

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΤΟ ΕΘΝΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΣΧΥΟΣ (ΜΙΚΡΟΚΑΛΟΡΙΜΕΤΡΟ)

Γ. Κρικέλας, Α. Χατζόπουλος
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας
Διεύθυνση Ηλεκτρικών Μεγεθών
ΒΙ.ΠΕ.Θ. Σίνδος, 57022, Οικ. Τετ. 45
gkrik@eim.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η υλοποίηση του Εθνικού Προτύπου Ραδιοκυματικής (RF) & Μικροκυματικής (MW) Ισχύος πραγματοποιείται στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας με τη βοήθεια ενός συμμετρικού μικροκαλορίμετρου δίδυμου τύπου. Τα πρότυπα που διακρίβώνονται με την εν λόγω διάταξη είναι διατάξεις θερμίστορ (thermistor mounts) N-τύπου και 3,5 mm, των οποίων μετράται η ενεργός απόδοση (effective efficiency).

Στην προκείμενη εργασία διερευνάται η επίδραση που έχουν διάφοροι παράμετροι του συστήματος στην ακρίβεια της μέτρησης της ενεργού απόδοσης, όπως για παράδειγμα του χρόνου αναμονής για την επίτευξη θερμικής ισορροπίας του συστήματος, του αριθμού των διαδοχικών κύκλων αλλά και του επιπέδου της ισχύος και του συνολικού αριθμού των μετρήσεων των επιμέρους μεγεθών (τάση πόλωσης, τάση στα άκρα των θερμοστοιχείων).

Τα συμπεράσματα κρίνονται ιδιαίτερα ενδιαφέροντα, καθώς στη διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχει ως τώρα κάποια μελέτη που να εξετάζει περιεκτικά την επίδραση που έχουν όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι στην ακρίβεια των μετρήσεων της ενεργού απόδοσης. Ως βάση αναφοράς για επαλήθευση των μετρήσεων χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια διεργασιολογικών αλληλοσυγκρίσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της EUROMET (Ενωσης των Ευρωπαϊκών Εθνικών Ινστιτούτων Μετρολογίας).

Λέξεις- Κλειδιά: Μικροκαλορίμετρο, Θερμίστορ, Παράμετροι, Ενεργός Απόδοση, Διακρίβωση Αισθητήρων Ισχύος

1. Εισαγωγή

Η ισχύς είναι μια από τις σημαντικότερες ποσότητες στη μετρολογία Ραδιοσυχνοτήτων και Μικροκυμάτων (RF & MW), καθώς η παραγωγή ισχύος είναι ιδιαίτερα ακριβή. Το επίπεδο της ισχύος εξόδου ενός συστήματος ή εξαρτήματος αποτελεί συχνά τον πιο κρίσιμο παράγοντα στη σχεδίαση και, εν τέλει, στην αγορά και στην απόδοση σχεδόν όλου του εξοπλισμού RF & MW. Η ιχνηλασιμότητα συνεπώς σε Εθνικά Πρότυπα με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια είναι υψίστης σημασίας, καθώς επιπλέον η ιχνηλασιμότητα αυτής της ποσότητας είναι συχνά προαπαιτούμενο για τη διακρίβωση διαφόρων οργάνων μέτρησης RF & MW, όπως οι παλμογράφοι RF, οι δέκτες και οι αναλυτές φάσματος, τα οποία χρησιμοποιούνται στον έλεγχο ποιότητας σε γραμμές παραγωγής.

Για την υλοποίηση των μονάδων ισχύος σε συχνότητες RF και MW με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια υπάρχουν δύο κύριες, πρακτικά, επιλογές^[1]. Η πρώτη και πιο κοινή μέθοδος στηρίζεται στην αρχή της μικροκαλοριμετρίας υποκατάστασης RF/DC. Η

συνήθης διαδικασία είναι η μετατροπή της ισχύος υψηλής συχνότητας σε θερμότητα σε ένα καλορίμετρο. Στη συνέχεια καθορίζεται η ποσότητα DC ισχύος που απαιτείται για να παραχθεί η ίδια άνοδος θερμοκρασίας με αυτή που προκαλεί η ισχύς υψηλής συχνότητας. Αυτή η DC ισχύς, μετά την εφαρμογή κάποιων διορθώσεων, είναι ίση με την υπό μέτρηση RF ή MW ισχύ. Η δεύτερη, εναλλακτική, προσέγγιση είναι να συναχθεί-σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό- η τιμή της ισχύος από μηχανικές μετρήσεις-οι μέθοδοι αυτοί χαρακτηρίζονται ως *απόλυτες μέθοδοι*, οι οποίες πάντως είναι λιγότερο ακριβείς, και χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά.

Τα *καλορίμετρα* είναι όργανα ή διατάξεις μέτρησης θερμότητας. Αποτελούν τη βάση της συντριπτικής πλειοψηφίας των προτύπων ισχύος RF & MW και, επιπρόσθετα, κάποιοι τύποι βρίσκουν χρήση και ως δευτερεύοντα πρότυπα. Οι τρεις κυριότερες παραλλαγές που βρίσκονται σε χρήση σήμερα είναι^[1]: i) το *καλορίμετρο ξηρού φορτίου* (dry load calorimeter), ii) το *μικροκαλορίμετρο* και iii) το *καλορίμετρο ροής* (flow calorimeter), αν και ο τελευταίος τύπος τείνει να χρησιμοποιείται όλο και λιγότερο. Τα καλορίμετρα που χρησιμοποιούνται ως Πρωτεύοντα Πρότυπα Ισχύος στα Εθνικά Ινστιτούτα Μετρολογίας είναι ο τύπος του μικροκαλορίμετρου και του καλορίμετρου ξηρού φορτίου. Στα μικροκαλορίμετρα μετρείται η ενεργός απόδοση ενός εισαχθέντος *βολομέτρου*, το οποίο λειτουργεί ως το φορτίο του μικροκαλορίμετρου. Μετά τη διακρίβωσή του, αυτό το βολόμετρο χρησιμοποιείται ως Δευτερεύον Πρότυπο για μετρήσεις ισχύος.

