



ΔΗΜΟΚΡΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Τομέας Ενεργειακών Συστημάτων, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών

---

*Μεταπτυχιακή Διατριβή*

---

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ  
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ ΠΟΥ  
ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΩΣ ΕΝΕΡΓΑ ΦΙΛΤΡΑ  
ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ  
ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ**

**Καραμπάσης Β. Εμμανουήλ  
Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός**

Ξάνθη, Μάρτιος 2017

## Δομή παρουσίασης της Μεταπτυχιακής Διατριβής

- Εισαγωγή στα ενεργά φίλτρα
- Υιοθέτηση των ενεργών φίλτρων στο εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος
- Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας
- Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος
- Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών
- Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

# Εισαγωγή στα ενεργά φίλτρα

- Μη γραμμικά φορτία → Αρμονικές διαταραχές ρεύματος
- Αρμονικές τάσεις

Φίλτρα απόσβεσης  
αρμονικών:

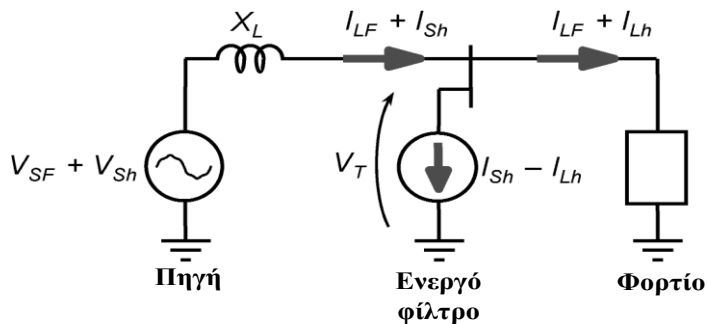
Παθητικά φίλτρα

Χαμηλοπερατά  
Υψηλοπερατά  
Ζωνοπερατά  
Ζωνοφρακτά

Ενεργά φίλτρα

Παράλληλα  
Σειράς  
Υβριδικά

Αρχή αντιστάθμισης των αρμονικών του ρεύματος



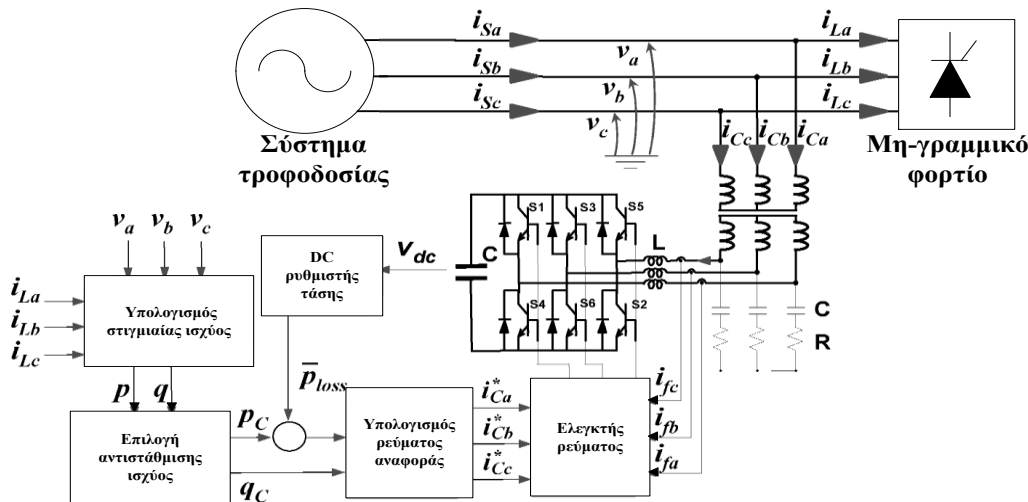
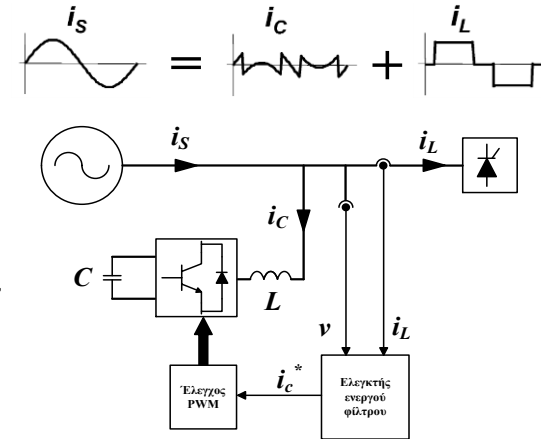
# Εισαγωγή στα ενεργά φίλτρα

Τα **παράλληλα ενεργά φίλτρα** αποτελούνται κατά κανόνα, από δύο ξεχωριστά βασικά στοιχεία:

- Τον μετατροπέα που οδηγείται από την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών PWM (επεξεργασία ισχύος)
- Τον ελεγκτή του παράλληλου ενεργού φίλτρου (επεξεργασία σήματος)

## Στρατηγικές ελέγχου:

1. Στρατηγική ελέγχου σταθερής στιγμιαίας ισχύος.
2. Στρατηγική ελέγχου ημιτονοειδούς ρεύματος.
3. Στρατηγική ελέγχου ελάχιστου ρεύματος πηγής (Fryze).

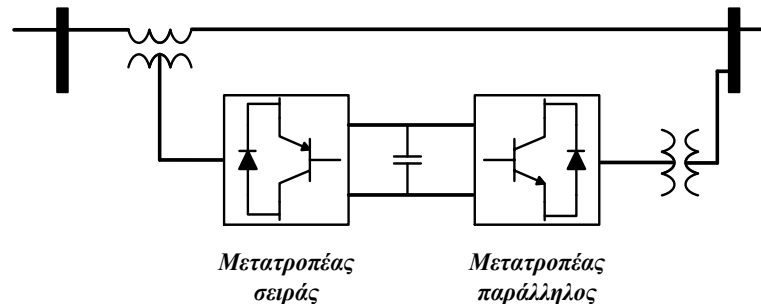


Ο ελεγκτής του παράλληλου ενεργού φίλτρου, αποτελείται από 4 μπλοκ ελέγχου:

1. Υπολογισμός στιγμιαίας ισχύος.
2. Επιλογή ισχύος αντιστάθμισης.
3. Ρυθμιστής συνεχούς τάσης.
4. Υπολογισμός ρεύματος αναφοράς.

## Εισαγωγή στα ενεργά φίλτρα

Συνδυασμός σειράς και παράλληλου ενεργού φίλτρου:



Τοπολογίες κυκλωμάτων ελέγχου υβριδικών ενεργών φίλτρων:

1) Ενιαίος μετατροπέας ροής ισχύος (UPFC – Unified Power Flow Controller):

- Έλεγχος της ροής ισχύος
- Έλεγχος της αντιστάθμισης άεργου ισχύος
- Έλεγχος της ρύθμισης της τάσης.

2) Ενιαίος μετατροπέας ποιότητας ισχύος (UPQC – Unified Power Quality Conditioner):

- Αντιστάθμιση των αρμονικών της τάσης
- Αντιστάθμιση των αρμονικών του ρεύματος

3) Ενιαίος μετατροπέας ενεργού ισχύος της γραμμής μεταφοράς (UPLC – Unified active Power Line Conditioner):

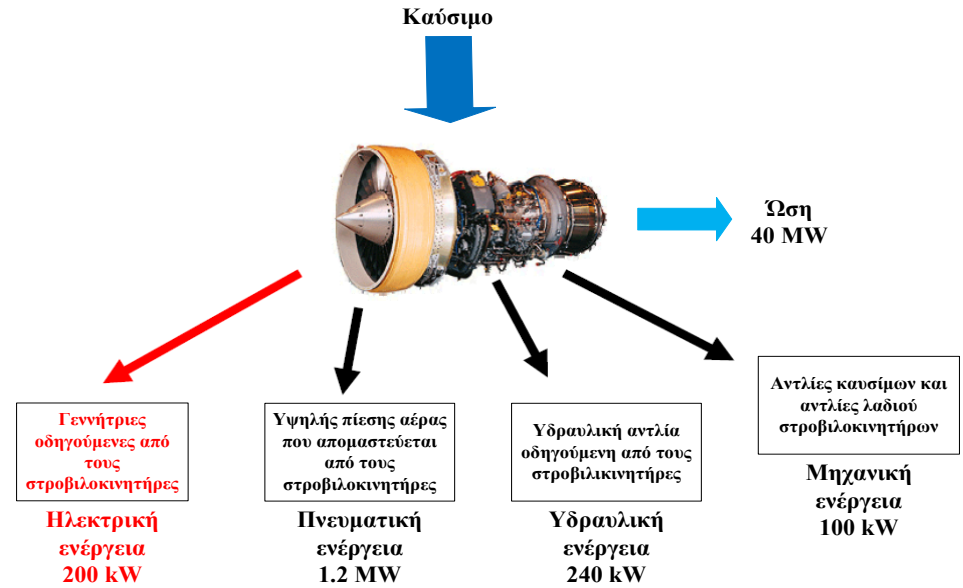
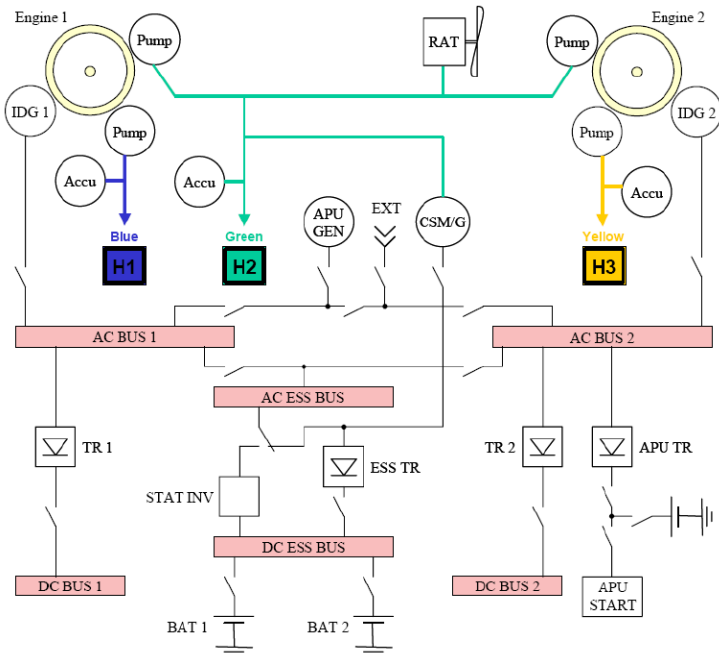
- Συνδυασμός των λειτουργιών UPFC και UPQC, σε έναν ενιαίο μετατροπέα ισχύος, πλήρως βασισμένος στη Θεωρία  $p - q$

# Υιοθέτηση των ενεργών φίλτρων στο εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος

## Συμβατικό αεροσκάφος:

Λειτουργία υποσυστημάτων με:

- Πνευματική ενέργεια
- Υδραυλική
- Μηχανική
- Ηλεκτρική



| Τύπος Ισχύος     | Λειτουργίες   | Μειονεκτήματα  |
|------------------|---|--|
| Πνευματική ισχύς | Τροφοδοσία του ECS και του IPS με θερμό αέρα  | Χαμηλή αποδοτικότητα και δύσκολος ο εντοπισμός διαρροών  |
| Μηχανική ισχύς   | Τροφοδοσία των υδραυλικών αντλιών, των μηχανικά οδηγούμενων υποσυστημάτων και της κύριας γεννήτριας   | Μεγάλη πολυπλοκότητα και μικρή δυνατότητα συντήρησης   |
| Υδραυλική ισχύς  | Τροφοδοσία των συστημάτων ενεργοποίησης για τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα έλεγχο της πτήσης (περυγία κλπ), του συστήματος προσγείωσης (έκταση και αναδίπλωση των τροχών, φρενάρισμα), του συστήματος ενεργοποίησης του κινητήρα και άλλων πολυάριθμων βοηθητικών συστημάτων | Μεγάλο βάρος και πιθανή διαρροή επικινδύνων και διαβρωτικών υγρών                              |
| Ηλεκτρική ισχύς  | Τροφοδοσία των ηλεκτρικών συστημάτων, του φωτισμού του αεροσκάφους και της καμπίνας, των φούρνων και άλλων ηλεκτρικών φορτίων   | Χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος σε σχέση με την υδραυλική και μεγάλος κίνδυνος πρόκλησης πυρκαγιάς |

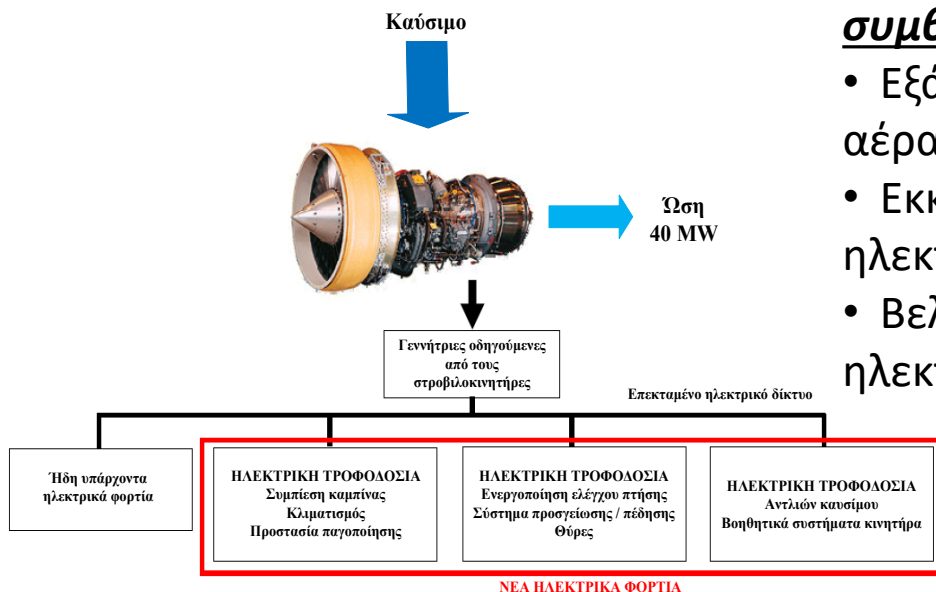
# Υιοθέτηση των ενεργών φίλτρων στο εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος

## Εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος:

Ως **εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος** ή για λόγους συντομογραφίας **ΜΕΑ**, χαρακτηρίζεται το αεροσκάφος που η πλειονότητα των δευτερευόντων συστημάτων ισχύος, χρησιμοποιεί ως πηγή τροφοδοσίας, την ηλεκτρική ενέργεια.

