.2mm στην θετική φορά του κάθετου στην βάση άξονα και δημιουργείται νέο στερεό σώμα (όχι joint ώστε να είναι δυνατή η επιλογή του ως ξεχωριστό σώμα- χρήσιμο στο επόμενο βήμα για προσθήκη των υπόλοιπων fins) (σχήμα 38).



Σχήμα 39: 7^ο Βήμα Σχεδίασης

Για ταχύτερη δημιουργία των fins, από το μενού επιλέγεται create → pattern → circular pattern. Για επιλογή όλου του πτερυγίου ορίζεται type → bodies ενώ ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο z και ως αριθμός πτερυγίων 55 (ο αριθμός πτερυγίων επιλέχθηκε έτσι ώστε οι μεταξύ τους αποστάσεις να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μην επηρεάζονται από μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας) (σχήμα 39).

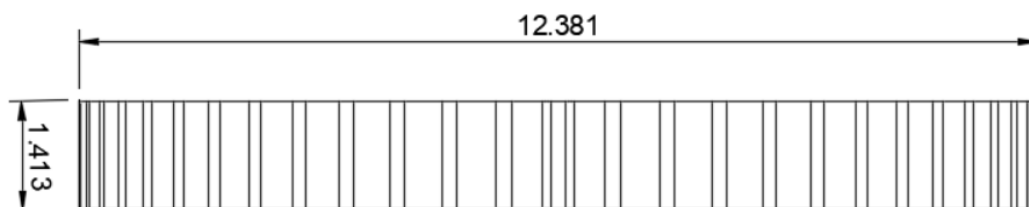


Το τελικό βήμα είναι η ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων (fins, base της ψύκτρας). Από από το μενού επιλέγεται modify → combine, ορίζεται operation→ join και διαλέγονται τα στοιχεία που θα ενοποιηθούν. Με αυτό τον τρόπο η ψύκτρα ορίζεται ως ενιαίο στερεό

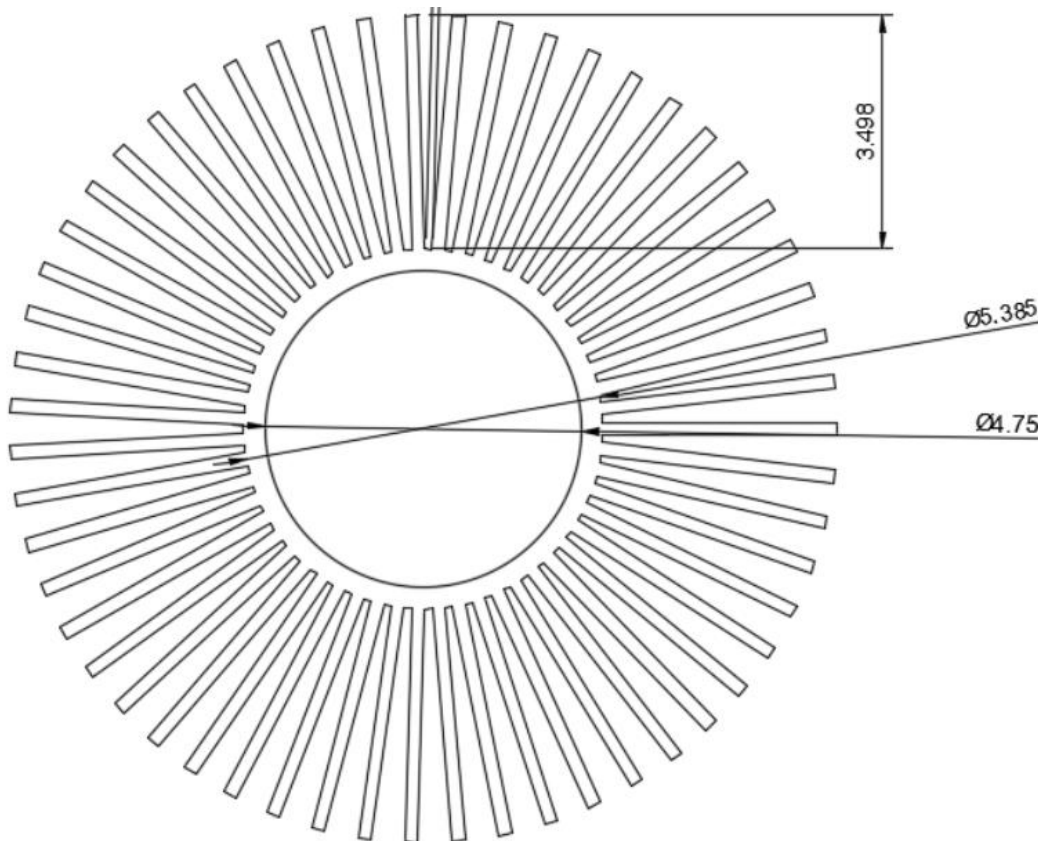
(σχήμα 40).