Καθώς ο σχεδιασμός ενός μικροκαλορίμετρου^[2] που να είναι τελείως ανεπηρέαστο από την κατανομή θερμότητας είναι αδύνατος, η βέλτιστη λύση είναι η κατασκευή μιας διάταξης με γνωστούς συντελεστές διόρθωσης. Αυτοί οι συντελεστές υπολογίζονται από ένα συνδυασμό βοηθητικών μετρήσεων και υπολογισμών. Μπορούν να συγκεντρωθούν σε μια μοναδική παράμετρο, την ενεργό απόδοση, η οποία ορίζεται ως:

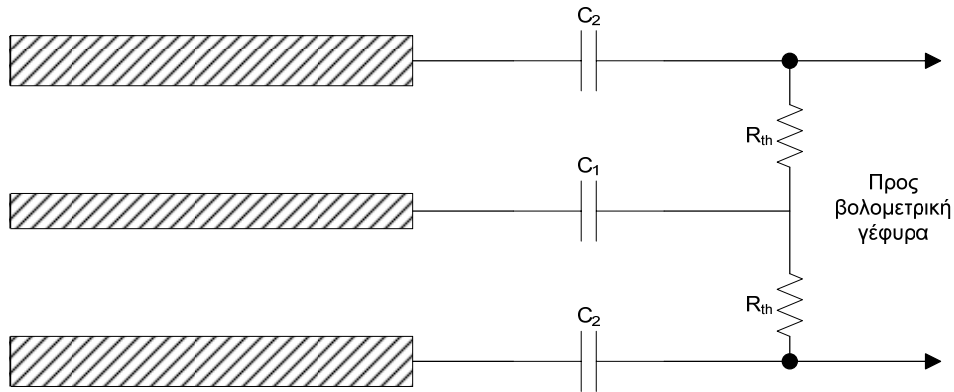
$$\text{Ενεργός απόδοση} = \frac{\text{Υποκαθιστώμενη DC ισχύς}}{\text{Ισχύς RF/MW διαχεόμενη στο βολόμετρο}} \quad (1.1)$$

Γενικά, η ενεργός απόδοση είναι μια πιο βολική ποσότητα για να τη χειριστεί κάποιος, σε σχέση με την RF/MW ισχύ: είναι σχετικά σταθερή παράμετρος, για τα περισσότερα όργανα και, καθώς είναι αδιάστατη, είναι ανεξάρτητη από το σύστημα μονάδων που θα χρησιμοποιηθεί και από τη μέθοδο υλοποίησης αυτών των μονάδων. Για τα πιο ακριβή καλοριμετρικά πρωτεύοντα πρότυπα, η ενεργός απόδοση μπορεί να υπολογιστεί με μια διευρυμένη αβεβαιότητα, χονδρικά, 0,15 % για συχνότητες έως 10 GHz, 0,3% έως 40 GHz και 1,5% μεταξύ 100 και 178 GHz^[4].

2. Αρχή λειτουργίας Πρωτεύοντος Προτύπου Ισχύος του EIM

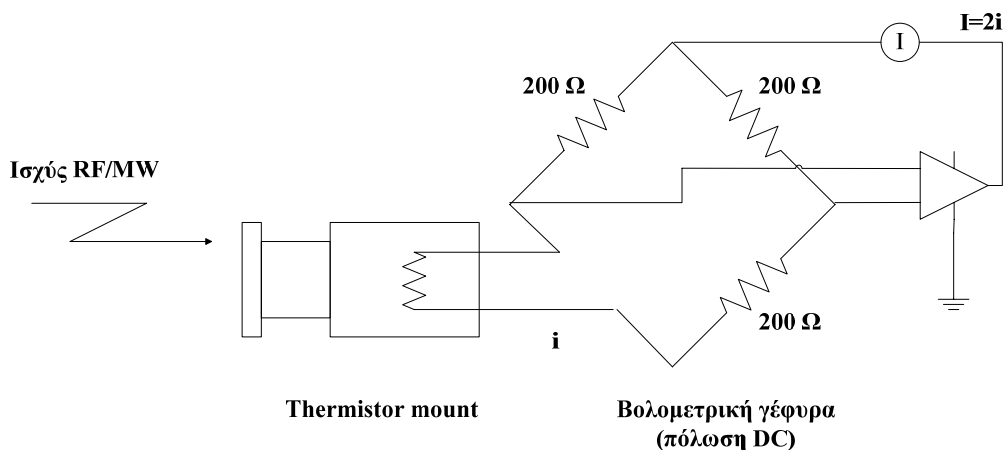
Στο Εργαστήριο Υψηλών Συχνοτήτων του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας ως Πρωτεύον Πρότυπο RF & MW Ισχύος χρησιμοποιείται μια μικροκαλοριμετρική διάταξη, δίδυμου φορτίου, όπου ένα από τα φορτία λειτουργεί ως απορροφητής και το άλλο ως θερμοκρασιακή αναφορά (η διάταξη αυτή αναπτύχθηκε από το BNM-LCIE, βασισμένη σε αντίστοιχες διατάξεις που χρησιμοποιεί το Γαλλικό Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας και προσαρμοσμένη στις ανάγκες του EIM)^[5]. Η μέθοδος αυτή είναι ο πιο ακριβής τρόπος για τη μέτρηση της ενεργού απόδοσης βολομετρικών αισθητήρων ισχύος. Το Πρωτεύον Πρότυπο Ισχύος του EIM είναι εφοδιασμένο με δύο μικροκαλοριμετρικές κεφαλές: μία που επιτρέπει τη χρήση βολομέτρων με συνδετήρες N-τύπου (συχνοτική περιοχή: 10 MHz-18 GHz) και μία που επιτρέπει τη χρήση βολομέτρων με συνδετήρες τύπου 3,5mm (συχνοτική περιοχή: 10 MHz-26,5 GHz).

Τα πρότυπα ισχύος είναι βολόμετρα (bolometer mounts)^{[2],[3]}. Αποτελούνται συνήθως από θερμοαντιστάσεις με μια αρνητική θερμοκρασιακή εξάρτηση. Αυτά τα στοιχεία μπορεί επίσης να είναι θερμοζεύγη ή λεπτή μεμβράνη υλικού, οπότε στην περίπτωση αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση μπορεί να είναι θετική. Το σχήμα ενός βολομέτρου παρουσιάζεται στο Σχ. 1. Οι αντιστάσεις R_{th} αντιπροσωπεύουν το ωμικό (αντιστατικό) στοιχείο, οι πυκνωτές επιτρέπουν την απομόνωση του DC κυκλώματος πόλωσης (βολομετρική γέφυρα) από το RF/MW κύκλωμα (ομοαξονική γραμμή). Στο EIM χρησιμοποιούνται thermistor mounts (θερμοαντιστάσεις) τόσο με αρνητική όσο και με θετική θερμοκρασιακή εξάρτηση.