## Πλεονεκτήματα εξηλεκτρισμένου έναντι συμβατικού αεροσκάφους:

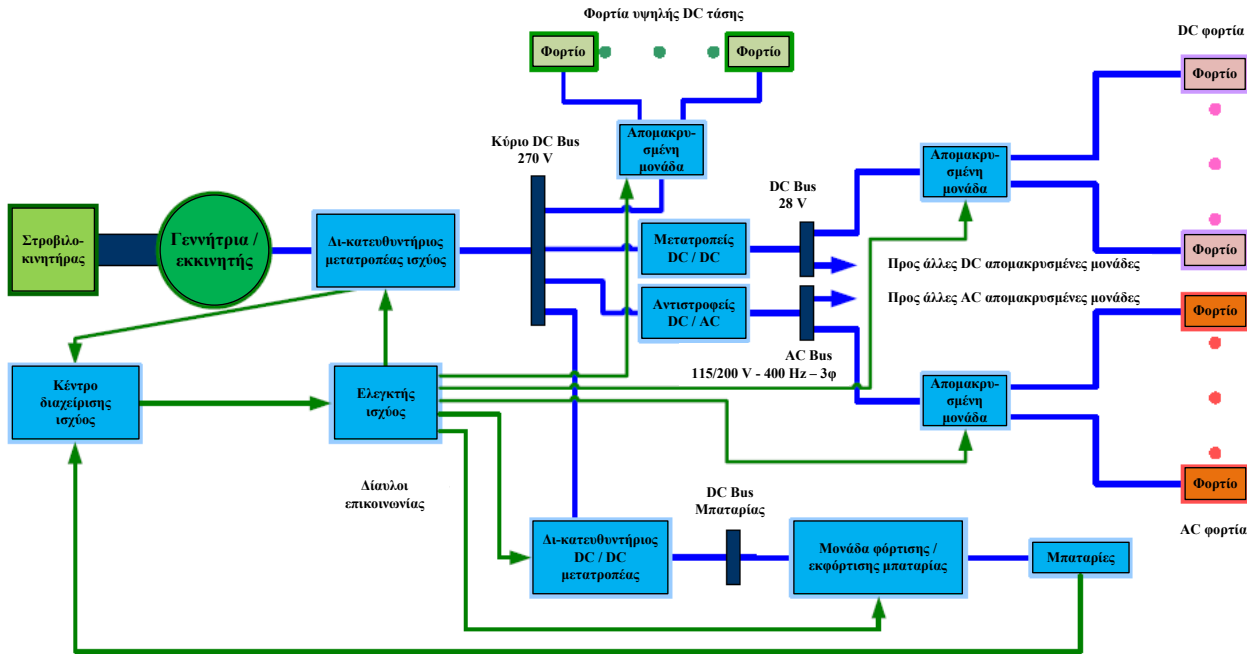
- Εξάλειψη της μεθόδου απομάστευσης θερμού αέρα από τους στροβιλοκινητήρες
- Εκκίνηση των στροβιλοκινητήρων με ηλεκτρική ενέργεια
- Βελτιωμένη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας



Κατανομή των απαιτήσεων ενέργειας στο ΜΕΑ, με εκτιμώμενη ισχύ του ηλεκτρικού συστήματος  $\approx 1 \text{ MW}$

# Υιοθέτηση των ενεργών φίλτρων στο εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος

## Αρχιτεκτονική του EPDS ενός MEA:



## Πλεονεκτήματα δικτύου διανομής **MEA**:

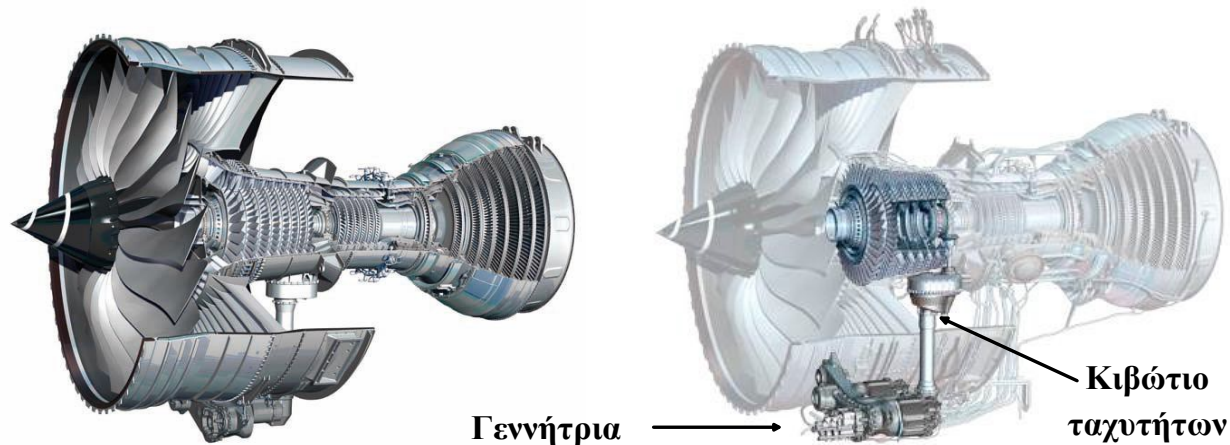
- Όλα τα φορτία διαχειρίζονται κι ελέγχονται από μία «έξυπνη» κεντρική μονάδα.
- Η μέθοδος διαχείρισης ισχύος μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του μεγέθους και του βάρους των συστημάτων παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και των συσσωρευτών.
- Η απόδοση, όλων των συστημάτων του αεροσκάφους, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά.



# Υιοθέτηση των ενεργών φίλτρων στο εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος

## Ανάκτηση ενέργειας από τους στροβιλοκινητήρες των αεροσκαφών:

Έως σήμερα χρησιμοποιούνται γεννήτριες Ε.Ρ. κινούμενες μέσω κιβωτίων ταχυτήτων. Ο άξονας του στροβίλου περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα, η οποία υποβιβάζεται με τη βοήθεια ενός κιβωτίου ταχυτήτων και στη συνέχεια δίδει κίνηση στον άξονα της γεννήτριας, που παράγει την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια, τροφοδοτώντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα ηλεκτρικά φορτία του αεροσκάφους

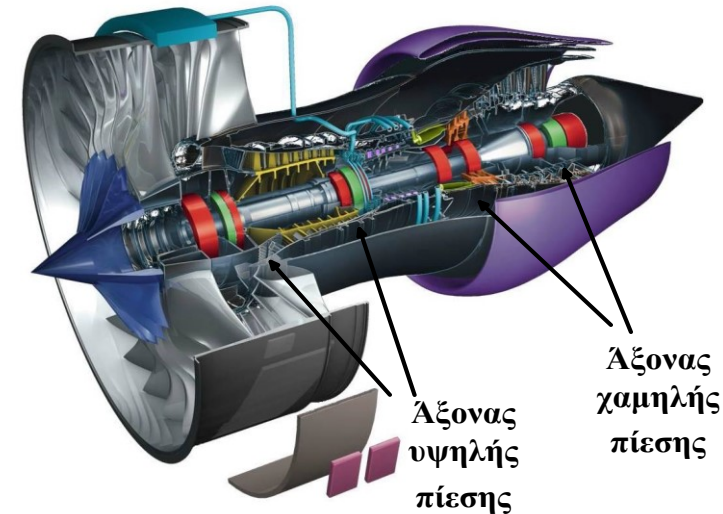


# Υιοθέτηση των ενεργών φίλτρων στο εξηλεκτρισμένο αεροσκάφος

## Προτεινόμενες μέθοδοι ανάκτησης ενέργειας από τους στροβιλοκινητήρες των αεροσκαφών:

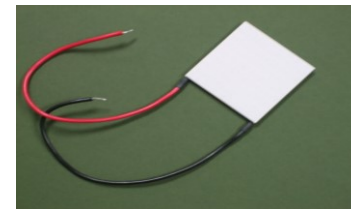
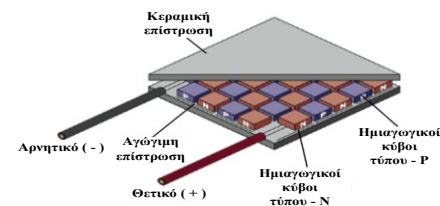
### 1) Τεχνολογική μέθοδος της εταιρείας Rolls Royce:

Προσαρμογή στον άξονα του στροβιλοκινητήρα, μίας γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (200 kW) και μίας τύπου switched reluctance 120 kW



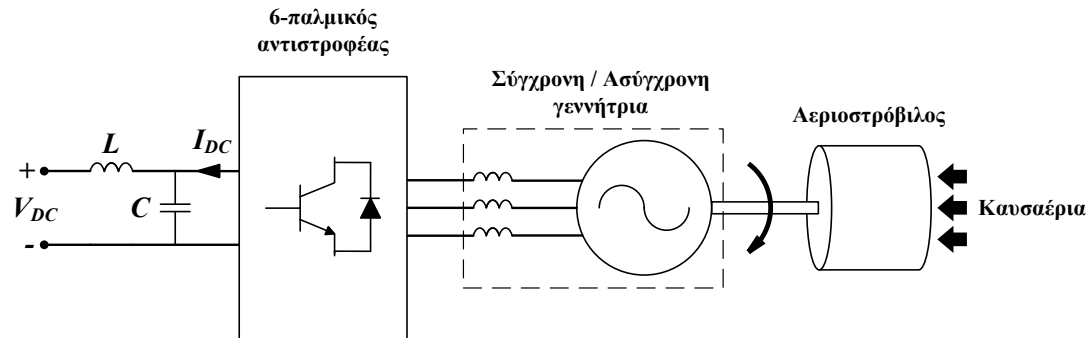
### 2) Ερευνητικό πρόγραμμα RENERGISE του Ευρωπαϊκού Προγράμματος Πλαισίου CLEAN SKY:

- A) Στατικό σύστημα ανάκτησης ενέργειας (Static Waste Heat Recovery – SWHR), μετατρέπει άμεσα τη θερμική ενέργεια των καυσαερίων σε ηλεκτρική
- B) Σύστημα δυναμικής ανάκτησης ενέργειας (Dynamic Waste Heat Recovery – DWHR) από τα καυσαέρια



# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

Γενικευμένο διάγραμμα δυναμικού συστήματος ανάκτησης ενέργειας:



**Στόχος:** τροφοδοσία φορτίων συνολικής ισχύος **30 kW** στον ζυγό Σ.Τ.

Μελετηθείσες τοπολογίες:

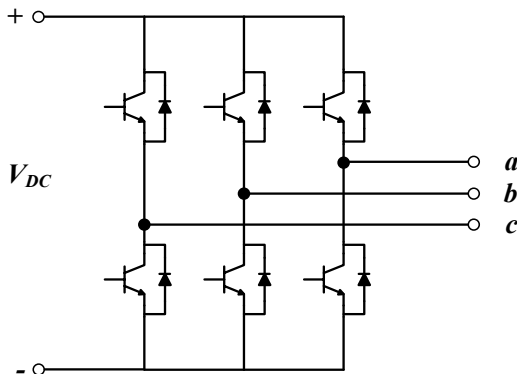
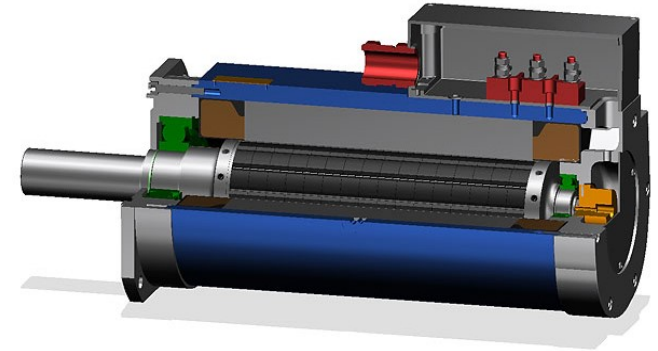
1. Συμβατικό **σύστημα σύγχρονης** τριφασικής γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη
2. Προτεινόμενο **σύστημα ασύγχρονης** τριφασικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα

**Κοινό σημείο αναφοράς** η σύνδεση στον ζυγό Σ.Τ. που θα πρέπει να τροφοδοτεί το ενδεικτικό φορτίο ισχύος 30 kW

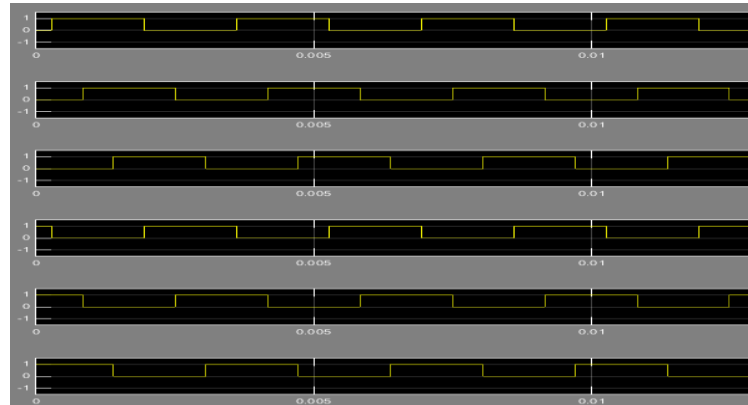
# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