Σχήμα 40: 8^ο Βήμα Σχεδίασης

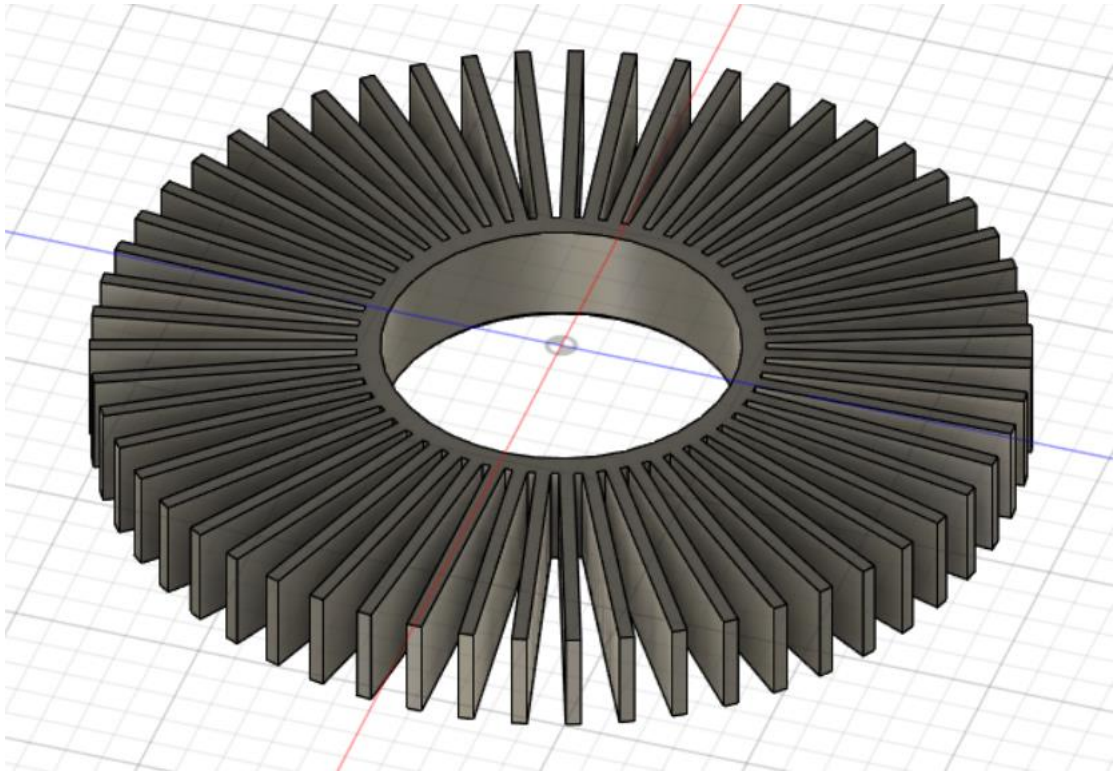
Ακολουθούν όψεις και τομές της 1^{ης} ψύκτρας που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 41: Πρόσοψη ψύκτρας



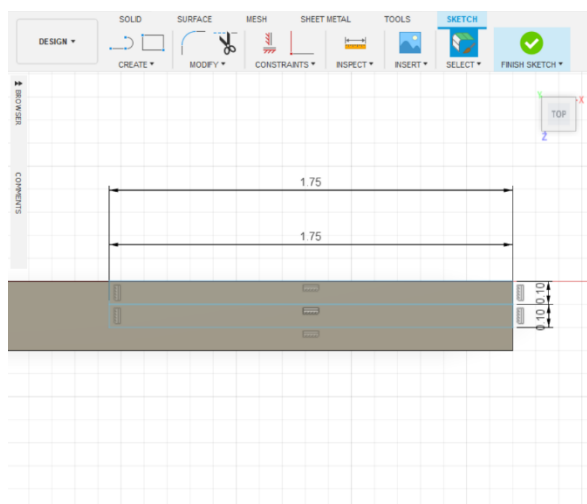
Σχήμα 42: Κάτοψη ψύκτρας



Σχήμα 43: Τελικό αποτέλεσμα σχεδίασης 1ης ψύκτρας στο fusion 360

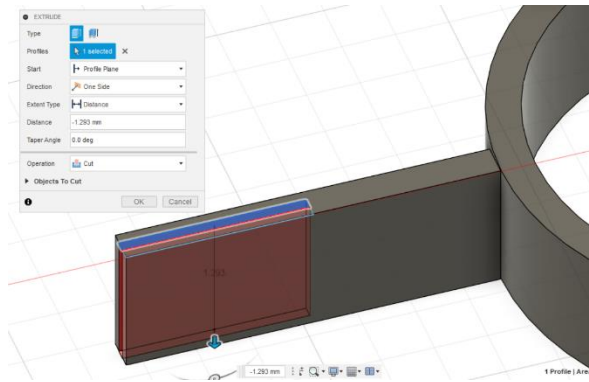
2^η Σχεδίαση:

Τα βήματα που περιεγράφηκαν παραπάνω είναι κοινά και για τις 2 σχεδιάσεις, με μικρές διαφοροποιήσεις. Οπότε για λόγους συντομίας θα παρουσιαστούν μόνο οι διαφορές τους.



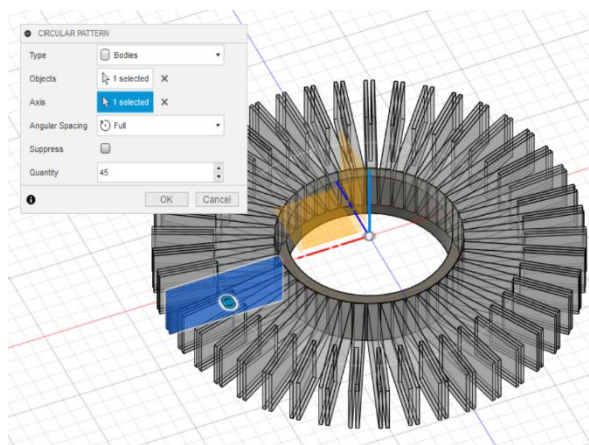
Σχήμα 44: 7^ο Βήμα Σχεδίασης

Έχοντας δημιουργήσει τον δακτύλιο που αποτελεί την βάση της ψύκτρας (βήματα 1-4) και περύγιο μήκους 2.995mm, πλάτους 0.3mm και ύψους 1.293mm (βήματα 5,6) σχηματίζονται ορθογώνια sketch στο άνω επίπεδο του περυγίου με μήκος 1.75mm και πλάτος 0.1mm (το πρώτο ακραίο ορθογώνιο δημιουργείται ώστε το δεύτερο να ευθυγραμμιστεί ακριβώς στο μέσο του fin) και οριστικοποιείται η σχεδίαση (σχήμα 44).