Σχ. 1: Σχηματικό διάγραμμα ενός βολομέτρου

Η ενεργός απόδοση (Εξ. 1.1) είναι η αναγωγή της RF/MW ισχύος σε DC ισχύ: Το αντιστατικό στοιχείο εισάγεται σε μια αυτό-ισοροπούμενη DC γέφυρα που λειτουργεί όπως μια γέφυρα Wheatstone. Η γέφυρα διατηρεί την αντίσταση του στοιχείου σταθερή, γενικά στα 200 Ω (ή στα 100 Ω, ανάλογα με τον τύπο του βολομέτρου). Το DC ρεύμα πόλωσης μειώνεται αυτόματα κατά την εφαρμογή RF ισχύος. Στο Σχ. 2 δίνεται το διάγραμμα του βολομέτρου και της γέφυρας^[2].



Σχ. 2: Βολομετρική γέφυρα και thermistor mount

Η αντικαθιστώμενη DC ισχύς είναι η διαφορά της DC ισχύος που ανιχνεύεται από την εσωτερική αντίσταση της βολομετρικής γέφυρας μεταξύ δύο κύκλων με και χωρίς RF/MW ισχύ. Η ενεργός απόδοση ενός ιδανικού βολομέτρου θα ήταν ίση με 1. Η ενεργός απόδοση όμως λαμβάνει υπόψη τη διαφορετική συμπεριφορά του βολομέτρου στην περίπτωση που εφαρμόζεται ή όχι RF/MW ισχύς. Σε υψηλότερες συχνότητες οι απώλειες, το επιδερμικό φαινόμενο και η προσαρμογή είναι σημαντικότερες, συνεπώς η τιμή της ενεργού απόδοσης είναι γενικά διαφορετική της μονάδας.

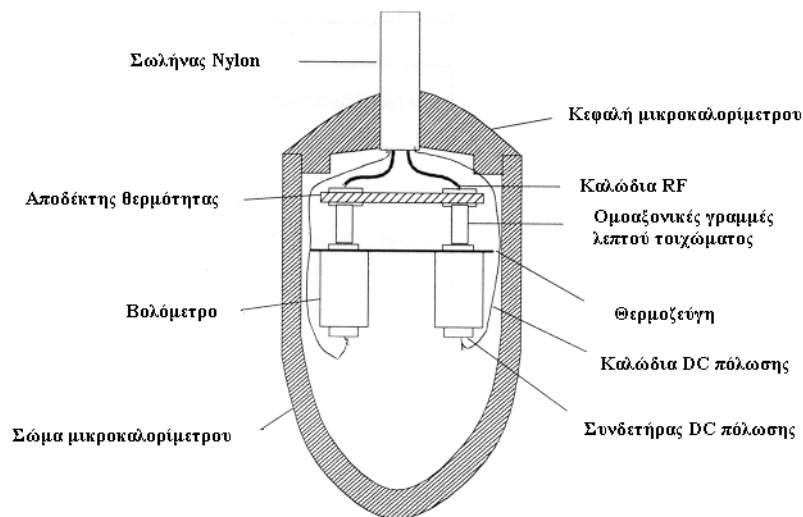
Η ενεργός απόδοση λαμβάνει υπόψη την ισχύ που διαχέεται μέσα στο βολόμετρο. Για να πάρουμε την ισχύ που προσπίπτει στο επίπεδο αναφοράς του βολομέτρου (τον συνδετήρα) χρησιμοποιούμε το συντελεστή διακρίβωσης (calibration factor) K . Ο συντελεστής διακρίβωσης, ο οποίος χρησιμοποιείται στην πράξη για τη μέτρηση της ισχύος, ορίζεται ως εξής:

$$K = \frac{\text{Υποκαθιστώμενη DC ισχύς}}{\text{RF/MW ισχύς προσπίπτουσα στο επίπεδο αναφοράς του βολομέτρου}} \quad (2.1)$$

Ο συντελεστής διακρίβωσης υπολογίζεται απλά από τη μέτρηση της ενεργού απόδοσης και του συντελεστή ανάκλασης του βολομέτρου:

$$K = \eta \cdot (1 - \Gamma^2) \quad (2.2)$$

Η μέτρηση της ενεργού απόδοσης στο μικροκαλορίμετρο του EIM βασίζεται στη μέτρηση της θερμοκρασιακής διαφοράς που εμφανίζεται όταν ισχύς RF/MW εφαρμόζεται ή όχι στο βολόμετρο. Το θερμοκρασιακό βήμα που παρατηρείται οφείλεται στη διαφορετική συμπεριφορά του DC και του RF/MW ρεύματος στο βολόμετρο, μεταξύ ενός κύκλου με και χωρίς RF/MW ισχύς. Οι απώλειες, τα στάσιμα κύματα και το επιδερμικό φαινόμενο συνεισφέρουν στη θέρμανση του βολομέτρου. Στο Σχ. 3 φαίνεται το διάγραμμα της κεφαλής του συμμετρικού μικροκαλορίμετρου του EIM:



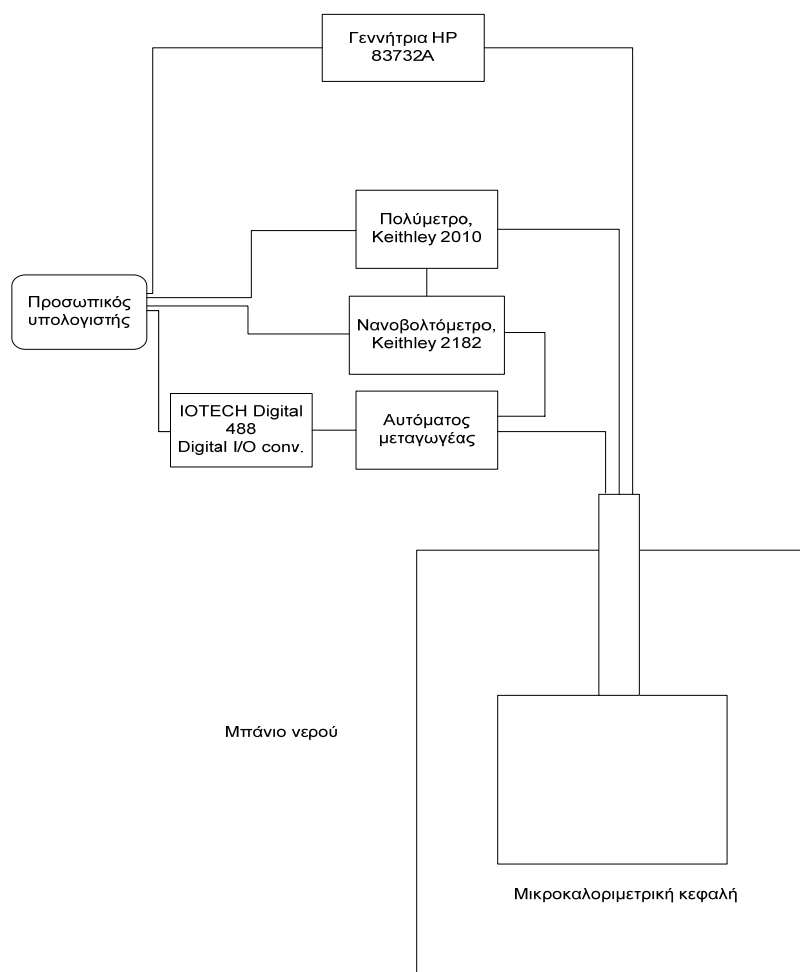
Σχ. 3: Κεφαλή συμμετρικού ομοαξονικού μικροκαλορίμετρου