## Συμβατικό σύστημα σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη :

**Σύγχρονη**, χαρακτηρίζεται η γεννήτρια, που ο δρομέας της περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα (σύγχρονα) με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του διακένου

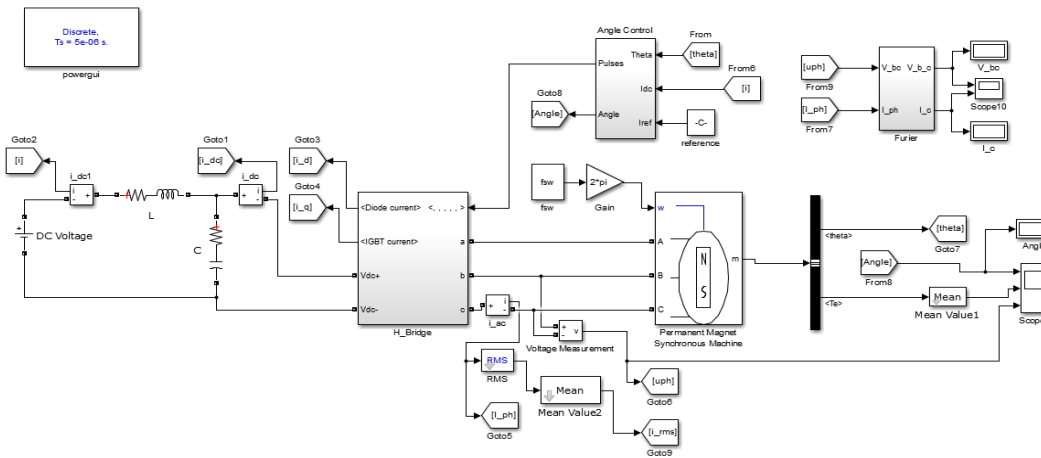


- Τριφασικός αντιστροφέας, **συστήματος σύγχρονης** γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη, **τριών** μονάδων τρανζίστορ IGBT.
- Παλμοδότηση των διακοπών της γέφυρας: διαμόρφωση τετραγωνικού παλμού **square wave**

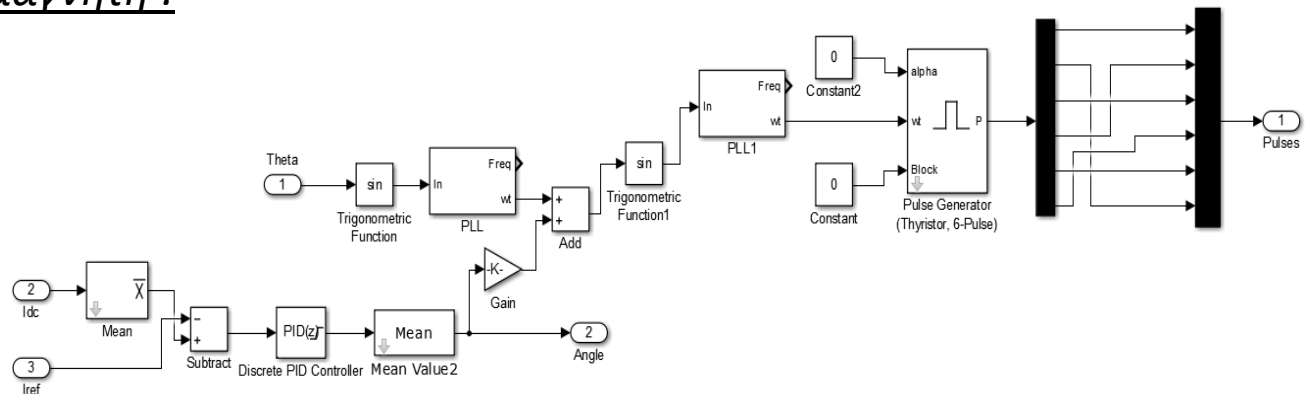


# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

Μοντελοποίηση συστήματος σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη, σε περιβάλλον MATLAB/Simulink :



Κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα, για το σύστημα σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη :



# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

## Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη της εταιρείας Thales, μοντέλο AGV50 :

|   |                  |           |
|---|------------------|-----------|
| <b>Κύρια χαρακτηριστικά:</b>                            |                  |           |
| Δρομέας με μόνιμους μαγνήτες (σπιασίου – κοβαλτίου)     |                  |           |
| Δαχτυλίδι από ίνες άνθρακα και εποξειδικής ρητίνης      |                  |           |
| Λεπτά ελάσματα σιδήρου, χαμηλών απωλειών σιδήρου        |                  |           |
| Ψύξη μέσω κυκλοφορίας αέρα                              |                  |           |
| <b>Επιδόσεις γεννήτριας:</b>                            |                  |           |
| Ονομαστική ταχύτητα:                                    | 46000 – 52000    | RPM       |
| Ονομαστική ισχύς:                                       | 53               | kW        |
| Ονομαστική ροπή:  | 9 – 11           | Nm        |
| <b>Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:</b>                        |                  |           |
| Τριφασικό τύλιγμα αστέρα χωρίς ουδέτερο                 |                  |           |
| Αριθμός ζευγαριών πόλων:                                | 3                |           |
| Αντίσταση φάσης-ουδέτερου:                              | 13.3 (@ 20 °C)   | mΩ        |
| Επαγωγιμότητα φάσης-ουδέτερου ( $L_d = L_q$ ):          | 32               | μH        |
| <b>Λειτουργία γεννήτριας:</b>                           |                  |           |
| Περιοχή ονομαστικής ταχύτητας γεννήτριας:               | 46000 – 52000    | RPM       |
| Συχνότητα τάσεων και ρευμάτων σε λειτουργία γεννήτριας: | 2300 – 2600      | Hz        |
| Τάση φάσης-ουδέτερου εν κενώ:                           | 127 (@45000 RPM) | VRMS      |
| Συντελεστής $Ke$ ( $E_b^{eff} / \Omega$ )               | 0.027            | V/(rad/s) |
| Τριφασικό ρεύμα βραχυκύκλωσης:                          | 285              | ARMS      |
| Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς:                             | 53               | kW        |
| Ονομαστική τάση (@ 53 kW)                               | 120              | VRMS      |
| Ονομαστικό ρεύμα (@ 53 kW)                              | 145              | ARMS      |



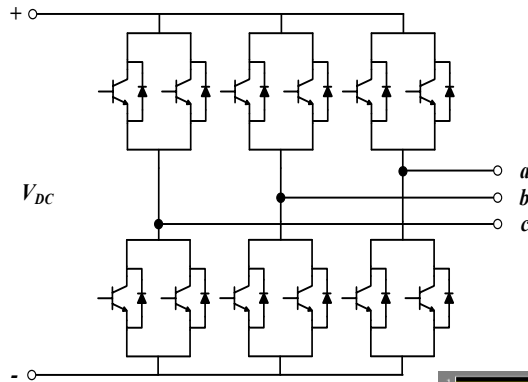
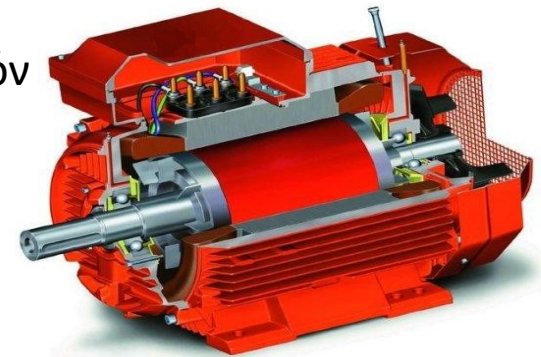
# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

## Προτεινόμενο σύστημα ασύγχρονης τριφασικής βραχυκυκλωμένου δρομέα:

Ο στάτης μιας **ασύγχρονης γεννήτριας**, είναι ο ίδιος με αυτόν της σύγχρονης, όμως ο δρομέας της έχει διαφορετική δομή

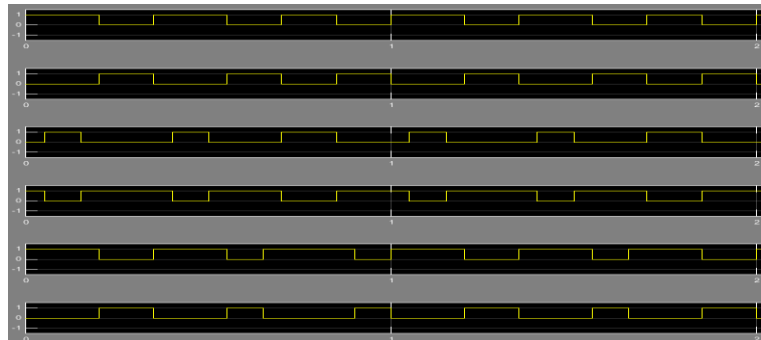
### Δύο τύποι δρομέων ασύγχρονης γεννήτριας:

- Δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (Squirrel cage rotor)
- Δακτυλιοφόρος δρομέας (Wound rotor)



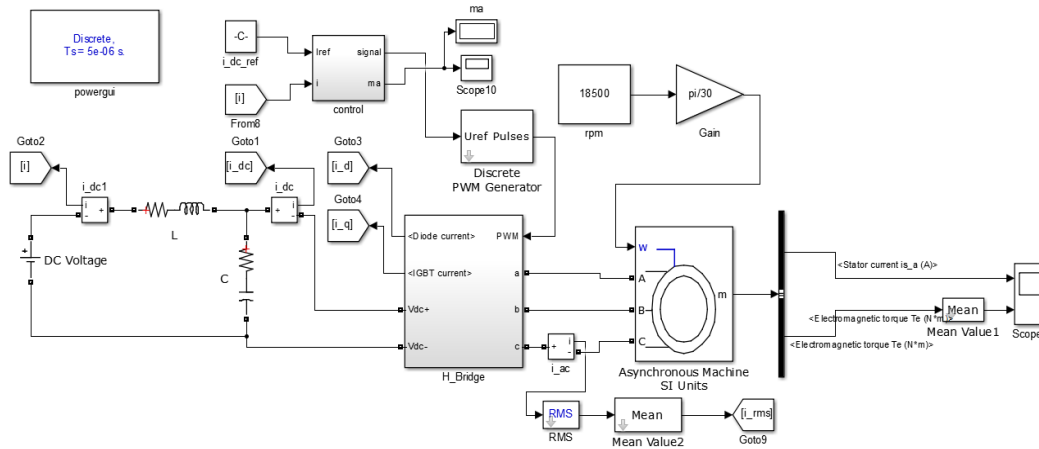
- Τριφασικός αντιστροφέας, **συστήματος ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου δρομέα**, έξι μονάδων τρανζίστορ IGBT.

- Παλμοδότηση των διακοπών της γέφυρας: ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών, **SPWM**

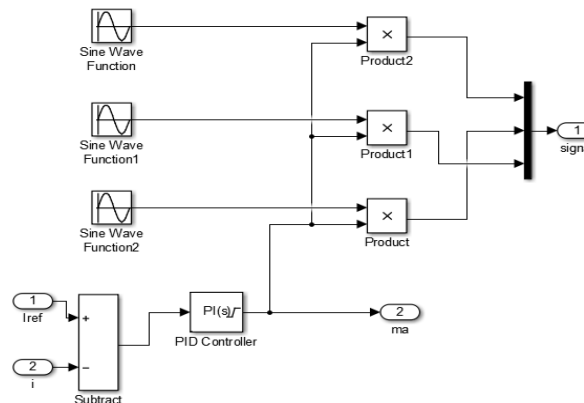


# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

Μοντελοποίηση συστήματος ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού, σε περιβάλλον MATLAB/Simulink :



Κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα, για το σύστημα ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού:





## Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού της εταιρείας Perske, μοντέλο KS 110.24-2 :