Σχήμα 45: 8^ο Βήμα Σχεδίασης

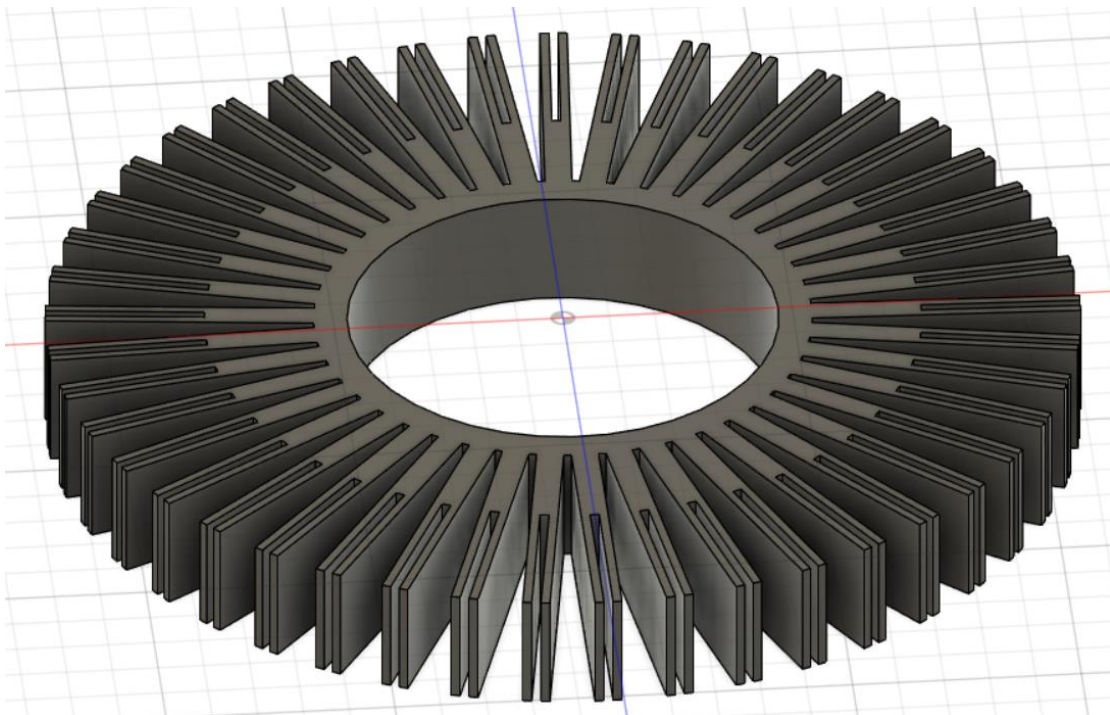
Με δεξί κλικ πάνω στο 2^ο sketch επιλέγεται το εργαλείο press pull. Ορίζεται ως πάχος 1.293 mm (ώστε να διαπεράσει το στερεό) στην αρνητική φορά του κάθετου στο επίπεδο άξονα και επιλέγεται ως διεργασία που θα πραγματοποιηθεί “cut” που θα αφαιρέσει το επιθυμητό τμήμα (σχήμα 36). Έτσι η άκρη του fin διαχωρίζεται σε 2 ελάσματα πάχους 0.1mm έκαστο.