Η συμμετρική σχεδίαση της κεφαλής αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της μεταβολής της εξωτερικής θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Δύο βολόμετρα είναι συνδεδεμένα: το ένα δεν είναι πολωμένο και λειτουργεί ως θερμοκρασιακή αναφορά ενώ το δεύτερο, η συσκευή υπό έλεγχο, πολώνεται από τη βολομετρική γέφυρα και εφαρμόζονται διαδοχικά σε αυτό κύκλοι με και χωρίς RF/MW ισχύ. Ο αποδέκτης

θερμότητας (*heat sink*) αποτελείται από μια σχετικά μεγάλη χάλκινη πλάκα η οποία λειτουργεί ως θερμικό shunt πριν από τις ομοαξονικές γραμμές λεπτού τοιχώματος. Οι δύο ομοαξονικές γραμμές χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν την RF/MW ισχύ στο βολόμετρο.

Οι ομοαξονικές γραμμές λεπτού τοιχώματος είναι σχεδιασμένες να έχουν κακή θερμική αγωγιμότητα και καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Χρησιμοποιούνται για τη θερμική μόνωση των βολομέτρων ώστε η άνοδος της θερμοκρασίας να περιοριστεί στα θερμοζεύγη. Το υλικό των ομοαξονικών γραμμών είναι Νικέλιο-Χρώμιο. Για να εξασφαλιστεί καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα (μικρές απώλειες), υπάρχει ένα λεπτό στρώμα χρυσού στους εσωτερικούς και εξωτερικούς αγωγούς των γραμμών.

Η μέτρηση της διαφοράς θερμοκρασίας πραγματοποιείται από πολλά θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντίνης. Αυτά τα θερμοζεύγη αποτελούνται από το άθροισμα πολλών επαφών Cu-Co, συνδεδεμένων παράλληλα. Ο συντελεστής Seebeck μιας επαφής Cu-Co είναι $51 \mu\text{V/K}$ και ο αριθμός των επαφών είναι 50, συνεπώς η ευαισθησία ενός θερμοζεύγους είναι περίπου $2,55 \text{ mV/K}$. Η αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ δύο διαδοχικών κύκλων είναι μόνο μερικά mK. Το μικροκαλορίμετρο είναι βυθισμένο σε ένα μπάνιο που περιέχει περίπου 400 λίτρα νερού και επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των εξωτερικών μεταβολών θερμοκρασίας. Στο Σχ. 4 δίνεται μια από τις υλοποιήσεις της συνολικής διάταξης μέτρησης της ενεργού απόδοσης με τη χρήση του μικροκαλορίμετρου.



Σχ. 4: Παράδειγμα υλοποίησης πειραματικής διάταξης μέτρησης ενεργού απόδοσης βολομέτρων με τη χρήση μικροκαλορίμετρου

Έστω τώρα P_1 η DC ισχύς πόλωσης *χωρίς* και P_2 με RF/MW ισχύ. Αν P και P' η συνολική ισχύς στο βολόμετρο κατά τη διάρκεια, αντίστοιχα, ενός κύκλου *χωρίς* και ενός με RF/MW ισχύ, θα έχουμε:

$$P = P_1 \quad (2.3\alpha)$$

$$P' = P_2 + P_{RF} \quad (2.3\beta)$$

$$\text{Συνεπώς:} \quad \eta = \frac{P_1 - P_2}{P_{RF}} \Rightarrow P' = P_2 + \frac{P_1 - P_2}{\eta} \quad (2.4)$$

Η θέρμανση του βολομέτρου είναι αντίστοιχη με την εφαρμοζόμενη ισχύ: για ένα κύκλο *χωρίς* RF/MW ισχύ, θα έχουμε $\Delta T_1 = kP = kP_1$ και για έναν με RF/MW ισχύ $\Delta T_2 = kP'$. Ο παράγοντας k εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες του συστήματος. Ο συντελεστής απόδοσης επομένως μπορεί να ξαναγραφεί ως εξής:

$$\eta = \frac{P_1 - P_2}{P' - P_2} = \frac{P_1 - P_2}{\frac{\Delta T_2}{k} - P_2} = \frac{P_1 - P_2}{\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} P_1 - P_2} \Rightarrow \eta = \frac{1}{1 + \frac{P_1}{P_1 - P_2} \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\Delta T_1}} \quad (2.5)$$

V_i είναι οι DC τάσεις πόλωσης της βολομετρικής γέφυρας (όπως μετρούνται με το ψηφιακό πολύμετρο) και E_i οι ηλεκτρεγερτικές τάσεις (emf) των θερμοστοιχείων (όπως μετρούνται με το νανοβολτόμετρο). Οι ισχύεις P_i είναι ανάλογες με το τετράγωνο της DC τάσης πόλωσης ($P_i = \frac{V_i^2}{R}$) και η θέρμανση ΔT_i ανάλογη με την ηλεκτρεγερτική δύναμη των θερμοζευγών ($\Delta T_i = \alpha E_i$). Οπότε τελικά ο *ανεπεξέργαστος συντελεστής απόδοσης* μπορεί να δοθεί συναρτήσει των μετρούμενων τάσεων V_i και E_i :

$$\eta_b = \frac{1}{1 + \frac{V_1^2}{V_1^2 - V_2^2} \frac{E_2 - E_1}{E_1}} \quad (2.6)$$

(οι δείκτες 1 και 2 αφορούν κύκλους *χωρίς* και με RF/MW ισχύ)

Η τιμή του συντελεστή ενεργού απόδοσης πρέπει να διορθωθεί λόγω της απώλειας ισχύος της ομοαξονικής γραμμής λεπτού τοιχώματος που συμβάλλει στην άνοδο της θερμοκρασίας του βολομέτρου. Για μικρές απώλειες μπορεί να θεωρηθεί ότι μόνο η μισή από την απώλεια ισχύος στην ομοαξονική γραμμή συνεισφέρει στη θέρμανση των θερμοστοιχείων. Αν A η εξασθένηση της ομοαξονικής σε dB, ο διορθωμένος συντελεστής ενεργού απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta_c = \eta \cdot (1 + 0,115A) \quad (2.7)$$

3. Υπολογισμός αβεβαιότητας

Από τη σχέση που δίνει τον *ανεπεξέργαστο* συντελεστή απόδοσης (2.6), βρίσκουμε τη διακύμανσή του:

$$u^2(\eta_b) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial X_i} \right)^2 u^2(X_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial X_j} \right) u_k(X_i, X_j) \quad (3.1)$$

όπου X_i οι μετρούμενες τάσεις.