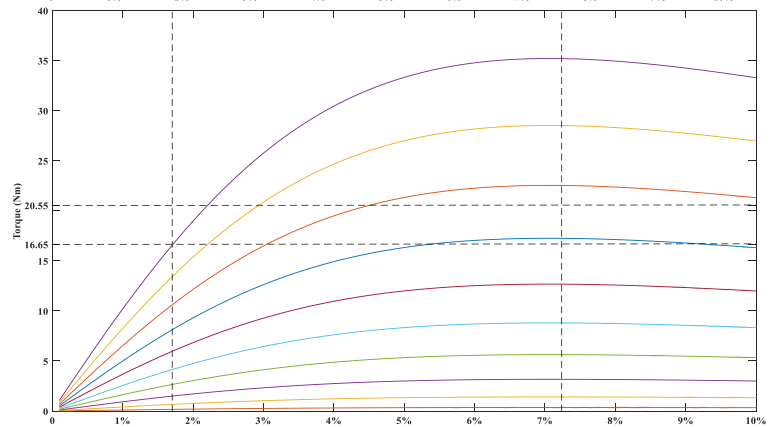
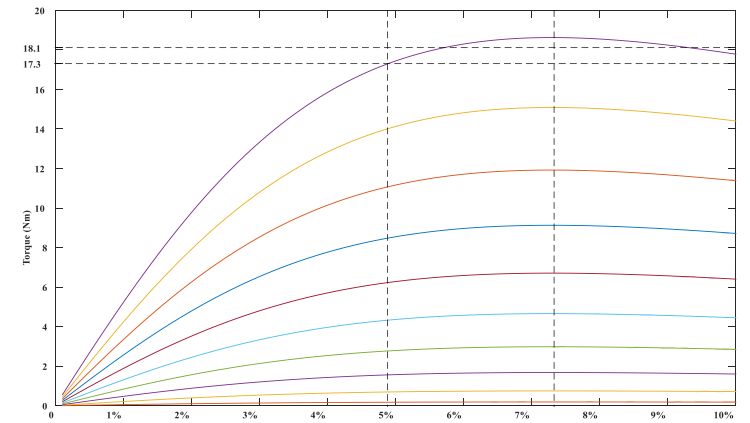
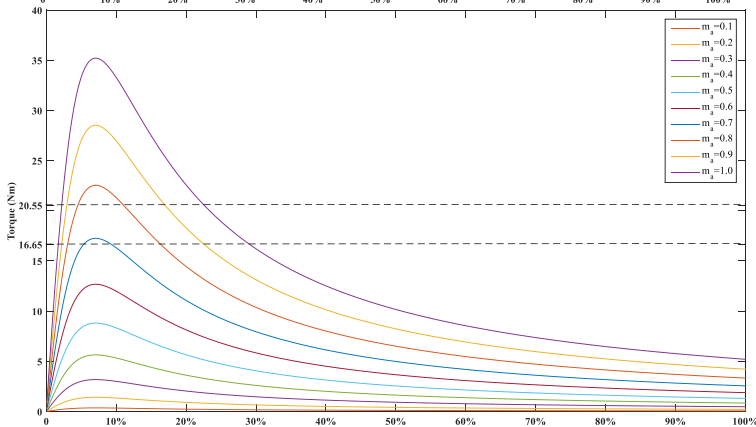
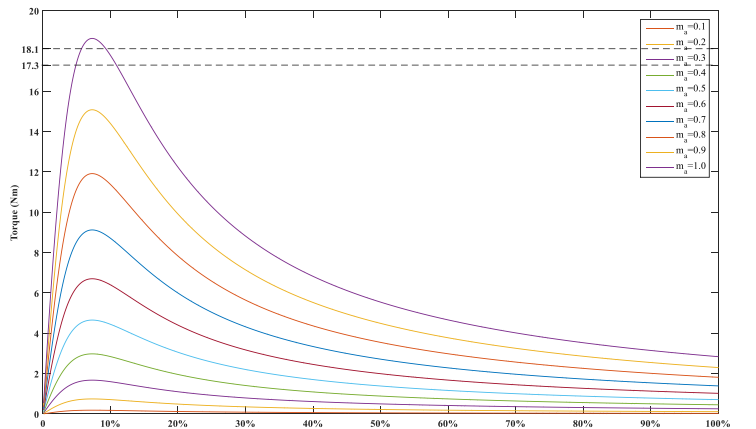
|   |         |             |                   |
|---|---------|-------------|-------------------|
| Τύπος κινητήρα:   |         | KS 110.24-2 |                   |
| Συχνότητα:  |         | 300         | Hz                |
| Τάση:   | Τρίγωνο | 400         | V                 |
| Εξοδος:   |         | 45          | kW                |
| Ρεύμα:  |         | 75          | A                 |
| Ταχύτητα με φορτίο:   |         | 17900       | RPM               |
| Ταχύτητα χωρίς φορτίο:  |         | 18000       | RPM               |
| Ροπή:   |         | 24          | Nm                |
| Μέγιστη Ροπή:   |         | 81          | Nm στις 17375 RPM |
| Συντελεστής Ισχύος:   |         | 0,93        |                   |
| Ρεύμα, χωρίς φορτίο:  |         | 17,7        | A                 |
| Κλάση λειτουργίας (κατά IEC 34-1)                               |         |             | S1                |
| Κλάση μόνωσης:  |         |             | F                 |
| Προστασία:  |         |             | P 54              |
| Κανονισμός:   |         |             | EN 60034          |
| Οι αντιστάσεις δίνονται στα 300 Hz και τη θερμοκρασία των 20 °C |         |             |                   |
| Κύρια αντίσταση (Στάση):  | $R_1$   | 0,0297      | $\Omega$          |
| Δευτερεύουσα αντίσταση (Ρότορα):                                | $R_2$   | 0,0352      | $\Omega$          |
| Κύρια επαγωγή (Στάση):  | $X_1$   | 0,745       | $\Omega$          |
| Δευτερεύουσα επαγωγή (Ρότορα):                                  | $X_2$   | 0,705       | $\Omega$          |
| Αντίσταση απωλειών πυρήνα:                                      | $R_m$   | 425         | $\Omega$          |
| Κύρια μαγνήτιση:  | $X_m$   | 39,4        | $\Omega$          |
| Ολίσθηση:   |         | 2,6         | %                 |
| Αμοιβαία επαγωγή:   |         | 20,9        | mH                |
| Ροπή αδράνειας:   |         | 0,054       | kgm <sup>2</sup>  |

# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

Προσομοιωθέντα σενάρια ασύγχρονης γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού :

|       | Σενάριο (A1)        | Σενάριο (A2) | Σενάριο (A3) | Σενάριο (A4) |
|-------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| $R_1$ | 0.0297 ( $\Omega$ ) | ↓ 70.70%     | ↓ 48.37%     | ↓ 82.79%     |
| $X_1$ | 0.7450 ( $\Omega$ ) | ↓ 41.41%     | ↓ 46.74%     | ↓ 46.74%     |
| $R_2$ | 0.0352 ( $\Omega$ ) | ↓ 70.70%     | ↓ 48.37%     | ↓ 48.37%     |
| $X_2$ | 0.7050 ( $\Omega$ ) | ↓ 41.41%     | ↓ 46.74%     | ↓ 46.74%     |
| $X_m$ | 39.40 ( $\Omega$ )  | ↑ 3415.63%   | ↑ 245.31%    | ↑ 15.10%     |

\* Τα βέλη (↓, ↑), συμβολίζουν την ποσοστιαία μείωση ή αύξηση, της τιμής του Σεναρίου βάσης (A1)

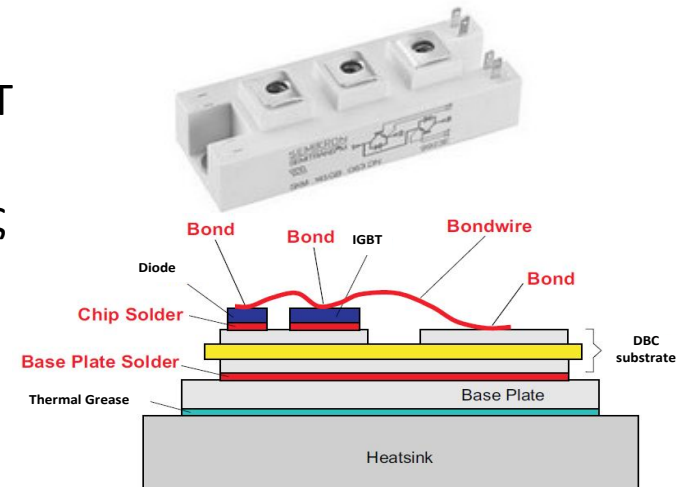


# Προτεινόμενες τοπολογίες ενεργών φίλτρων για την ανάκτηση ενέργειας

## Μονάδες τρανζίστορ IGBT:

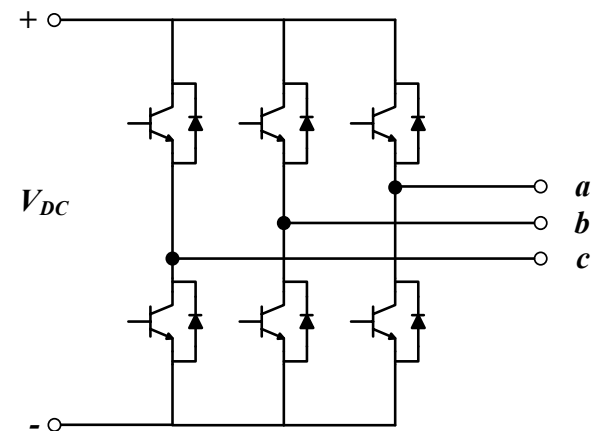
Τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση στο IGBT αναπτύσσονται διακοπτικές απώλειες (μετάβασης). Η ισχύς αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα και προφανώς είναι ανεπιθύμητη καθώς:

- μπορεί να καταστρέψει το στοιχείο
- μείωση του βαθμού απόδοσης του μετατροπέα.



Τα χρονικά διαστήματα έναυσης και σβέσης είναι πολύ μικρά, άρα οι **διακοπτικές τους απώλειες** είναι χαμηλές όταν η διακοπτική συχνότητα είναι χαμηλή (π.χ. 2 kHz). Προφανώς, καθώς αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα αυξάνονται και οι διακοπτικές απώλειες.

Απώλειες σε ένα τρανζίστορ IGBT εμφανίζονται και κατά την αγωγή. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται **απώλειες αγωγής** και οφείλονται στη θερμότητα που αναπτύσσεται στο ημιαγωγικό στοιχείο λόγω της ροής του ρεύματος αγωγής.



## Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος

Όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής. Τα υλικά και τα στοιχεία από τα οποία αυτές κατασκευάζονται, συν τω χρόνω χάνουν τις αρχικές τους ιδιότητες λόγω φθοράς ή μέσω φυσικών και χημικών διεργασιών όπως ο ερπυσμός, η κόπωση, η διάβρωση και η αύξηση της ευθραυστότητας, οδηγώντας τελικά σε αστοχία. Κι ενώ στο παρελθόν το ενδιαφέρον επικεντρωνόταν στην απόδοση των συστημάτων, η αξιοπιστία τους (Reliability) πλέον αποκτάει όλο και περισσότερη σημασία.

Ως **αξιοπιστία**,  $R(t)$ , ενός συστήματος στο χρόνο  $t$ , ορίζεται η πιθανότητα να μην υπάρξει αστοχία του συστήματος πριν από κάποιο χρονικό διάστημα  $t$ :

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

Ο ρυθμός με τον οποίο εμφανίζονται οι αστοχίες σε ένα διάστημα από  $t_1$  έως  $t_2$ , είναι ο **ρυθμός σφαλμάτων  $\lambda(t)$**  και ορίζεται ως ο λόγος της πιθανότητας να συμβούν σφάλματα σε ένα χρονικό διάστημα, δεδομένου ότι δεν έχει συμβεί κάποιο πριν τη στιγμή  $t_1$  (η έναρξη αυτού του διαστήματος), διαιρούμενη με το χρονικό διάστημα:

$$\lambda(t) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{t_2 - t_1} \cdot \frac{1}{R(t_1)}$$

## Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος

Ο μέσος χρόνος μέχρι την αστοχία (*Mean Time To Failure – MTTF*), δεν είναι τίποτα περισσότερο από την αναμενόμενη τιμή το χρόνου μέχρι το σφάλμα:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

**Μέσος χρόνος ανάμεσα σε αστοχίες (MTBF).** Αυτή η έννοια εμφανίζεται αρκετά συχνά στη βιβλιογραφία της αξιοπιστίας και εφαρμόζεται σε επισκευάσιμα στοιχεία, σύμφωνα με την οποία τα στοιχεία που αστοχούν αντικαθίστανται μετά την αστοχία.

| Συνάρτηση πυκνότητας αστοχιών<br>(χρόνος μέχρι την αστοχία)                              | $f(t)$  |
|--|---|
| Εξίσωση Αξιοπιστίας  | $R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = \exp \left[ - \int_0^t h(t) dt \right]$ |
| Ρυθμός Κινδύνου<br>(Ρυθμός Αστοχίας)   | $h(t) = f(t)/R(t)$<br>$\lambda(t) = \int_0^t h(t) dt$                     |
| Μέσος Χρόνος μέχρι την Αστοχία (MTTF)<br>(χωρίς επισκευή)                                | $MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$  |
| Μέσος Χρόνος Ανάμεσα στις Αστοχίες<br>(σταθερός ρυθμός αστοχιών $\lambda$ , με επισκευή) | $MTBF = \frac{T(t)}{r} = 1/\lambda$                                       |

# Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος

Υπάρχουν πολλά πρότυπα στατιστικών κατανομών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση των διάφορων παραμέτρων της αξιοπιστίας.

**Συνεχείς κατανομές**, για την ανάλυση της αξιοπιστίας είναι:

- Κανονική (ή Γκαουσιανή) κατανομή
- Κανονική λογαριθμική κατανομή
- Εκθετική κατανομή
- Κατανομή Γάμμα
- Κατανομή Weibul

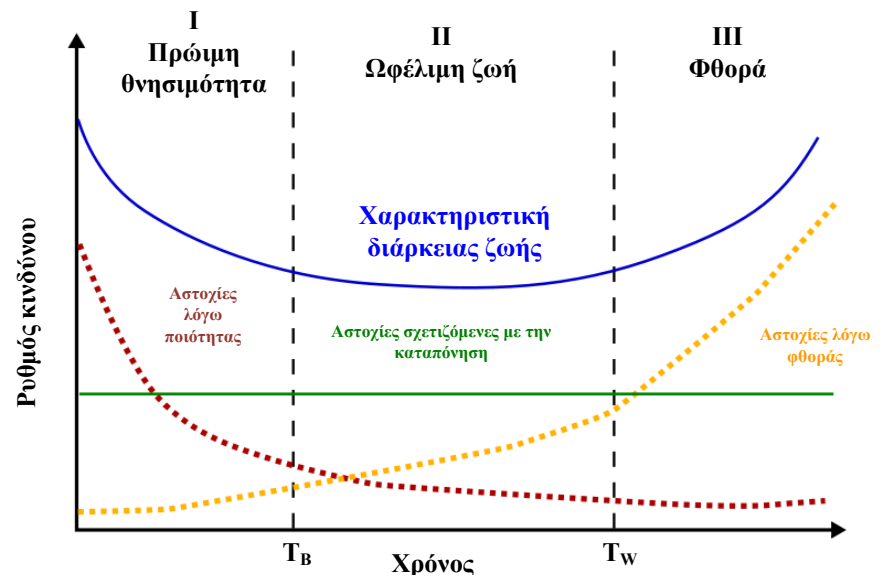
**Διακριτές κατανομές:**

- Διωνυμική κατανομή
- Κατανομή Poisson

Τρεις είναι οι βασικές μορφές διαμόρφωσης των μαθηματικών μοντέλων αξιοπιστίας:

1. Σειράς
2. Παράλληλη
3. K-Out-Of-N διαμόρφωση

## Καμπύλη Bathtub, ρυθμός κινδύνου συναρτήσει της ηλικίας



# Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος

Η μελέτη της αξιοπιστίας των συστημάτων έγινε με βάση το **Πρότυπο MIL-HDBK-217F**.