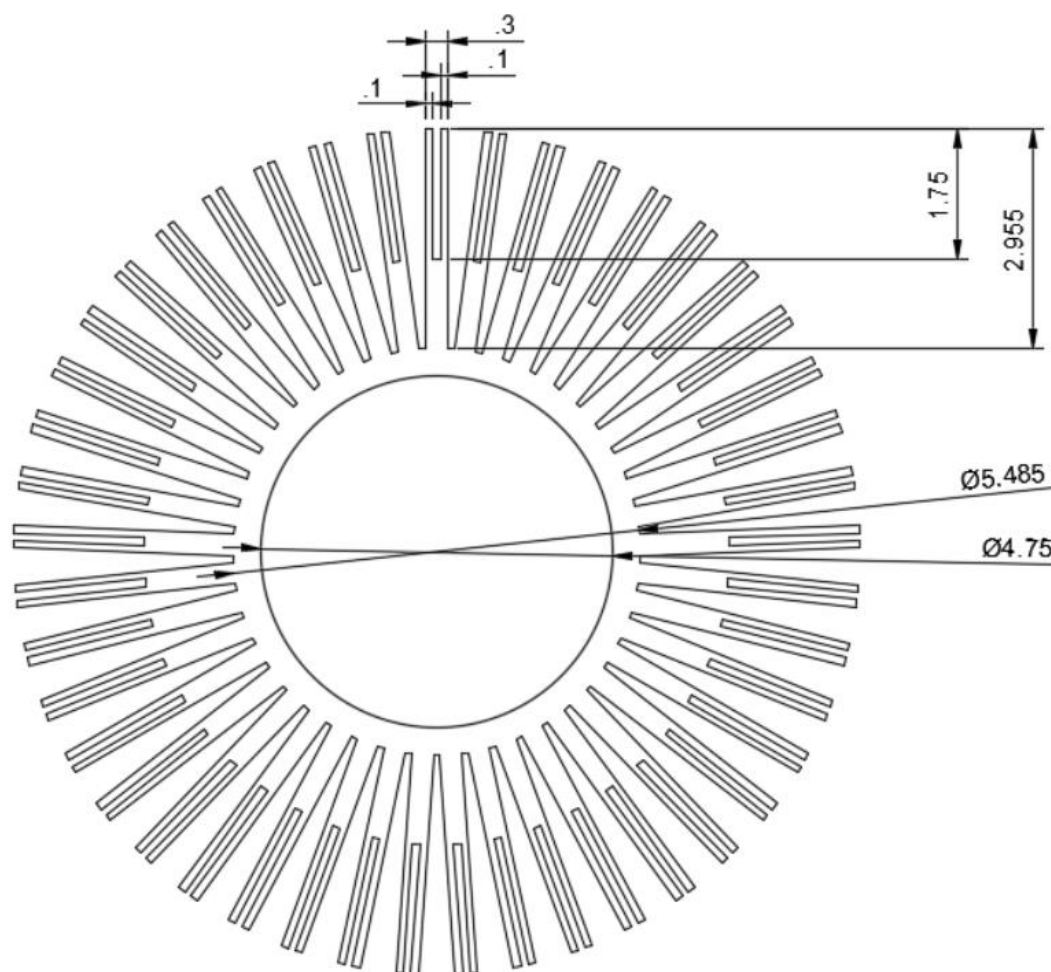
Σχήμα 46: 9^ο Βήμα Σχεδίασης

Για ταχύτερη δημιουργία των fins, από το μενού επιλέγεται create → pattern → circular pattern. Για επιλογή όλου του περυνγίου ορίζεται type → bodies ενώ ορίζονται ως άξονας επανάληψης ο z και ως αριθμός περυνγίων 45. Στο τέλος γίνεται η ενοποίηση των επιμέρους τμημάτων της ψύκτρας (όπως στο βήμα 8 1^{ης} σχεδίασης για το 2N2222), προσδίδοντάς της ιδιότητες συμπαγούς στερεού εξαρτήματος. (σχήμα 46).

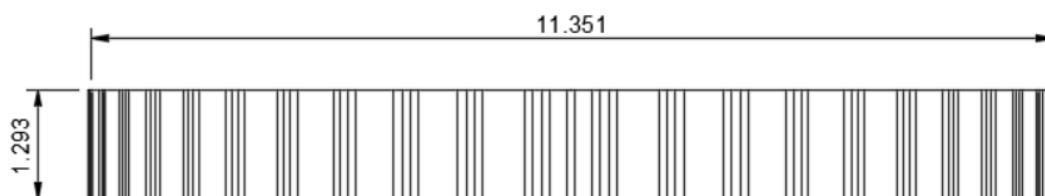
Ακολουθούν όψεις και τομές της 2^{ης} ψύκτρας που σχεδιάστηκε.



Σχήμα 47: Τελικό αποτέλεσμα σχεδίασης 2ης ψύκτρας στο fusion 360



Σχήμα 48: Κάτοψη ψύκτρας



Σχήμα 49: Πρόσοψη ψύκτρας

Παρατηρήσεις

1. Για τις ψύκτρες του τελεστικού ενισχυτή LM741P:
 - Αναμένουμε ότι όσο αυξάνεται η ελεύθερη επιφάνεια των πτερυγίων η αποτελεσματικότητα της ψύκτρας θα αυξάνεται. Επομένως στην θερμική ανάλυση στο simscale, που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα, αναμένουμε να δούμε την θερμοκρασία του σώματος του τελεστικού ενισχυτή να μειώνεται

καθώς δοκιμάζουμε τις ψύκτρες με την εξής σειρά: ψύκτρα 1^η → ψύκτρα 2^η → ψύκτρα 3^η → ψύκτρα 4^η.

- Η επιφάνεια επαφής των ψυκτρών με τον τελεστικό ενισχυτή είναι ίδια για όλες τις σχεδιάσεις. Ωστόσο μεταβάλλεται το πάχος της βάσης της ψύκτρας, καθώς στην 1^η σχεδίαση είναι μεγαλύτερο από τις υπόλοιπες, οπότε αναμένεται και μείωση της αποτελεσματικότητας της έναντι των άλλων.
- Στις σχεδιάσεις 3,4 όπου τα πτερύγια είναι διαχωρισμένα τόσο κατά πλάτος όσο και κατά μήκος της βάσης της ψύκτρας διευκολύνεται η ελεύθερη ροή αέρα άρα απάγουν μεγαλύτερα ποσά θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με τις σχεδιάσεις 1,2.

2. Για τις ψύκτρες του διπολικού τρανζίστορ 2N2222P:

- Ομοίως με την περίπτωση του τελεστικού ενισχυτή, η αύξηση της ελεύθερης επιφάνειας των πτερυγίων προκαλεί αύξηση της αποτελεσματικότητας της ψύκτρας. Επομένως αναμένουμε η 1^η ψύκτρα να είναι αποτελεσματικότερη από την 2^η.
- Στην σχεδίαση 2, το διάκενο ανάμεσα στα ελάσματα είναι πολύ μικρό (0.1mm) με αποτέλεσμα να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους θερμικά (μεταφορά θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ τους). Οπότε μειώνεται η αποδοτικότητά της.