Υποθέτουμε ότι οι τάσεις αυτές είναι μη-συσχετιζόμενες (non-correlated) οπότε η διακύμανση θα δίνεται από τη σχέση:

$$u^2(\eta_b) = \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial E_1}\right)^2 u^2(E_1) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial E_2}\right)^2 u^2(E_2) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial V_1}\right)^2 u^2(V_1) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial V_2}\right)^2 u^2(V_2) \quad (3.2)$$

με:

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial E_1} = -\frac{\eta_b(\eta_b - 1)}{E_2 - E_1} \frac{E_2}{E_1} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial E_2} = \frac{\eta_b(\eta_b - 1)}{E_2 - E_1} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial V_1} = \frac{\eta_b(\eta_b - 1)}{V_1^2 - V_2^2} \frac{2V_2^2}{V_1} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial V_2} = -\frac{\eta_b(\eta_b - 1)}{V_1^2 - V_2^2} 2V_2 \quad (3.6)$$

Η αβεβαιότητα τύπου Α στον ανεπεξέργαστο συντελεστή απόδοσης θα είναι:

$$u_A^2(\eta_b) = \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial E_1}\right)^2 u_A^2(E_1) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial E_2}\right)^2 u_A^2(E_2) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial V_1}\right)^2 u_A^2(V_1) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial V_2}\right)^2 u_A^2(V_2) \quad (3.7)$$

όπου οι αβεβαιότητες $u_A(E_i)$ και $u_A(V_i)$ θα υπολογιστούν στατιστικά.

Η αβεβαιότητα τύπου Β στον ανεπεξέργαστο συντελεστή απόδοσης θα είναι:

$$u_B^2(\eta_b) = \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial E_1}\right)^2 u_B^2(E_1) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial E_2}\right)^2 u_B^2(E_2) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial V_1}\right)^2 u_B^2(V_1) + \left(\frac{\partial \eta_b}{\partial V_2}\right)^2 u_B^2(V_2) + \sum_i BL_i^2 \quad (3.8)$$

όπου οι αβεβαιότητες $u_B(E_i)$ και $u_B(V_i)$ προέρχονται από τα πιστοποιητικά διακρίβωσης του νανοβολτόμετρου και του βολτόμετρου. Με $\sum_i BL_i^2$ συμβολίζεται η συνεισφορά όλων των άλλων αβεβαιοτήτων.

Στο ΕΙΜ, χρησιμοποιείται η μέση τιμή της ολισθαίνουσας (*sliding*) μέσης τιμής των ανεπεξέργαστων συντελεστών απόδοσης. Για Ν κύκλους, με και χωρίς RF ισχύ, έχουμε Ν-1 τιμές του ανεπεξέργαστου συντελεστή απόδοσης, η_{b_i} , ή Ν-2 τιμές του ολισθαίνοντος συντελεστή απόδοσης.

Η ολισθαίνουσα μέση τιμή είναι ίση με:

$$\eta_{b_i}^s = \frac{\eta_{b_i} + \eta_{b_{i-1}}}{2}, \quad i=3 \text{ ως } N \quad (3.9)$$

Η μέση τιμή της ολισθαίνουσας μέσης τιμής είναι:

$$\bar{\eta}_b^s = \frac{1}{N-2} \sum_{i=3}^N \eta_{b_i}^s \quad (3.10)$$

και η τυπική αβεβαιότητα της ολισθαίνουσας μέσης τιμής:

$$u_A(\bar{\eta}_b^s) = \sqrt{\frac{1}{N-3} \sum_{i=3}^N (\eta_{b_i}^s - \bar{\eta}_b^s)^2} \quad (3.11)$$

οπότε αν προσθέσουμε τις αβεβαιότητες τύπου B παίρνουμε:

$$u_A(\bar{\eta}_b) = \sqrt{u_A^2(\bar{\eta}_b^s) + u_B^2(\eta_b) + \sum_i BL_i^2} \quad (3.12)$$

Ο διορθωμένος (corrected) συντελεστής απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = (1 + 0,115A)\eta_b \quad (3.13)$$

όπου η_b είναι ο μη-επεξεργασμένος συντελεστής απόδοσης και A η εξασθένιση της ομοαξονικής γραμμής λεπτού τοιχώματος (thin wall coaxial line) σε dB.

Άρα:

$$u^2(\eta) = \left(\frac{\partial \eta}{\partial \eta_b} \right) u^2(\eta_b) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial A} \right) u^2(A) \quad (3.14)$$

$$\text{όπου } \frac{\partial \eta}{\partial \eta_b} = 1 + 0,115A \text{ και } \frac{\partial \eta}{\partial A} = 0,115\eta_b$$

Στην αβεβαιότητα αυτή, που προέρχεται από την αβεβαιότητα μέτρησης των η_b και A, πρέπει να προσθέσουμε έναν όρο αβεβαιότητας τύπου B (BL), που οφείλεται στην υπόθεση ότι η μισή από την απώλεια ισχύος στην ομοαξονική γραμμή λεπτού τοιχώματος αυξάνει τη θέρμανση των θερμοζευγών.

Η τελική αβεβαιότητα θα είναι:

$$u^2(\eta) = \left(\frac{\partial \eta}{\partial \eta_b} \right) u^2(\eta_b) + \left(\frac{\partial \eta}{\partial A} \right) u^2(A) + BL^2 \quad (3.15)$$