## Υπολογισμός ρυθμού αστοχίας IGBT κατά MIL-HDBK-217F

$$\lambda_{ps} = \lambda_{b,ps} \pi_{ts} \pi_{as} \pi_{rs} \pi_{ss} \pi_q \pi_e$$

Βασικός ρυθμός αποβλήτων -  $\lambda_{b,ps}$

| Τύπος       | $\lambda_{b,ps} \cdot 10^4 \text{ h}^{-1}$ |
|-------------|--|
| MOS και PNP | 0.00074                                    |

Παράγοντας αερομολής -  $\pi_a$

| Κατηγορία                   | $\pi_a$ |
|-----------------------------|---------|
| Γραμμική αντίστροφη Διακοπή | 1.50    |
| Διακοπή                     | 0.70    |

Παράγοντας θερμοκρασίας -  $\pi_{ts}$

| $T_j$ (°C) | $\pi_{ts}$ | $T_j$ (°C) | $\pi_{ts}$ |
|------------|------------|------------|------------|
| 25         | 1.0        | 105        | 4.5        |
| 30         | 1.1        | 110        | 4.8        |
| 35         | 1.3        | 115        | 5.2        |
| 40         | 1.4        | 120        | 5.6        |
| 45         | 1.6        | 125        | 5.9        |
| 50         | 1.7        | 130        | 6.2        |
| 55         | 1.9        | 135        | 6.5        |
| 60         | 2.1        | 140        | 7.0        |
| 65         | 2.3        | 145        | 7.7        |
| 70         | 2.5        | 150        | 8.1        |
| 75         | 2.8        | 155        | 8.6        |
| 80         | 3.0        | 160        | 9.1        |
| 85         | 3.3        | 165        | 9.7        |
| 90         | 3.6        | 170        | 10         |
| 95         | 3.9        | 175        | 11         |
| 100        | 4.2        |            |            |

$$\pi_{ts} = \exp \left[ -2.114 \left( \frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right]$$

$T_j$  = Θερμοκρασία ημιαγωγού (°C)

Παράγοντας ονομαστικής ισχύος -  $\pi_{ss}$

| Ονομαστική ισχύς ( $P_o$ , Watts) | $\pi_{ss}$ |
|-----------------------------------|------------|
| $P_o \leq 0.1$                    | 0.45       |
| $P_o = 0.5$                       | 0.77       |
| $P_o = 1.0$                       | 1.00       |
| $P_o = 5.0$                       | 1.80       |
| $P_o = 10.0$                      | 2.30       |
| $P_o = 50.0$                      | 4.30       |
| $P_o = 100.0$                     | 5.50       |
| $P_o = 500.0$                     | 10         |

$\pi_{ss} = 0.45$  Ονομαστική ισχύς  $\leq 0.1 \text{ W}$   
 $\pi_{ss} = (P_o)^{0.12}$  Ονομαστική ισχύς  $\geq 0.1 \text{ W}$

Παράγοντας καταπόνησης από την εφαρμοζόμενη τάση -  $\pi_{rs}$

| Εφαρμοζόμενη $V_{CE}$ / Ονομαστική $V_{CE}$ | $\pi_{rs}$ |
|---|------------|
| 0 = $V_{CE} \leq 0.2$                       | 0.11       |
| 0.2 = $V_{CE} \leq 0.4$                     | 0.16       |
| 0.4 = $V_{CE} \leq 0.5$                     | 0.21       |
| 0.5 = $V_{CE} \leq 0.6$                     | 0.29       |
| 0.6 = $V_{CE} \leq 0.7$                     | 0.39       |
| 0.7 = $V_{CE} \leq 0.8$                     | 0.54       |
| 0.8 = $V_{CE} \leq 0.9$                     | 0.73       |
| 0.9 = $V_{CE} \leq 1.0$                     | 1.00       |

$\pi_{rs} = 0.045 \exp(3.1(V_{CE}))$  ( $0 \leq V_{CE} \leq 1.0$ )  
 $V_{CE}$  = Εφαρμοζόμενη  $V_{CE}$  / Ονομαστική  $V_{CE}$   
 $V_{CE}$  = Τάση, Γαλλόφωνη - Εισαγωγικό  
 $V_{CE}$  = Τάση, Γαλλόφωνη - Εισαγωγικό, Βόση ανισορροπία

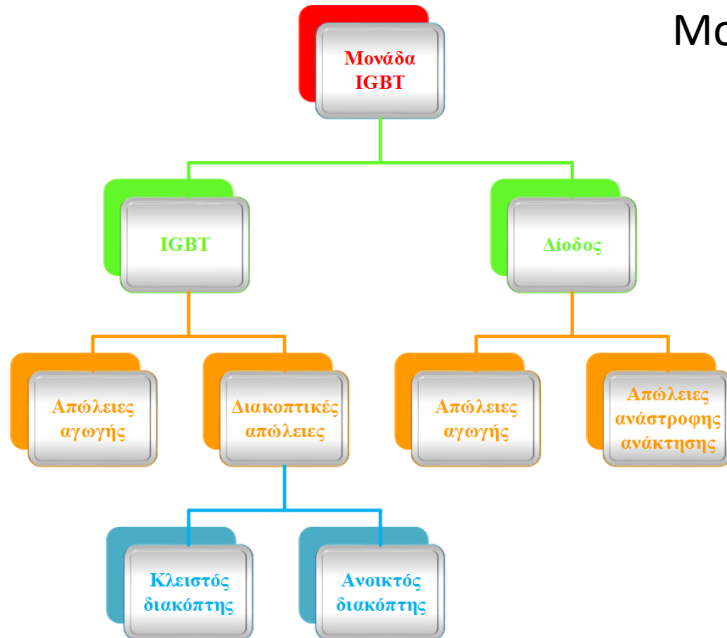
Παράγοντας περιβάλλοντος -  $\pi_e$

| Περιβάλλον | $\pi_e$ |
|------------|---------|
| Ga         | 1.00    |
| Gr         | 6.00    |
| Ga         | 9.00    |
| Na         | 9.00    |
| Ni         | 19.0    |
| Alc        | 13.0    |
| As         | 29.0    |
| Auc        | 30.0    |
| Auz        | 43.0    |
| Aut        | 24.0    |
| Sr         | 0.50    |
| Mt         | 14.0    |
| Mt         | 22.0    |
| Cs         | 220     |

Παράγοντας ποιότητας -  $\pi_q$

| Ποιότητα | $\pi_q$ |
|----------|---------|
| IANTON   | 0.70    |
| IANTX    | 1.00    |
| IAN      | 2.40    |
| Linear   | 5.50    |
| Flamic   | 8.00    |

# Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος



Μοντέλο υπολογισμού απωλειών τρανζίστορ IGBT:

$$P_{cond,IGBT} = V_{o,IGBT} \cdot I_{avg,IGBT} + R_{o,IGBT} \cdot I_{rms,IGBT}^2$$

$$P_{sw,IGBT} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{rms} \cdot f_{sw} \cdot V_{dc}}{\pi \cdot I_{nom} \cdot V_{nom}} \cdot E_{on} + E_{off}$$

$$P_{avg,IGBT} = P_{cond,IGBT} + P_{sw,IGBT}$$

Μοντέλο υπολογισμού απωλειών της αντιπαράλληλης διόδου ελεύθερης διέλευσης:

$$P_{cond,Diode} = V_{Do} \cdot I_{avg,Diode} + R_D \cdot I_{rms,Diode}^2$$

$$P_{rr,Diode} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{rms} \cdot f_{sw} \cdot V_{dc}}{\pi \cdot I_{nom} \cdot V_{nom}} \cdot E_{rr}$$

$$P_{avg,Diode} = P_{cond,Diode} + P_{rr,Diode}$$



# Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος

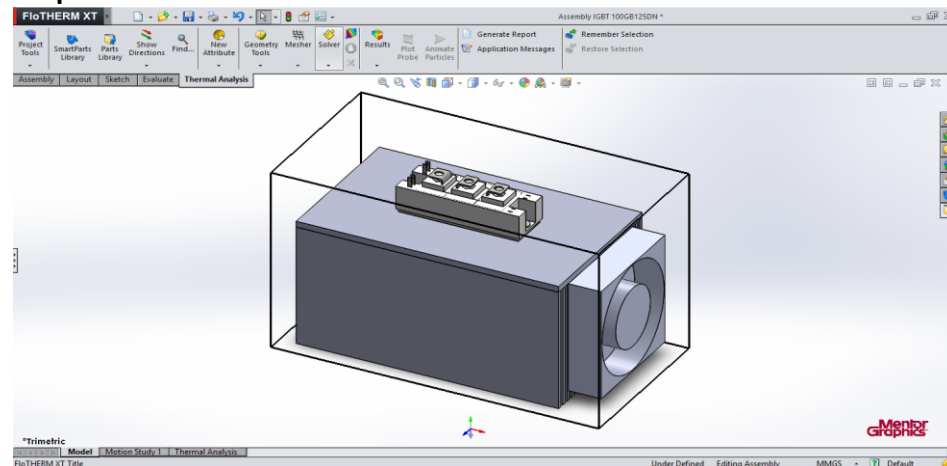
Σημειακό μοντέλο προσδιορισμού της θερμοκρασίας των ημιαγωγικών διακοπών της μονάδας τρανζίστορ IGBT:

$$T_{j,IGBT} = T_a + \theta_{j-c,IGBT} \cdot P_{avg,IGBT} + \theta_{c-a,Module} \cdot P_{avg,Module}$$

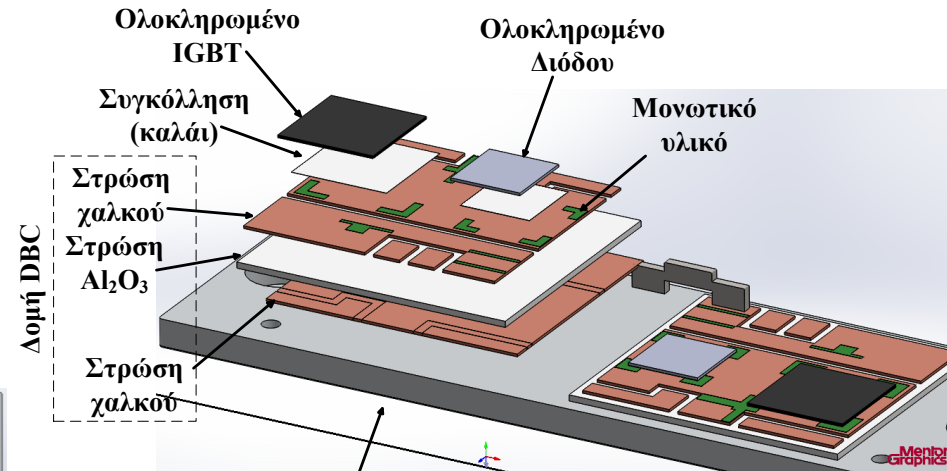
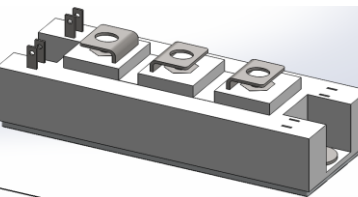
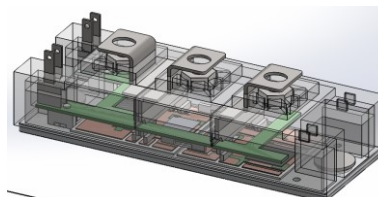
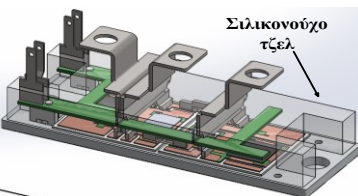
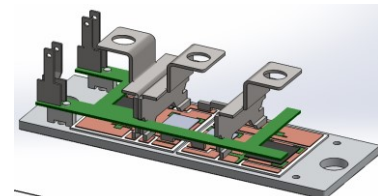
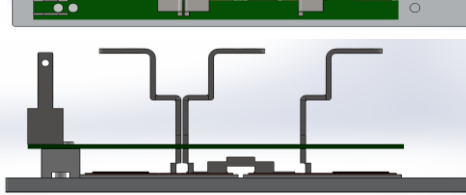
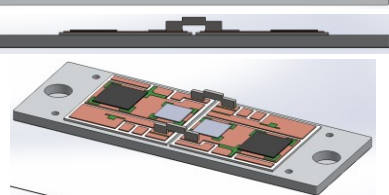
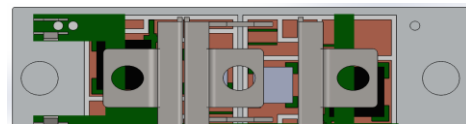
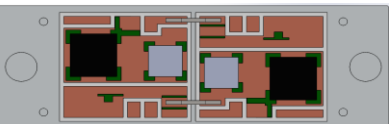
$$T_{j,Diode} = T_a + \theta_{j-c,Diode} \cdot P_{avg,Diode} + \theta_{c-a,Module} \cdot P_{avg,Module}$$

Πλήρες μοντέλο εξομοίωσης – προσδιορισμού της θερμοκρασίας των ημιαγωγικών στοιχείων της μονάδας τρανζίστορ IGBT:

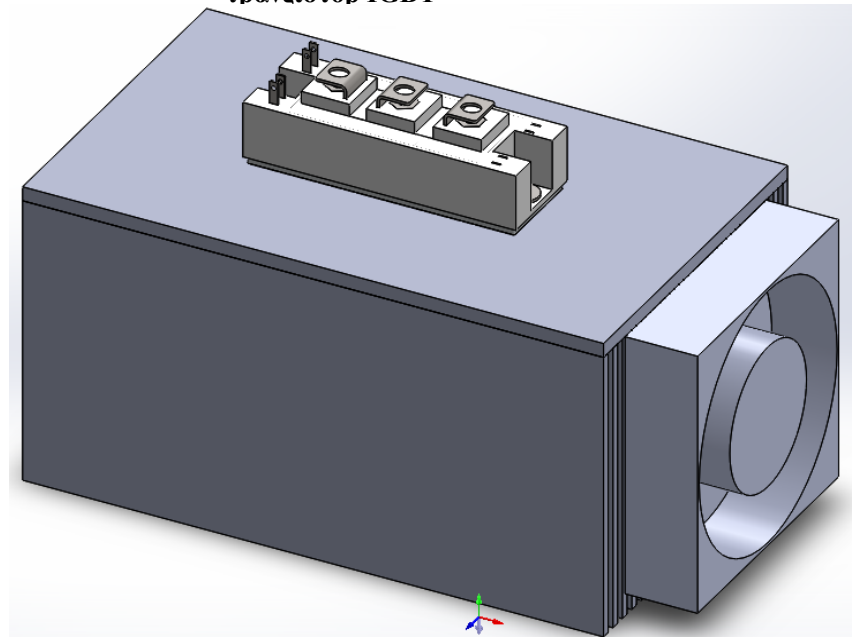
Το πλήρες μοντέλο εξομοίωσης για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας των ημιαγωγών μιας μονάδας IGBT, βασίζεται στην ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων με το FloTHERM XT, της Mentor Graphics.