3. Όπως περιεγράφηκε προηγουμένως για τις παραμέτρους σχεδίασης ψύκτρας, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη πρέπει να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και υψηλό emissivity. Από τον πίνακα που ακολουθεί συμπεραίνουμε ότι το πιο ικανοποιητικό υλικό είναι το αλουμίνιο τόσο γιατί ικανοποιεί και τις δύο παραπάνω προδιαγραφές, όσο και των υπόλοιπων μηχανικών ιδιοτήτων του (χαμηλό βάρος, εξαιρετική αντοχή, υψηλό σημείο τήξης).

Material	Thermal Conductivity (W/(mK))	Emissivity
Silica Glass	1.38	0.92
Aluminium, anodized	164 - 240	0.9
Aluminium, polished		0.04
Aluminium, extruded		0.06
Copper, oxidized	69 - 76	0.78
Copper, polished		0.03
Copper, machined		0.07
Transition metal Disilicides	186 - 550	0.86 - 0.93
Silver, oxidized	429	0.04
Silver, polished		0.02
Steel, oxidised	~ 45	0.78
Steel, polished		0.07
Stainless Steel, weathered		0.85
Tin	62.1	0.04

Πίνακας 1: Πίνακας θερμικής αγωγιμότητας-emissivity ενδεικτικών υλικών

Θερμική Ανάλυση (SimScale)

Στο τελευταίο μέρος της αναφοράς θα διεξαχθεί η θερμική ανάλυση της πλακέτας (στη μόνιμη κατάσταση) ώστε να παρατηρηθεί η ικανότητα των ψυκτρών να βγάλουν εις πέρας το ρόλο τους, αλλά και να γίνει μια μεταξύ τους σύγκριση ως προς την ικανότητα ψύξης της κάθε μίας.

Για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε την ανάλυση θα χρησιμοποιήσουμε το online πρόγραμμα SimScale.

Πριν προβούμε στις προσομοιώσεις απαιτείται να συμπληρωθούν τα παρακάτω πεδία στο SimScale.

Πιο συγκεκριμένα, ότι χρειάστηκε να συμπληρωθεί ή να αλλάχθει στο περιβάλλον της προσομοίωσης έχει συμπεριληφθεί στην παρακάτω λίστα.

- **Υλικά Στοιχείων:**

- ❖ LM741 (OPAMP): Το σώμα του OPAMP (το πολυμερές) είναι από Epoxy. Τα pin του είναι από μόλυβδο (Lead).

- ❖ 2N2222 (NPN): Το σώμα του διπολικού είναι από κασσίτερο (Tin) . Τα pin του είναι από μόλυβδο (Lead).

- ❖ Ψύκτρες: Όλες οι ψύκτρες είναι από αλουμίνιο (Aluminium).

- **Συνοριακές Συνθήκες**: Για να λυθεί η διαφορική εξίσωση πρέπει το πρόβλημα να είναι καλώς ορισμένο οπότε και οι τιμές της ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας που εμφανίζεται στα pads των 2 ενεργών στοιχείων (συνοριακές επιφάνειες).

- ❖ LM741 (OPAMP): Από το φύλλο δεδομένων ξέρουμε ότι η μέγιστη κατανάλωση ισχύς που λαμβάνει χώρα είναι 85 mW , ενώ από το Fusion μετρήσαμε για τα 8 pads ότι το εμβαδόν τους είναι ίσο με

$$Area = (2 * 0.145 + 1 * 0.054) = 0.344 \frac{mm^2}{pad}$$

Επομένως,

$$\frac{Power}{Area} = \frac{85 \text{ mW}}{8 \text{ pad} * \frac{0.344 \text{ mm}^2}{\text{pad}}} = 30,886 \frac{W}{m^2}$$

- ❖ 2N2222 (NPN): Από το φύλλο δεδομένων ξέρουμε ότι η μέγιστη κατανάλωση ισχύς που λαμβάνει χώρα ισούται με 500 mW , ενώ από το Fusion μετρήσαμε για τα 3 pads ότι το εμβαδόν τους είναι ίσο με

$$Area = 0.155 \text{ mm}^2/\text{pad}$$

Επομένως,

$$\frac{Power}{Area} = \frac{500 \text{ mW}}{3 \text{ pad} * \frac{0.155 \text{ mm}^2}{\text{pad}}} = 1,075,268 \frac{W}{m^2}$$

Οι παραπάνω τιμές εισχωρούν στις συνοριακές συνθήκες μόνο στα pads.

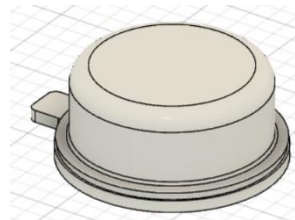
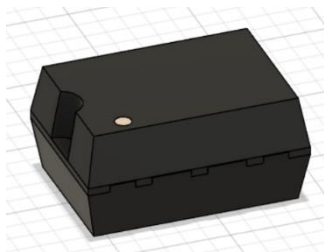
- **Θερμοκρασία Περιβάλλοντος & Heat Transfer Coefficient**: Οι τιμές της μέγιστης ισχύς από τα φύλλα δεδομένων έχει ληφθεί για θερμοκρασία $T = 25^{\circ}\text{C}$ οπότε και αυτή επιλέχτηκε ως θερμοκρασία περιβάλλοντος για την ανάλυση που θα ακολουθήσει.

Ενώ ο συντελεστής HTC είναι ίσος με $25 \frac{W}{K*m^2}$.

- **Επιφάνειες για Θερμική Ανάλυση**: Οι επιφάνειες που επιλέγονται για την θερμική ανάλυση είναι όλες εκτός των pads.