4. Μεταβολή παραμέτρων

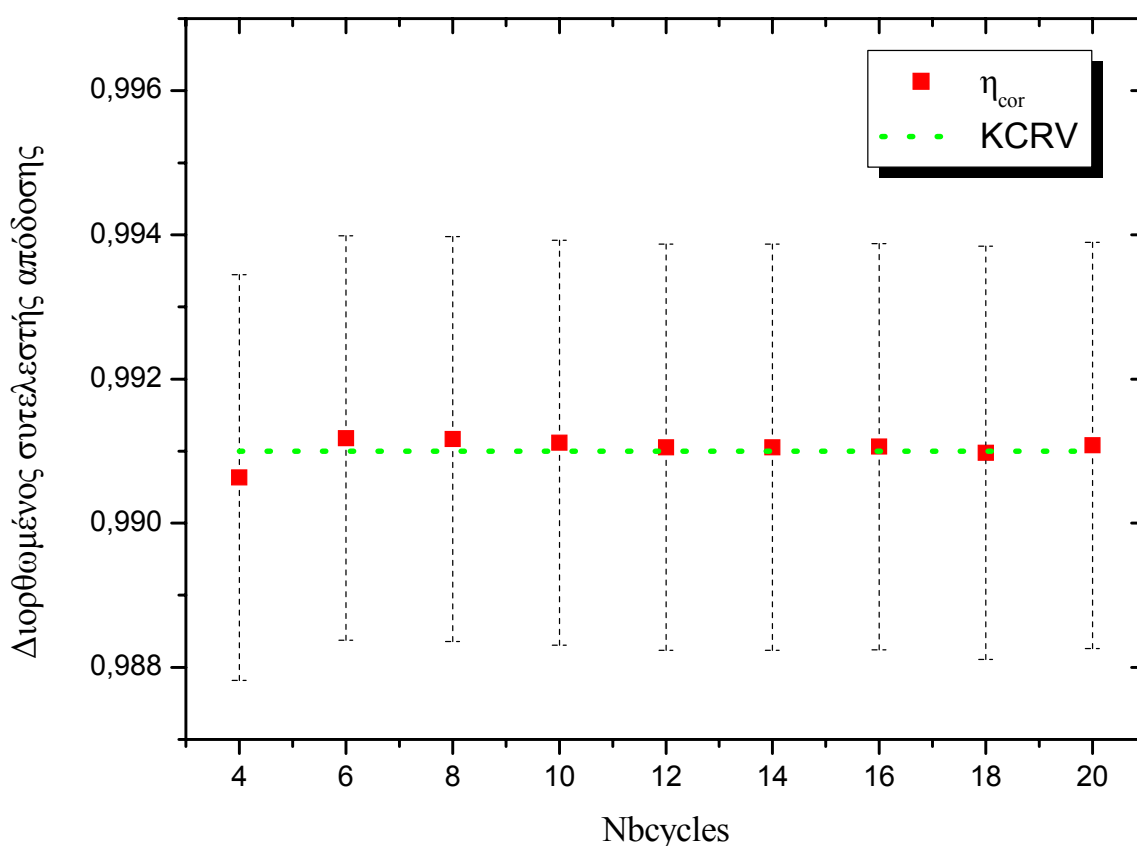
Δεδομένου ότι οι μετρήσεις της ενεργού απόδοσης με το Εθνικό Πρότυπο Ισχύος είναι εξαιρετικά χρονοβόρες, κρίθηκε σκόπιμη μια διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος, που επηρεάζουν τον απαιτούμενο χρόνο, στην ακρίβεια της μέτρησης. Η διερεύνηση αυτή κρίθηκε σκόπιμη, καθώς στη διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχει σχετική συστηματική μελέτη.

Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν αρχικά να ελεγχθούν ήταν: α) ο αριθμός των διαδοχικών κύκλων με και χωρίς RF/MW ισχύ, β) ο χρόνος αναμονής για την επίτευξη θερμικής ισορροπίας, γ) ο αριθμός μετρήσεων των επιμέρους παραμέτρων και δ) το επίπεδο της προσπίπτουσας ισχύος. Χρησιμοποιήθηκε η μικροκαλοριμετρική κεφαλή που επιτρέπει τη χρήση βολομέτρων (συνδετήρες N-τύπου). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υψηλών Συχνοτήτων του ΕΙΜ, υπό ελεγχόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, και διήρκεσαν για χρονικό διάστημα περίπου δύο μηνών.

Η πρώτη παράμετρος που ελέγχθηκε, ήταν ο συνολικός αριθμός κύκλων (Nbcycles) με και χωρίς RF/MW ισχύ. Στο Διαγρ. 1 απεικονίζεται η μεταβολή του

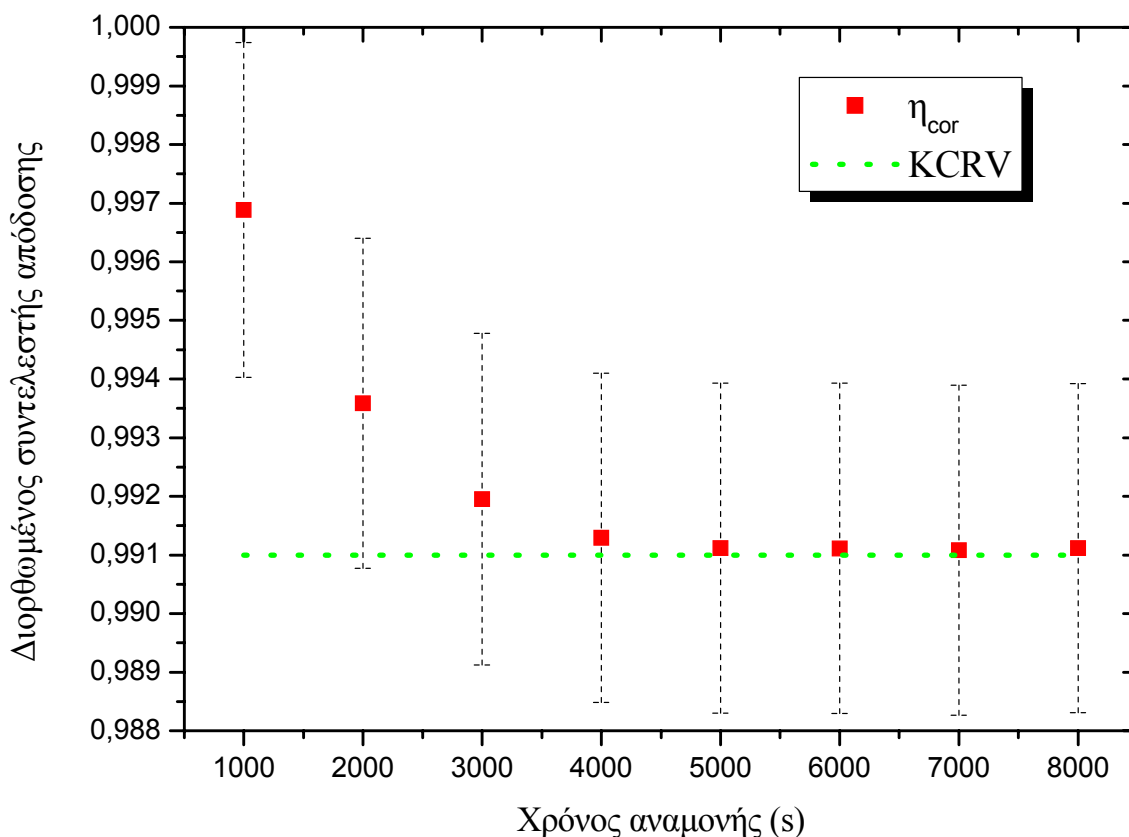
διορθωμένου συντελεστή απόδοσης, ως προς τη μεταβολή του Nbcycles. Ως επίπεδο αναφοράς στο διάγραμμα αυτό (καθώς και στα υπόλοιπα διαγράμματα μεταβολών) έχει χρησιμοποιηθεί η Τιμή Αναφοράς Σύγκρισης-Κλειδιού (KCRV: Key Comparison Reference Value), δηλ. η σταθμισμένη τιμή αναφοράς του διορθωμένου συντελεστή απόδοσης, στο 1 GHz που προέκυψε κατά τη διεργαστηριακή σύγκριση EUROMET 874, στην οποία συμμετείχε το E.I.M. και στην οποία ως Πρότυπο Μεταφοράς (Travelling Standard) χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο thermistor mount (HP 8478B, S/N: 3318A25428), με συνδετήρες N-τύπου, του οποίου η συμπεριφορά μελετάται και στο παρόν άρθρο.