# Μέθοδος ανάλυσης της αξιοπιστίας του συστήματος

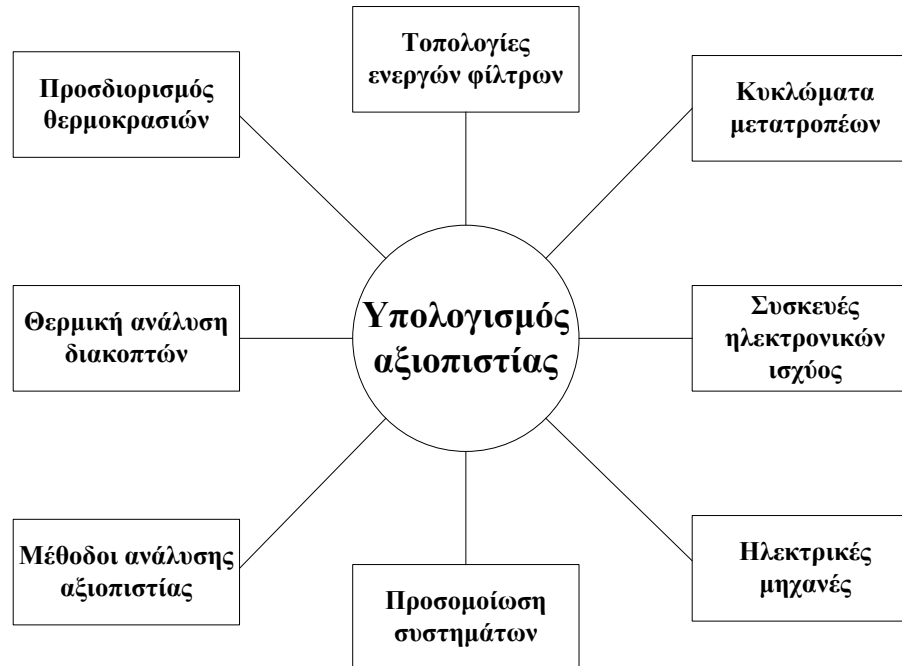


Βάση μονάδας τρανζίστορ IGBT



# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Βήματα για τον υπολογισμό της αξιοπιστίας των συστημάτων ανάκτησης ενέργειας:



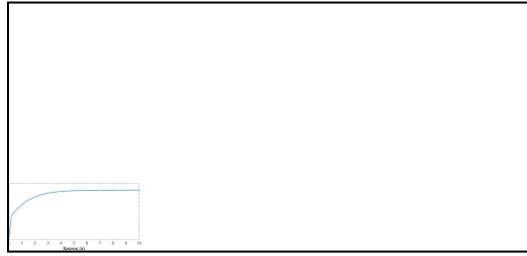
# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Ενδεικτικές κυματομορφές ρευμάτων, απωλειών και θερμοκρασιών:

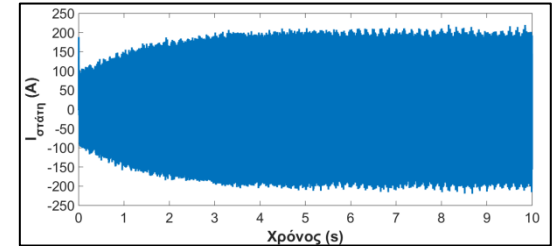
Μέση τιμή ρεύματος στον ζυγό Σ.Τ.



Ενεργός τιμή ρεύματος φάσης C



Ρεύμα στάτη



Ηλεκτρομαγνητική ροπή



Ενεργός τιμή ρεύματος IGBT και διόδου



Απώλειες αγωγής IGBT και διόδου



Διακοπτικές απώλειες IGBT και διόδου



Θερμοκρασία IGBT και διόδου



# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Υπολογισμός των λειτουργικών χαρακτηριστικών και της απόδοσης του συστήματος:

Ονομασίες σεναρίων με παράμετρο τη συχνότητα λειτουργίας

| Σενάριο | Συχνότητα παλμοδότησης αντιστροφεία |        |        |
|---------|-------------------------------------|--------|--------|
|         | 10 kHz                              | 20 kHz | 30 kHz |
| A1*     | -                                   | -      | A1/30  |
| A2*     | -                                   | -      | A2/30  |
| A3*     | A3/10                               | A3/20  | A3/30  |
| A4*     | A4/10                               | A4/20  | A4/30  |
| Σ1**    | Σ1                                  |        |        |

Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος (σενάριο A1/30)

| Στροφές<br>(rpm) | $V_{DC}$<br>(V) | $I_{DC}$<br>(A) | $m_a$ | $I_{rms}$<br>(A) | $T$<br>(N·m) | $\omega$<br>(rad/s) | $P_{DC}$<br>(W) | $P_m$<br>(W) | $P_e$<br>(W) | $\cos\varphi$ | $\eta$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-------|------------------|--------------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|---------------|--------|
| 18750            | 540             | 49.93           | 0.92  | 62.2             | 15.42        | 1963                | 26962           | 30262        | 28077        | 0.86          | 92.78% |
| 19000            | 540             | 55.44           | 0.92  | 76.1             | 17.30        | 1989                | 29938           | 34404        | 31309        | 0.78          | 91.00% |
| 19200            | 540             | 55.48           | 0.91  | 84.0             | 17.50        | 2010                | 29959           | 35168        | 31508        | 0.72          | 89.59% |
| 19250            | 540             | 55.48           | 0.91  | 86.0             | 17.55        | 2015                | 29959           | 35360        | 31543        | 0.70          | 89.20% |
| 19500            | 540             | 55.44           | 0.92  | 94.5             | 18.10        | 2041                | 29938           | 36942        | 31655        | 0.64          | 85.69% |
| 19750            | 540             | 52.79           | 0.92  | 100.5            | 17.26        | 2067                | 28507           | 35679        | 30336        | 0.57          | 85.02% |
| 20000            | 540             | 49.39           | 0.92  | 104.9            | 16.45        | 2093                | 26671           | 34435        | 28583        | 0.52          | 83.00% |
| 20500            | 540             | 42.39           | 0.92  | 110.6            | 14.65        | 2146                | 22891           | 31434        | 24914        | 0.43          | 79.26% |

# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Υπολογισμός των λειτουργικών χαρακτηριστικών και της απόδοσης του συστήματος:

Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος (σενάριο A3/10)

| Στροφές<br>(rpm) | $V_{DC}$<br>(V) | $I_{DC}$<br>(A) | $m_z$       | $I_{rms}$<br>(A) | $T$<br>(Nm)  | $\omega$<br>(rad/s) | $P_{DC}$<br>(W) | $P_m$<br>(W) | $P_e$<br>(W) | cosφ        | $\eta$        |
|------------------|-----------------|-----------------|-------------|------------------|--------------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| 18100            | 540             | 16.20           | 0.92        | 18.7             | 5.08         | 1894                | 8748            | 9624         | 8870         | 0.90        | 92.17%        |
| 18200            | 540             | 33.30           | 0.92        | 36.6             | 10.08        | 1905                | 17982           | 19202        | 18228        | 0.95        | 94.93%        |
| 18350            | 540             | 55.55           | 0.90        | 61.8             | 16.70        | 1921                | 29997           | 32075        | 30445        | 0.95        | 94.92%        |
| 18400            | 540             | 55.48           | 0.85        | 66.4             | 16.75        | 1926                | 29959           | 32258        | 30448        | 0.94        | 94.39%        |
| 18500            | 540             | 55.52           | 0.81        | 74.3             | 16.94        | 1936                | 29981           | 32792        | 30521        | 0.89        | 93.07%        |
| 19000            | 540             | 55.55           | 0.65        | 106.4            | 17.58        | 1989                | 29997           | 34961        | 30803        | 0.78        | 88.11%        |
| 19250            | 540             | 55.56           | 0.65        | 119.8            | 17.86        | 2015                | 30002           | 35985        | 30913        | 0.70        | 85.91%        |
| <b>19500</b>     | <b>540</b>      | <b>55.57</b>    | <b>0.66</b> | <b>132.2</b>     | <b>18.15</b> | <b>2041</b>         | <b>30008</b>    | <b>37044</b> | <b>31021</b> | <b>0.62</b> | <b>83.74%</b> |
| 20000            | 540             | 55.46           | 0.71        | 154.8            | 18.72        | 2093                | 29948           | 39181        | 31167        | 0.50        | 79.55%        |
| 20500            | 540             | 55.49           | 0.80        | 177.0            | 19.33        | 2146                | 29965           | 41476        | 31389        | 0.39        | 75.68%        |
| 21000            | 540             | 55.54           | 0.83        | 195.9            | 19.95        | 2198                | 29992           | 43850        | 31602        | 0.34        | 72.07%        |
| 21500            | 540             | 55.23           | 0.89        | 215.9            | 20.64        | 2250                | 29824           | 46456        | 31632        | 0.29        | 68.09%        |
| 22000            | 540             | 49.38           | 0.92        | 222.0            | 19.13        | 2303                | 26665           | 44050        | 28559        | 0.24        | 64.83%        |



# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Υπολογισμός των λειτουργικών χαρακτηριστικών και της απόδοσης του συστήματος:

Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστήματος (σενάριο Σ1)

| Στροφές<br>(rpm) | $V_{DC}$<br>(V) | $I_{DC}$<br>(A) | Γωνία<br>(°) | $I_{a,rms}$<br>(A) | $V_{ab,rms}$<br>(V) | $T$<br>(N.m) | $\omega$<br>(rad/s) | $P_{DC}$<br>(W) | $P_m$<br>(W) | $P_e$<br>(W) | cosφ        | $\eta$        |
|------------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------|---------------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| 18000            | 270             | 111.1           | 95.26        | 125.7              | 302.6               | 17.90        | 1884                | 30000           | 33718        | 30275        | 0.92        | 89.79%        |
| 18100            | 270             | 111.1           | 95.13        | 126.0              | 302.5               | 17.80        | 1894                | 30000           | 33722        | 30274        | 0.92        | 89.78%        |
| 18200            | 270             | 111.1           | 94.99        | 125.3              | 302.3               | 17.70        | 1905                | 30000           | 33717        | 30275        | 0.92        | 89.79%        |
| 18350            | 270             | 111.1           | 94.78        | 124.5              | 302.3               | 17.56        | 1921                | 30000           | 33721        | 30275        | 0.93        | 89.78%        |
| 18400            | 270             | 111.1           | 94.71        | 126.0              | 303.1               | 17.51        | 1926                | 30000           | 33722        | 30275        | 0.92        | 89.78%        |
| 18500            | 270             | 111.1           | 94.58        | 126.2              | 302.4               | 17.42        | 1936                | 30000           | 33723        | 30276        | 0.92        | 89.78%        |
| 19000            | 270             | 111.1           | 93.89        | 125.5              | 302.4               | 16.96        | 1989                | 30000           | 33728        | 30275        | 0.92        | 89.76%        |
| 19250            | 270             | 111.1           | 93.54        | 125.6              | 302.4               | 16.74        | 2015                | 30000           | 33732        | 30276        | 0.92        | 89.75%        |
| <b>19500</b>     | <b>270</b>      | <b>111.1</b>    | <b>93.19</b> | <b>125.9</b>       | <b>303.1</b>        | <b>16.53</b> | <b>2041</b>         | <b>30000</b>    | <b>33738</b> | <b>30276</b> | <b>0.92</b> | <b>89.74%</b> |
| 20000            | 270             | 111.1           | 92.68        | 126.5              | 302.0               | 16.13        | 2093                | 30000           | 33765        | 30277        | 0.92        | 89.67%        |
| 20500            | 270             | 111.1           | 91.76        | 126.3              | 302.5               | 15.73        | 2146                | 30000           | 33751        | 30277        | 0.92        | 89.71%        |
| 21000            | 270             | 111.1           | 91.04        | 127.3              | 303.1               | 15.36        | 2198                | 30000           | 33761        | 30278        | 0.91        | 89.68%        |
| 21500            | 270             | 111.1           | 90.32        | 125.5              | 302.5               | 15.01        | 2250                | 30000           | 33773        | 30279        | 0.92        | 89.65%        |
| 22000            | 270             | 111.1           | 89.61        | 126.8              | 302.0               | 14.67        | 2303                | 30000           | 33785        | 30279        | 0.91        | 89.62%        |
| 22500            | 270             | 111.1           | 88.84        | 127.0              | 302.2               | 14.35        | 2355                | 30000           | 33794        | 30280        | 0.91        | 89.60%        |

# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Υπολογισμός των λειτουργικών χαρακτηριστικών και της απόδοσης του συστήματος:

Συγκεντρωτικά λειτουργικά χαρακτηριστικά ανά σενάριο, στις 19500 rpm

| Σενάριο | $V_{DC}$<br>(V) | $I_{DC}$<br>(A) | $P_{DC}$<br>(W) | $P_m$<br>(W) | $P_e$<br>(W) | $cos\phi$ | $\eta$ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|-----------|--------|
| A3/30   | 540             | 55.93           | 30202           | 37044        | 32641        | 0.64      | 88.11% |
| A4/30   | 540             | 55.93           | 30202           | 35207        | 32578        | 0.66      | 92.53% |
| A3/20   | 540             | 55.30           | 29862           | 36867        | 31583        | 0.60      | 85.67% |
| A4/20   | 540             | 55.34           | 29884           | 35093        | 31547        | 0.62      | 89.90% |
| A3/10   | 540             | 55.57           | 30008           | 37044        | 31021        | 0.62      | 83.74% |
| A4/10   | 540             | 55.53           | 29986           | 35207        | 30977        | 0.64      | 87.98% |
| Σ1      | 270             | 111.1           | 30000           | 33738        | 30276        | 0.92      | 89.74% |

Υπολογισμός των απωλειών και των θερμοκρασιών των συστημάτων:

Απώλειες ισχύος και θερμοκρασίες ημιαγωγικών στοιχείων ανά σενάριο, στις 19500 rpm, υπολογισμένες με το σημειακό μοντέλο

| Σενάριο | Διακοπτικές απώλειες / Απόλειες αγωγής IGBT (W) | Διακοπτικές απώλειες / Απόλειες αγωγής διόδου (W) | Συνολικές απώλειες μονιάδας IGBT (W) | Συνολικές απώλειες αντιστροφεία (W) | Θερμοκρασία IGBT (°C) | Θερμοκρασία διόδου (°C) | Θερμοκρασία πλάτης μονιάδας IGBT (°C) |
|---------|---|---|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| A3/30   | 134.5 / 9.73                                    | 43.03 / 16.02                                     | 406.5                                | 2439.0                              | 130.66                | 134.23                  | 104.07                                |
| A4/30   | 131.2 / 9.09                                    | 41.97 / 15.87                                     | 395.9                                | 2375.4                              | 128.58                | 132.25                  | 103.33                                |
| A3/20   | 89.00 / 8.72                                    | 28.48 / 17.22                                     | 286.8                                | 1720.8                              | 113.33                | 118.59                  | 95.74                                 |
| A4/20   | 86.69 / 9.91                                    | 27.74 / 14.29                                     | 277.3                                | 1663.8                              | 112.38                | 116.01                  | 94.99                                 |
| A3/10   | 44.64 / 9.96                                    | 14.28 / 15.50                                     | 168.8                                | 1012.8                              | 97.29                 | 102.35                  | 87.46                                 |
| A4/10   | 43.61 / 8.74                                    | 13.96 / 16.24                                     | 165.1                                | 990.6                               | 96.53                 | 102.21                  | 87.108                                |
| Σ1      | 0.98 / 1.29                                     | 0.31 / 43.43                                      | 92.3                                 | 276.9                               | 82.57                 | 104.03                  | 82.16                                 |

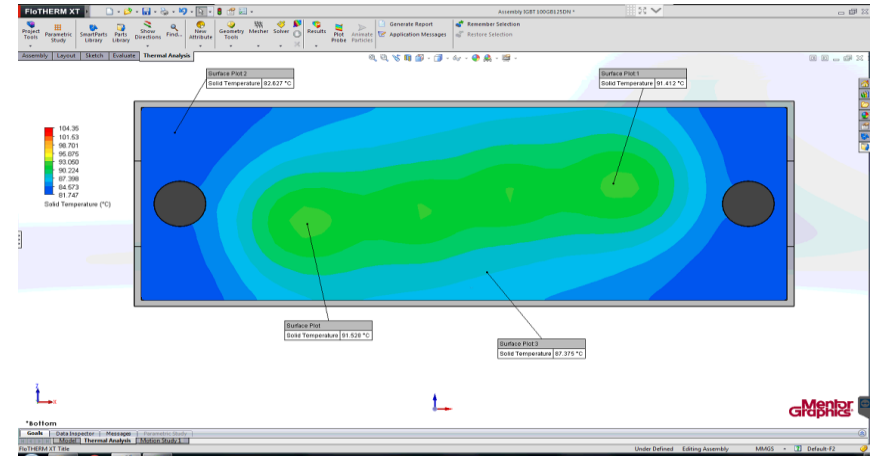
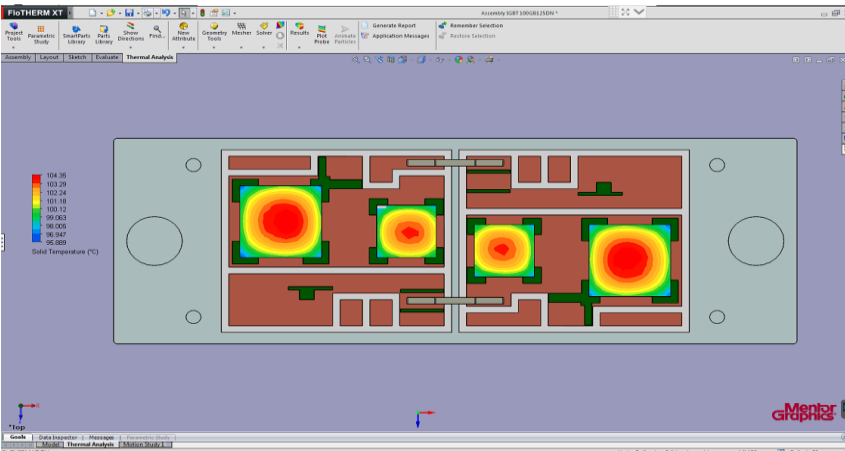


# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

Υπολογισμός των απωλειών και των θερμοκρασιών των συστημάτων:

Τιμές θερμοκρασιών τρανζίστορ IGBT και διόδων με τη χρήση του σημειακού μοντέλου και του μοντέλου προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία, για τα διάφορα σενάρια

| Σενάριο | Θερμοκρασία πλάτης μονιάδας IGBT (°C) | Σημειακό μοντέλο      |                         | Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων |                            |                         |                              |
|---------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------------|
|         |                                       | Θερμοκρασία IGBT (°C) | Θερμοκρασία διόδου (°C) | Θερμοκρασία IGBT (°C)          | Μέση θερμοκρασία IGBT (°C) | Θερμοκρασία διόδου (°C) | Μέση θερμοκρασία διόδου (°C) |
| A3/30   | 104.07                                | 130.66                | 134.23                  | 149.25                         | 141.92                     | 136.05                  | 131.53                       |
| A4/30   | 103.33                                | 128.58                | 132.25                  | 147.28                         | 140.15                     | 131.64                  | 130.21                       |
| A3/20   | 95.74                                 | 113.33                | 118.59                  | 126.21                         | 121.39                     | 120.58                  | 117.06                       |
| A4/20   | 94.99                                 | 112.38                | 116.01                  | 125.22                         | 120.41                     | 117.78                  | 114.55                       |
| A3/10   | 87.46                                 | 97.29                 | 102.35                  | 104.49                         | 101.71                     | 103.64                  | 101.37                       |
| A4/10   | 87.108                                | 96.53                 | 102.21                  | 103.46                         | 100.78                     | 103.57                  | 101.22                       |
| Σ1      | 82.16                                 | 82.57                 | 104.03                  | 83.64                          | 82.21                      | 106.53                  | 102.99                       |



# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

## Υπολογισμός της αξιοπιστίας των συστημάτων:

| Σενάριο | Θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας 75 °C |         |            |         |   | Θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας 100 °C |         |            |         |   |
|---------|---|---------|------------|---------|---|--|---------|------------|---------|---|
|         | $\lambda_{2,r}$                             | $\pi_r$ | $\pi_{rr}$ | $\pi_e$ | $\lambda_{sr}$<br>(σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) | $\lambda_{2,r}$                              | $\pi_r$ | $\pi_{rr}$ | $\pi_e$ | $\lambda_{sr}$<br>(σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) |
| A3/30   | -   | -       | -          | -       | -   | -  | -       | -          | -       | -   |
| A4/30   | -   | -       | -          | -       | -   | -  | -       | -          | -       | -   |
| A3/20   | -   | -       | -          | -       | -   | -  | -       | -          | -       | -   |
| A4/20   | -   | -       | -          | -       | -   | -  | -       | -          | -       | -   |
| A3/10   | -   | -       | -          | -       | -   | -  | -       | -          | -       | -   |
| A4/10   | -   | -       | -          | -       | -   | -  | -       | -          | -       | -   |
| Σ1      | 0.19  | 1.50    | 1.00       | 16.00   | <b>4.58</b>   | 2.33   | 1.50    | 1.00       | 16.00   | <b>55.98</b>  |

| Θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας 75 °C |             |             |      |      |         |          |   |
|---|-------------|-------------|------|------|---------|----------|---|
| Σενάριο                                     | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | A    | B    | $a_s$   | $a_w$    | $\lambda_{ss}$<br>(σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) |
| A3/30                                       | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |
| A4/30                                       | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |
| A3/20                                       | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |
| A4/20                                       | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |
| A3/10                                       | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |
| A4/10                                       | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |
| Σ1  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 17311.9 | 87697.76 | <b>40.77</b>  |

| Θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας 100 °C |             |             |      |      |         |          |   |
|--|-------------|-------------|------|------|---------|----------|---|
| Σενάριο                                      | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | A    | B    | $a_s$   | $a_w$    | $\lambda_{ss}$<br>(σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) |
| A3/30  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |
| A4/30  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |
| A3/20  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |
| A4/20  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |
| A3/10  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |
| A4/10  | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |
| Σ1   | 1.00        | 1.00        | 1.90 | 1.10 | 6095.43 | 30834.35 | <b>115.83</b>                                       |

| Υπολογισμός ρυθμού σφαλμάτων ανά αντιστροφή |  |                |
|---|--|----------------|
|   | $\lambda_{sm}$ (σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) |                |
| Σενάριο                                     | Σημειακό μοντέλο                                 | Πλήρες μοντέλο |
| A3/30                                       | 16.536   | 17.693         |
| A4/30                                       | 15.960   | 15.862         |
| A3/20                                       | 12.349   | 12.280         |
| A4/20                                       | 11.795   | 11.750         |
| A3/10                                       | 8.938  | 9.005          |
| A4/10                                       | 8.896  | 8.918          |
| Σ1  | 1.117  | 1.164          |

| Σενάριο | Θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας γεννήτριας / αισθητήρα 75 °C |                   |                |                | Σημειακό μοντέλο<br>$\lambda_2$<br>(σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) | Αναλυτικό μοντέλο |
|---------|--|-------------------|----------------|----------------|--|-------------------|
|         | Σημειακό μοντέλο<br>$\lambda_{sm}$                                 | Αναλυτικό μοντέλο | $\lambda_{sr}$ | $\lambda_{ss}$ |  |                   |
| A3/30   | 16.54  | 17.69             | -              | 40.77          | <b>57.30</b>   | <b>58.46</b>      |
| A4/30   | 15.96  | 15.86             | -              | 40.77          | <b>56.73</b>   | <b>56.63</b>      |
| A3/20   | 12.35  | 12.28             | -              | 40.77          | <b>53.12</b>   | <b>53.05</b>      |
| A4/20   | 11.80  | 11.75             | -              | 40.77          | <b>52.56</b>   | <b>52.52</b>      |
| A3/10   | 8.94   | 9.00              | -              | 40.77          | <b>49.71</b>   | <b>49.77</b>      |
| A4/10   | 8.90   | 8.92              | -              | 40.77          | <b>49.66</b>   | <b>49.69</b>      |
| Σ1      | 1.12   | 1.16              | 4.58           | 40.77          | <b>46.47</b>   | <b>46.51</b>      |

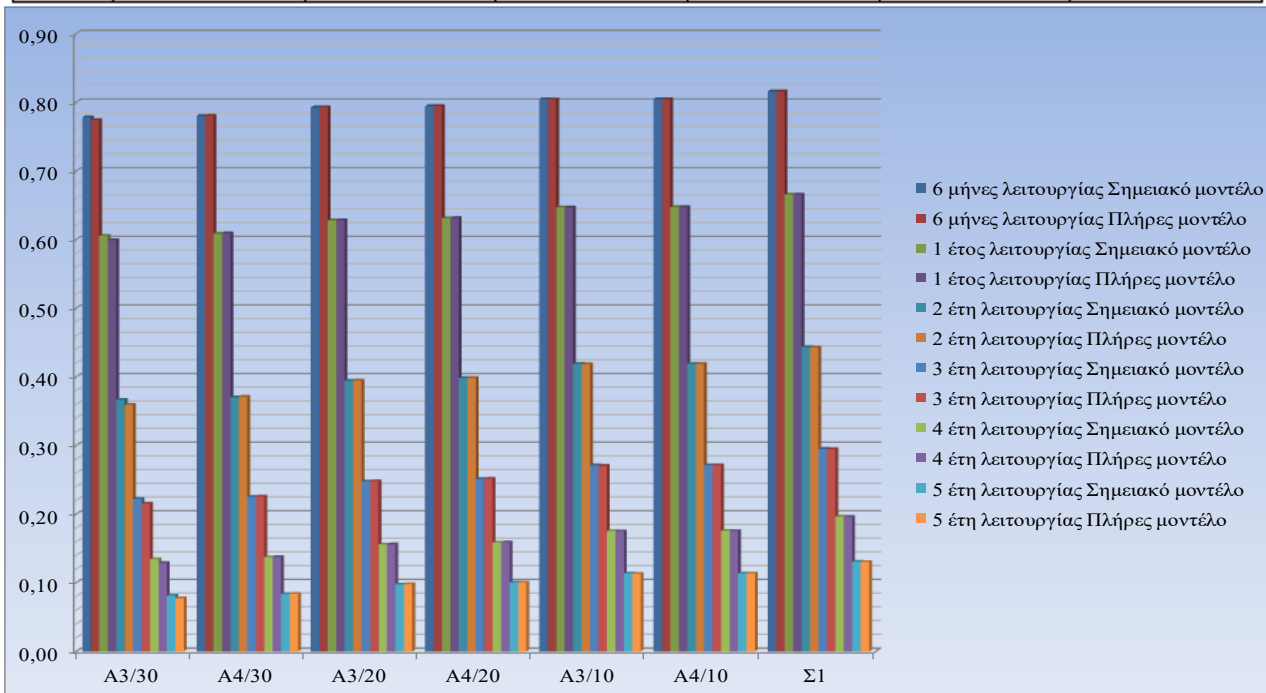
| Σενάριο | Θερμοκρασία περιβάλλοντος λειτουργίας γεννήτριας / αισθητήρα 100 °C |                   |                |                |  |                   |
|---------|---|-------------------|----------------|----------------|--|-------------------|
|         | Σημειακό μοντέλο<br>$\lambda_{sm}$                                  | Αναλυτικό μοντέλο | $\lambda_{sr}$ | $\lambda_{ss}$ | Σημειακό μοντέλο<br>$\lambda_2$<br>(σφάλματα / 10 <sup>6</sup> ώρες) | Αναλυτικό μοντέλο |
| A3/30   | 16.54   | 17.69             | -              | 115.83         | <b>132.36</b>  | <b>133.52</b>     |
| A4/30   | 15.96   | 15.86             | -              | 115.83         | <b>131.79</b>  | <b>131.69</b>     |
| A3/20   | 12.35   | 12.28             | -              | 115.83         | <b>128.18</b>  | <b>128.11</b>     |
| A4/20   | 11.80   | 11.75             | -              | 115.83         | <b>127.62</b>  | <b>127.58</b>     |
| A3/10   | 8.94  | 9.00              | -              | 115.83         | <b>124.77</b>  | <b>124.83</b>     |
| A4/10   | 8.90  | 8.92              | -              | 115.83         | <b>124.73</b>  | <b>124.75</b>     |
| Σ1      | 1.12  | 1.16              | 55.98          | 115.83         | <b>172.93</b>  | <b>172.97</b>     |

# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

## Υπολογισμός της αξιοπιστίας των συστημάτων:

Τιμές αξιοπιστίας ανά σενάριο λειτουργίας, μοντέλο υπολογισμού και χρόνο λειτουργίας του συστήματος, για περιβάλλον λειτουργίας γεννήτριας 75 °C

| Σενάριο | 6 μήνες λειτουργίας |        | 1 έτος λειτουργίας |        | 2 έτη λειτουργίας |        | 3 έτη λειτουργίας |        | 4 έτη λειτουργίας |        | 5 έτη λειτουργίας |        |
|---------|---------------------|--------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|--------|
|         | Σ. Μ.               | Π. Μ.  | Σ. Μ.              | Π. Μ.  | Σ. Μ.             | Π. Μ.  | Σ. Μ.             | Π. Μ.  | Σ. Μ.             | Π. Μ.  | Σ. Μ.             | Π. Μ.  |
| A3/30   | 77.80%              | 77.41% | 60.53%             | 59.92% | 36.64%            | 35.91% | 22.18%            | 21.52% | 13.43%            | 12.89% | 8.13%             | 7.73%  |
| A4/30   | 78.00%              | 78.03% | 60.84%             | 60.89% | 37.01%            | 37.08% | 22.52%            | 22.58% | 13.70%            | 13.75% | 8.34%             | 8.37%  |
| A3/20   | 79.24%              | 79.27% | 62.79%             | 62.83% | 39.43%            | 39.48% | 24.76%            | 24.81% | 15.55%            | 15.59% | 9.76%             | 9.79%  |
| A4/20   | 79.44%              | 79.45% | 63.10%             | 63.12% | 39.82%            | 39.85% | 25.12%            | 25.15% | 15.85%            | 15.88% | 10.00%            | 10.02% |
| A3/10   | 80.44%              | 80.41% | 64.70%             | 64.66% | 41.86%            | 41.81% | 27.08%            | 27.04% | 17.52%            | 17.48% | 11.34%            | 11.30% |
| A4/10   | 80.45%              | 80.44% | 64.72%             | 64.71% | 41.89%            | 41.87% | 27.11%            | 27.10% | 17.55%            | 17.53% | 11.36%            | 11.35% |
| Σ1      | 81.59%              | 81.57% | 66.56%             | 66.53% | 44.30%            | 44.27% | 29.49%            | 29.45% | 19.63%            | 19.60% | 13.06%            | 13.04% |

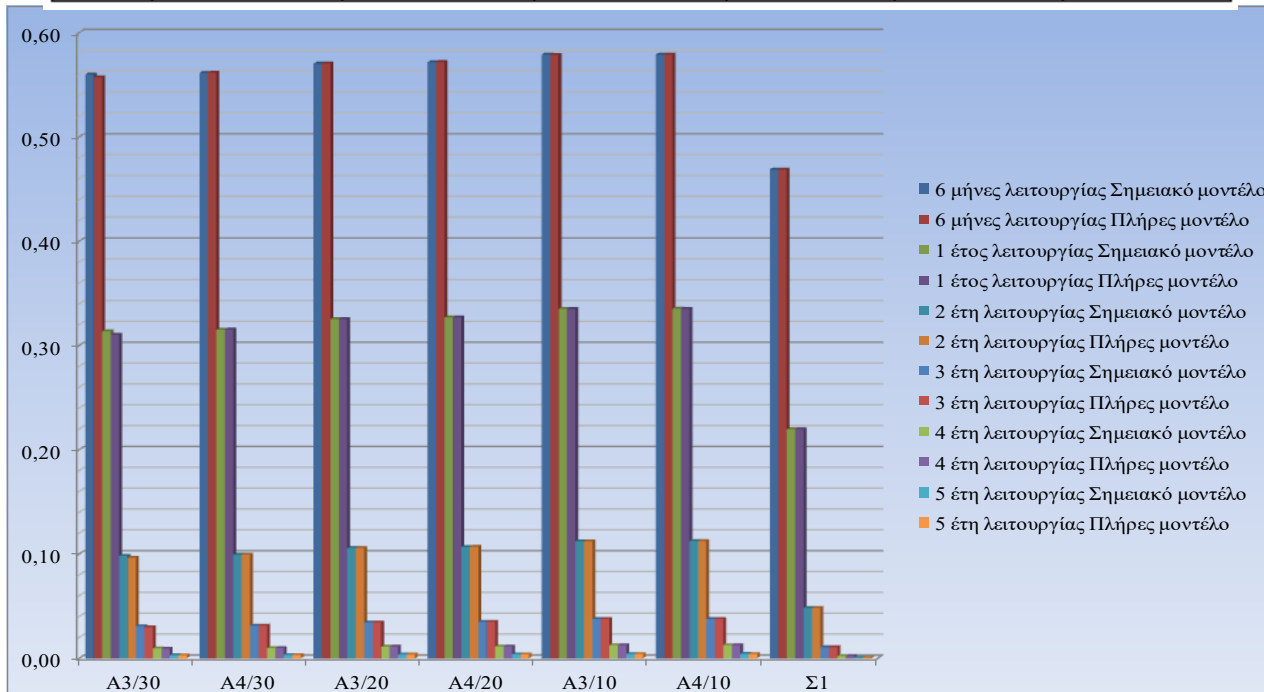


# Ανάλυση της αξιοπιστίας σε διάταξη ενεργού φίλτρου για τη δυναμική ανάκτηση ενέργειας από τα καυσαέρια των αεροσκαφών

## Υπολογισμός της αξιοπιστίας των συστημάτων:

Τιμές αξιοπιστίας ανά σενάριο λειτουργίας, μοντέλο υπολογισμού και χρόνο λειτουργίας του συστήματος, για περιβάλλον λειτουργίας γεννήτριας 100 °C

| Σενάριο | 6 μήνες λειτουργίας |        | 1 έτος λειτουργίας |        | 2 έτη λειτουργίας |        | 3 έτη λειτουργίας |       | 4 έτη λειτουργίας |       | 5 έτη λειτουργίας |       |
|---------|---------------------|--------|--------------------|--------|-------------------|--------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|         | Σ. Μ.               | Π. Μ.  | Σ. Μ.              | Π. Μ.  | Σ. Μ.             | Π. Μ.  | Σ. Μ.             | Π. Μ. | Σ. Μ.             | Π. Μ. | Σ. Μ.             | Π. Μ. |
| A3/30   | 56,00%              | 55,72% | 31,36%             | 31,05% | 9,84%             | 9,64%  | 3,09%             | 2,99% | 0,97%             | 0,93% | 0,30%             | 0,29% |
| A4/30   | 56,14%              | 56,17% | 31,52%             | 31,55% | 9,94%             | 9,95%  | 3,13%             | 3,14% | 0,99%             | 0,99% | 0,31%             | 0,31% |
| A3/20   | 57,04%              | 57,06% | 32,54%             | 32,56% | 10,59%            | 10,60% | 3,44%             | 3,45% | 1,12%             | 1,12% | 0,36%             | 0,37% |
| A4/20   | 57,18%              | 57,19% | 32,69%             | 32,71% | 10,69%            | 10,70% | 3,49%             | 3,50% | 1,14%             | 1,14% | 0,37%             | 0,37% |
| A3/10   | 57,90%              | 57,88% | 33,52%             | 33,50% | 11,24%            | 11,22% | 3,77%             | 3,76% | 1,26%             | 1,26% | 0,42%             | 0,42% |
| A4/10   | 57,91%              | 57,90% | 33,53%             | 33,53% | 11,25%            | 11,24% | 3,77%             | 3,77% | 1,26%             | 1,26% | 0,42%             | 0,42% |
| Σ1      | 46,89%              | 46,88% | 21,98%             | 21,98% | 4,83%             | 4,83%  | 1,06%             | 1,06% | 0,23%             | 0,23% | 0,05%             | 0,05% |



## Συμπεράσματα

- Οι νέες γενεές των αεροσκαφών, πρόκειται να χρησιμοποιούν όλο και περισσότερα συστήματα που θα τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια.
- Οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία θα πρέπει να καλύπτει την απαιτούμενη ισχύ για τη λειτουργία όλων αυτών των συστημάτων, είναι πολύ μεγάλες κι επομένως η χρήση των ηλεκτρονικών διατάξεων ενεργών φίλτρων κρίνεται επιβεβλημένη.
- Η αξιοπιστία όλων των συστημάτων είναι ζωτικής σημασίας, ιδιαίτερα σε εφαρμογές αεροσκαφών. Ως εκ τούτου, η μελέτη της αξιοπιστίας και ιδιαίτερα για συστήματα τα οποία πρόκειται να εφαρμοστούν σε μελλοντικά αεροσκάφη, κρίνεται απαραίτητη.
- Όσον αφορά στα λειτουργικά χαρακτηριστικά και στον βαθμό απόδοσης των δύο συστημάτων, πιο εύρωστο από ενεργειακής απόψεως αποδεικνύεται ότι είναι το σύστημα ανάκτησης ενέργειας με τη χρήση σύγχρονης γεννήτριας.
- Οι απώλειες του συστήματος της ασύγχρονης γεννήτριας είναι ιδιαίτερος υψηλές εξαιτίας της μεγάλης διακοπτικής συχνότητας με την οποία λειτουργεί ο αντιστροφέας αυτού του συστήματος, εν αντιθέσει με το σύστημα της σύγχρονης γεννήτριας.
- Διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας το ημιαγωγικό στοιχείο της μονάδας IGBT που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση είναι η αντιπαράλληλη δίοδος.

## Συμπεράσματα

- Σε χαμηλά επίπεδα ισχύος και για περιβάλλοντα λειτουργίας που δεν είναι ιδιαίτερος απαιτητικά, το σημειακό μοντέλο υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τις θερμοκρασίες των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα.
- Σε περιβάλλοντα όπου οι θερμοκρασίες και γενικά οι συνθήκες που επικρατούν είναι ακραίες, καθώς επίσης και σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος, το σημειακό μοντέλο έχει περιορισμένη ακρίβεια και επομένως ο προσδιορισμός των θερμοκρασιών θα πρέπει να γίνεται με τη χρήση της μεθόδου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.
- Ο αντιστροφέας που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αξιοπιστία είναι αυτός του συστήματος της σύγχρονης γεννήτριας.
- Στην περίπτωση του συνολικού συστήματος (αντιστροφέας, γεννήτρια και αισθητήρας γωνίας θέσης του άξονα) η συμβολή του αντιστροφέα στο συνολικό σύστημα είναι σχετικά μικρή.
- Στην περίπτωση που το περιβάλλον λειτουργίας της γεννήτριας και του αισθητήρα βρίσκεται στους 75°C, το σύστημα της σύγχρονης γεννήτριας έχει υψηλότερη αξιοπιστία.
- Στην περίπτωση των 100°C το σενάριο της ασύγχρονης γεννήτριας έχει τη βέλτιστη αξιοπιστία.



## Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- Μελέτη και εφαρμογή μονάδων IGBT μεγαλύτερης ισχύος, που θα καθιστούν τον αντιστροφέα περισσότερο αξιόπιστο καθώς και διερεύνηση μεθόδων ψύξης των μονάδων
- Διερεύνηση για το ποια τοπολογία αντιστροφέα είναι καταλληλότερη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή
- Ανάλυση της αξιοπιστίας των ηλεκτρικών μηχανών σύμφωνα με το εγχειρίδιο Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, καθώς και διερεύνηση του βέλτιστου σχεδιασμού της ηλεκτρικής γεννήτριας
- Διερεύνηση μεθόδων ψύξης των ηλεκτρικών μηχανών ή μείωσης των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος λειτουργίας τους
- Λεπτομερέστερη ανάλυση της αξιοπιστίας του συνολικού συστήματος ανάκτησης ενέργειας, συμπεριλαμβάνοντας και το LC φίλτρο στην πλευρά Σ.Τ. του αντιστροφέα
- Μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης μονάδων θερμοηλεκτρικής ψύξης για την αύξηση της αξιοπιστίας
- Διεξαγωγή εκτεταμένων πειραματικών δοκιμών για την αξιολόγηση των θερμοκρασιακών υπολογισμών με το σημειακό και με το αναλυτικό μοντέλο

**Ευχαριστώ για την προσοχή σας**