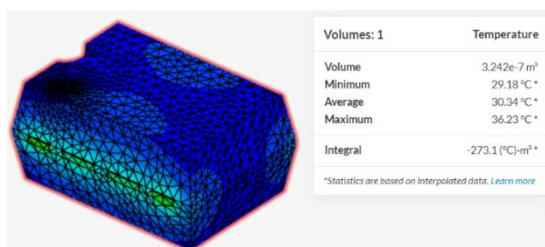
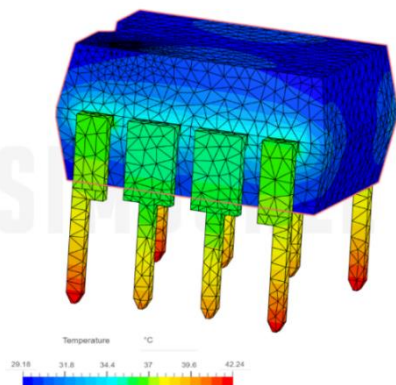
- **Ρυθμίσεις Πλέγματος:** Πέρα από τις ήδη υπάρχουσες επιλογές, η μόνη αλλαγή έγινε στον δείκτη Fineness αναθέτοντας τον στην τιμή 8 για τις πρώτες 4 προσομοιώσεις και έπειτα στην μέγιστη τιμή 10, ώστε να επιτύχουμε μεγαλύτερη ανάλυση (καθώς έβγαζε προειδοποίηση για χαμηλή ανάλυση του πλέγματος).

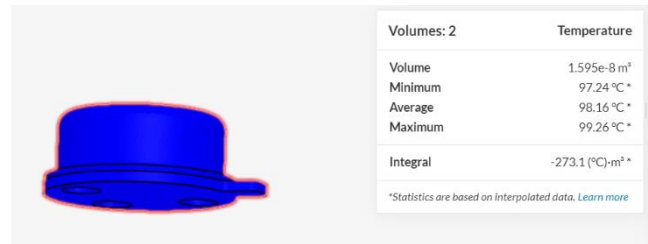
Σε πρώτη φάση, θα γίνει θερμική ανάλυση των 2 στοιχείων χωρίς ψύκτρες ώστε να χρησιμοποιήσουμε τα αποτελέσματα ως αναφορά για τα αποτελέσματα με την παρουσία των ψυκτρών. Συμπληρωματικά, σε κάθε προσομοίωση πέρα από το γενικό αποτέλεσμα θα επικεντρωνόμαστε στα θερμοκρασιακά δεδομένα ενός συγκεκριμένου μέρους του στοιχείου. Ειδικότερα, για τον OpAmp και το BJT θα εστιάσουμε την προσοχή μας στο κύριο μέρος τους, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



Επομένως, τώρα είμαστε σε θέση να εκτελέσουμε τις προσομοιώσεις.

Οπότε, εξάγουμε τα πρώτα αποτελέσματα (αναφοράς) που φαίνονται παρακάτω



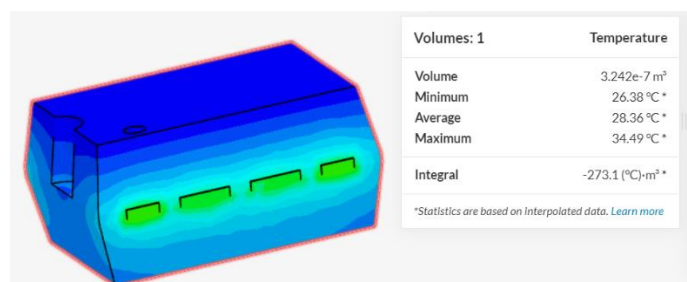
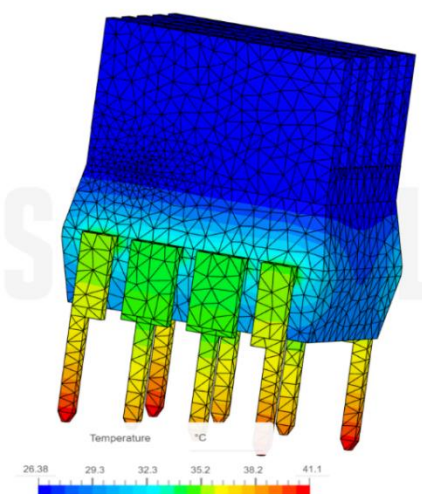


Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στα κομμάτια του διπολικού τρανζίστορ είναι αρκετά μεγαλύτερες από αυτές του τελεστικού ενισχυτή. Μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι ενώ ο τελεστικός (ολοκληρωμένο) έχει πάνω από 20 τρανζίστορ τελικά οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι χαμηλότερες από το διπολικό (διακριτό στοιχείο-1 τρανζίστορ).