Αυτό που μπορούμε να διαπιστώσουμε από το Διαγρ. 1, είναι ότι για αριθμό κύκλων $Nbcycles \geq 10$, και ειδικότερα για $Nbcycles \geq 12$, η τιμή της η_{cor} σχεδόν ταυτίζεται με την KCRV, συνεπώς μπορούμε με ασφάλεια να επιλέξουμε αριθμό κύκλων $Nbcycles=12$ κι όχι μεγαλύτερο, χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια των μετρήσεών μας.



Διαγρ. 1: Μεταβολή του διορθωμένου συντελεστή ενεργού απόδοσης συναρτήσει του αριθμού κύκλων (Nbcycles)

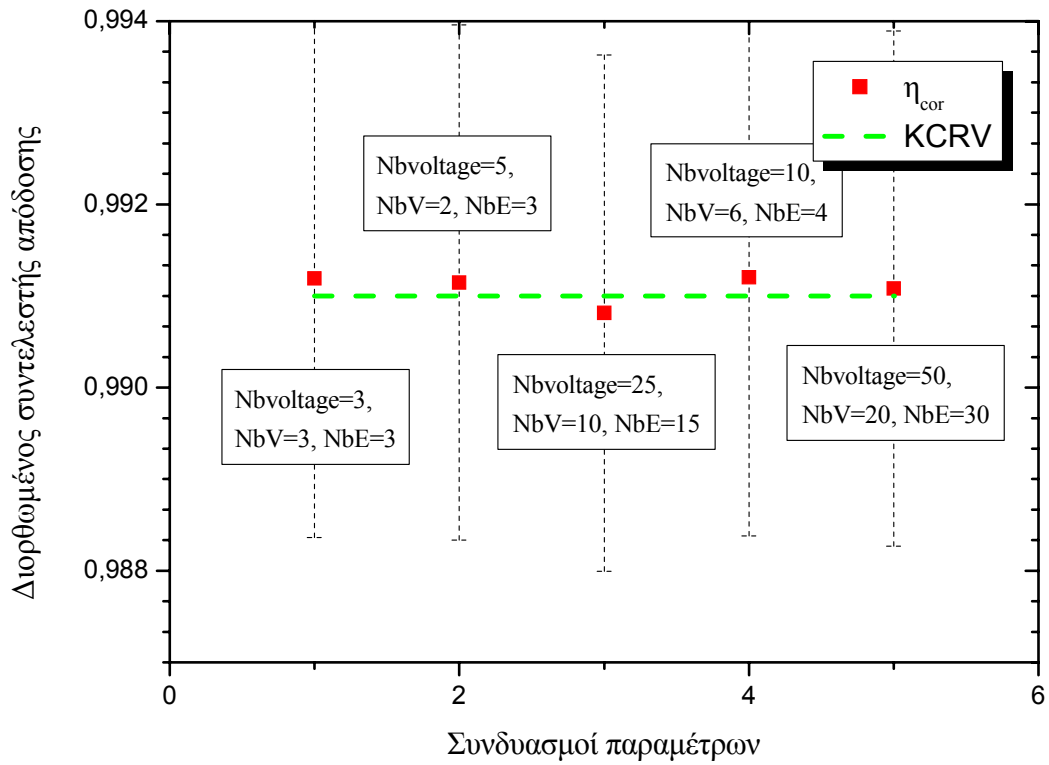
Στο Διαγρ. 2 απεικονίζεται η μεταβολή του διορθωμένου συντελεστή απόδοσης, ως προς τη μεταβολή του χρόνου αναμονής, t_{av} , για την επίτευξη θερμικής ισοροπίας. Από το διάγραμμα αυτό καθίσταται προφανές ότι ο χρόνος αναμονής είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την ακρίβεια των μετρήσεων. Για χρόνους αναμονής μικρότερους από 4000 s έχουμε αρκετά σημαντικές αποκλίσεις από την KCRV. Παρατηρούμε όμως ότι για $t_{av} \geq 5000$ s, οι τιμές που παίρνουμε για το διορθωμένο συντελεστή ενεργού απόδοσης συγκλίνουν, με καλή προσέγγιση, στη σταθμισμένη τιμή αναφοράς (KCRV) της προαναφερθείσας διεργαστηριακής. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τιμές του χρόνου αναμονής στο διάστημα $5000 \text{ s} \leq t_{av} \leq 8000 \text{ s}$, χωρίς να χάσουμε κάτι από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας.