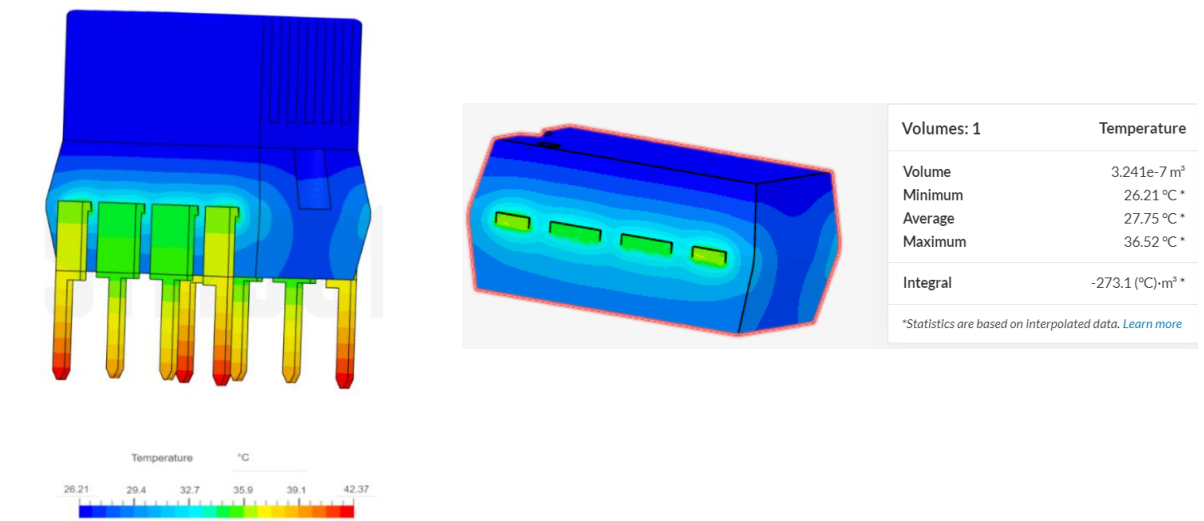
Στην πορεία ακολουθούν 4 οι προσομοιώσεις για τον OpAmp με τις 4 διαφορετικές ψύκτρες του.

Επομένως, έχουμε:

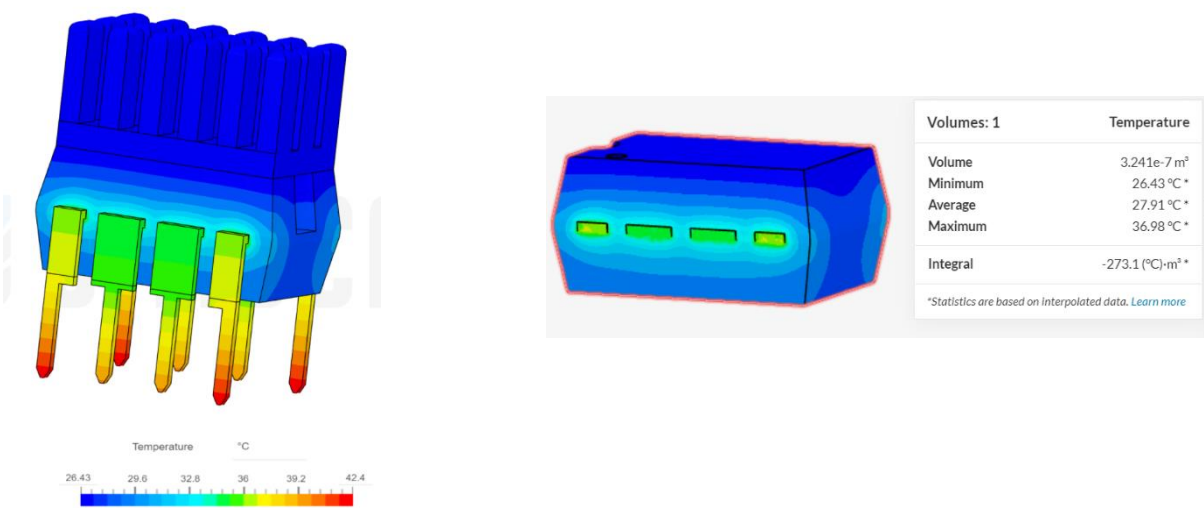
Ψύκτρα 1



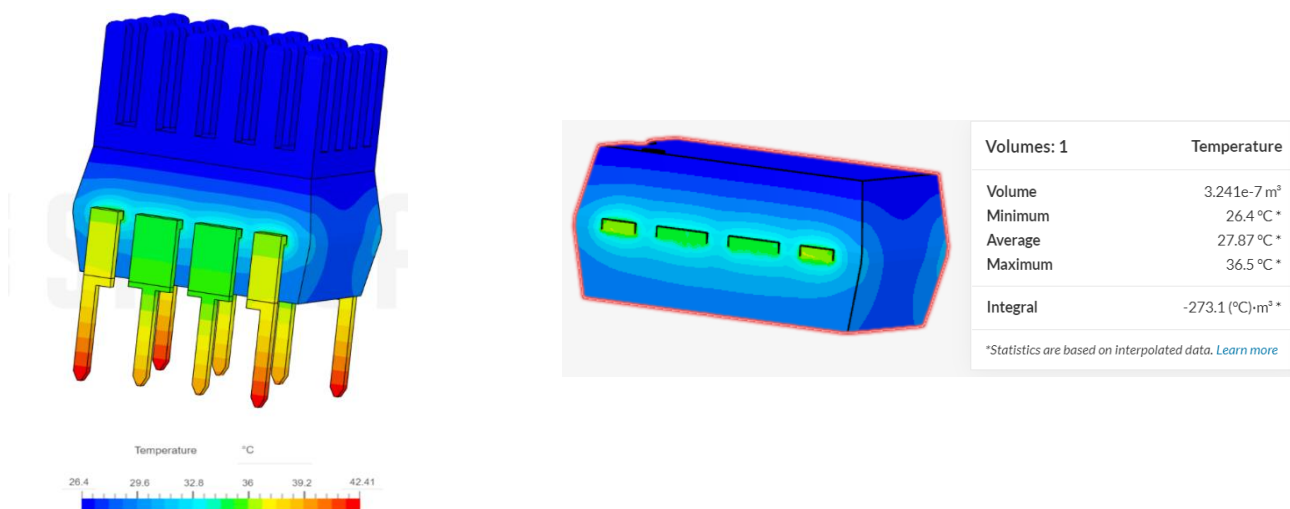
Ψύκτρα 2



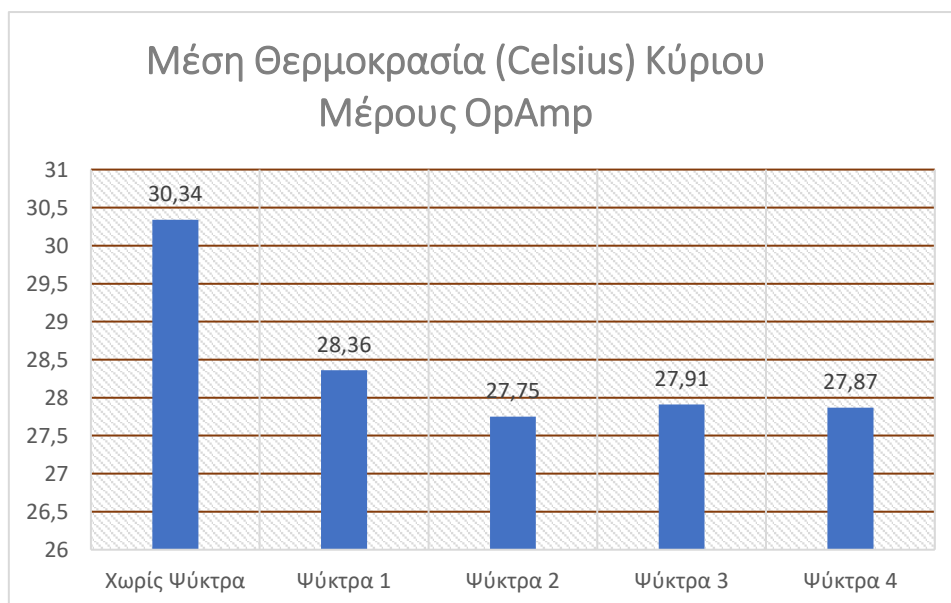
Ψύκτρα 3



Ψύκτρα 4



Για τον πιο εύκολο σχολιασμό των αποτελεσμάτων, στο παρακάτω ραβδοδιάγραμμα γίνεται η σύγκριση των θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν στο κύριο σώμα του OPAMP όταν δεν υπάρχει ψύξη και για τις τέσσερις διαφορετικές ψύκτρες.



Οπότε, έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα

$$\text{Απόδοση}(\Psi.2) > \text{Απόδοση}(\Psi.4) > \text{Απόδοση}(\Psi.3) > \text{Απόδοση}(\Psi.1)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών που αναπτύχθηκαν όταν υπάρχει παρουσία ψύκτρας είναι αρκετά κοντά (διαφορά ενός δεκαδικού). Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία χωρίς ψύξη είναι ίση με $T = 30.34^{\circ}\text{C}$ ενώ η χαμηλότερη που επιτεύχθηκε ισούται με $T = 27.75^{\circ}\text{C}$. Βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι το κατώφλι της θερμοκρασίας που έχουμε είναι η $T = 25^{\circ}\text{C}$. Κλείνοντας την πρώτη ανάλυση βλέπουμε ότι η ψύκτρα επιδρά αποτελεσματικά στην μείωση της θερμοκρασίας.

Τώρα ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις 2 ψύκτρες του διπολικού τρανζίστορ.

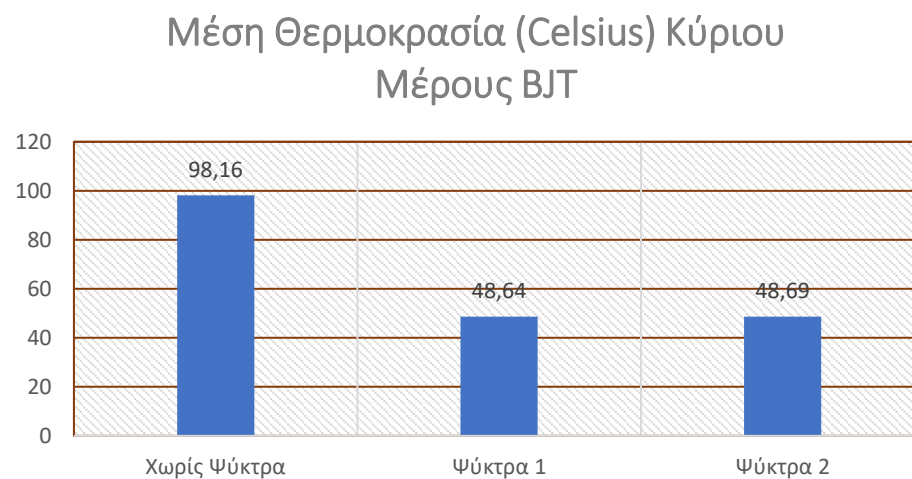
Ψύκτρα 1



Ψύκτρα 2



Ομοίως με την προηγούμενη ανάλυση, θα παρουσιάσουμε το κάτωθι διάγραμμα για έναν πιο συγκεντρωτικό σχολιασμό.



Αρχικά παρατηρούμε ότι,

$$\text{Απόδοση}(\Psi.1) \geq \text{Απόδοση}(\Psi.2)$$

Στην περίπτωση του τρανζίστορ παρατηρούμε αρχικά την εμφάνιση τριπλάσιας θερμοκρασίας όταν δεν υπάρχει ψύκτρα (σε σχέση με τον τελεστικό ενισχυτή).

Γεγονός αναμενόμενο μιας και οι συνοριακές συνθήκες για το BJT ήταν πιο έντονες. Σχετικά με την ψύξη, βλέπουμε ότι οι δύο ψύκτρες επιτυγχάνουν μία μείωση κοντά στο 50% της θερμοκρασίας αποτέλεσμα αρκετά ικανοποιητικό.