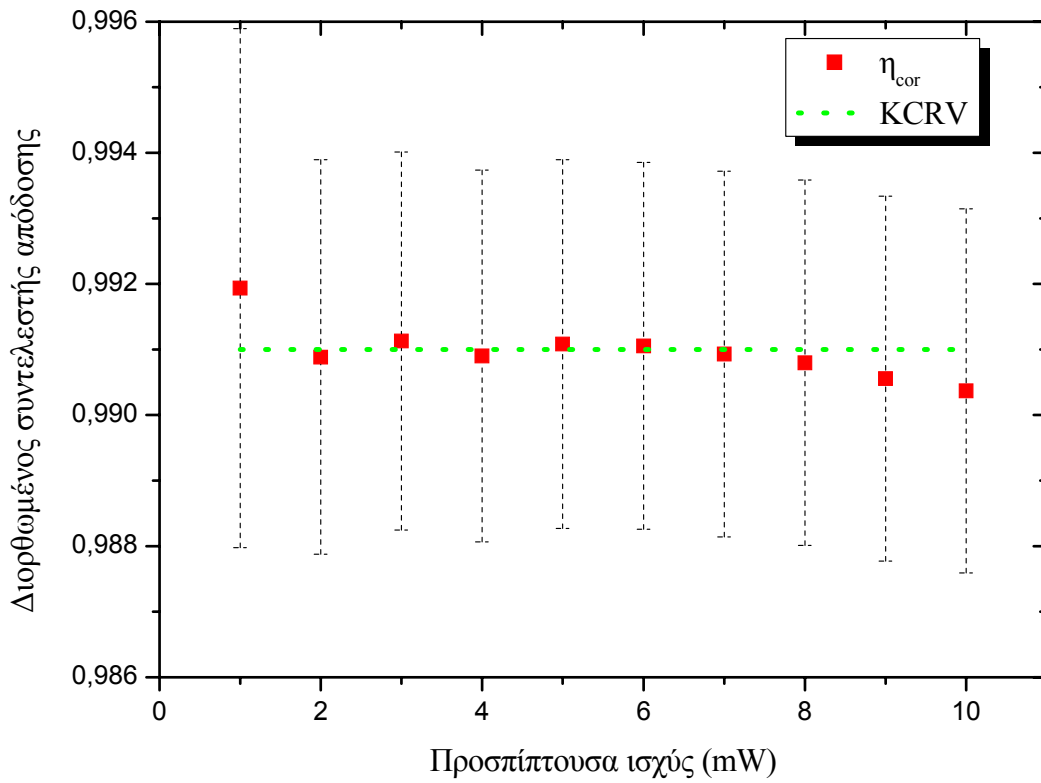
Διαγρ. 2: Μεταβολή του διορθωμένου συντελεστή ενεργού απόδοσης συναρτήσει του χρόνου αναμονής

Υπάρχουν επίσης οι παράμετροι *επίκτησης δεδομένων* NbVoltage, NbV και NbE, που καθορίζουν το συνολικό αριθμό μετρήσεων: NbE είναι το σύνολο των μετρήσεων του νανοβολτομέτρου κατά τη διάρκεια ενός «βρόχου» μετρήσεων με το νανοβολτόμετρο, από το οποίο θα προκύψει μια «ενδιάμεση μέση τιμή νανοβολτομέτρου» και NbV είναι το σύνολο των μετρήσεων του πολυμέτρου κατά τη διάρκεια ενός «βρόχου» μετρήσεων με το πολύμετρο, από το οποίο θα προκύψει μια «ενδιάμεση μέση τιμή πολυμέτρου». Οι μέσες αυτές τιμές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να υπολογιστεί η «τελική μέση τιμή νανοβολτομέτρου» και η «τελική μέση τιμή πολυμέτρου», για ένα συνολικό αριθμό «ενδιάμεσων μέσων τιμών» ίσων με NbVoltage. Συνολικά δηλ. θα έχουμε NbVoltage \times NbE μετρήσεις της τάσης στα άκρα των θερμοζευγών και NbVoltage \times NbE μετρήσεις της DC τάσης πόλωσης του thermistor mount.

Στο Διαγρ. 3 δίνονται τιμές του διορθωμένου συντελεστή ενεργού απόδοσης για διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων NbVoltage, NbV και NbE. Από τη μελέτη αυτού του διαγράμματος, καθίσταται προφανές ότι η επίδραση που έχουν οι τιμές αυτών των παραμέτρων, καθώς και οι διαφορετικοί συνδυασμοί τους, δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική (ωστόσο είναι σαφές ότι η τιμή που προσεγγίζει περισσότερο από όλες την KCRV είναι αυτή με το μεγαλύτερο αριθμό μετρήσεων). Βέβαια η συνεισφορά τους στο συνολικό χρόνο μέτρησης είναι σχετικά μικρή (π.χ. για NbVoltage=50, NbV=20 και NbE=30, που είναι οι προκαθορισμένες τιμές, ο συνολικός χρόνος των μετρήσεων-εξαιρουμένου του χρόνου επίτευξης θερμικής ισορροπίας-είναι περίπου 22 λεπτά). Παρόλα αυτά, για ένα σύνολο κύκλων (Nbcycles) ίσο με 10, αυτό συνεπάγεται συνολικό χρόνο μετρήσεων 220 λεπτών.



Διαγρ. 3: Επίδραση συνδυασμού παραμέτρων επίκτησης δεδομένων στο διορθωμένο συντελεστή ενεργού απόδοσης



Διαγρ. 4: Μεταβολή του διορθωμένου συντελεστή ενεργού απόδοσης συναρτήσει της προσπίπτουσας ισχύος RF/MW

Μια άλλη παράμετρος τέλος η οποία επηρεάζει τη μετρούμενη τιμή του (διορθωμένου) συντελεστή ενεργού απόδοσης είναι η προσπίπτουσα ισχύς (RF ή MW). Η συγκεκριμένη παράμετρος δεν επιδρά στον απαιτούμενο συνολικό χρόνο των μετρήσεων, έχει όμως επίπτωση στην απόδοση του thermistor. Αυτή η επίδραση απεικονίζεται στο Διαγ. 4, από το οποίο προκύπτει ότι για χαμηλές (1 mW) αλλά και υψηλές (9 & 10 mW) τιμές της προσπίπτουσας ισχύος, η τιμή του διορθωμένου συντελεστή απόδοσης διαφέρει αρκετά από τη σταθμισμένη τιμή αναφοράς (KCRV), ενώ για τιμές ισχύος στο διάστημα [2 mW, 8 mW] δε σημειώνονται ιδιαίτερες αποκλίσεις.

5. Συμπεράσματα-Σύνοψη

Στην εργασία αυτή αναλύθηκε διεξοδικά η αρχή λειτουργίας του Εθνικού Προτύπου Ραδιοκυματικής και Μικροκυματικής Ισχύος. Παρουσιάστηκε ο τρόπος υπολογισμού της ενεργού απόδοσης αισθητήρων, με βάση τις μετρήσεις της τάσης στα άκρα των θερμοζευγών και της DC τάσης πόλωσης του thermistor mount, καθώς και η αβεβαιότητα που συνοδεύει τον υπολογισμό αυτό. Εξετάστηκε η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος στην ακρίβεια της μέτρησης και βρέθηκε ότι σημαντικότερη είναι η επίδραση του χρόνου αναμονής για την επίτευξη θερμικής ισορροπίας, του συνολικού αριθμού κύκλων με και χωρίς RF/MW ισχύ, καθώς επίσης και της προσπίπτουσας ισχύος RF/MW-ενώ παράμετροι όπως οι NbVoltage, NbV και NbE δε φάνηκε να έχουν κάποιο κρίσιμο ρόλο. Τέλος διερευνήθηκε ο βέλτιστος συνδυασμός παραμέτρων, που να επιτρέπει τη μέτρηση της ενεργού απόδοσης με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο: διαπιστώθηκε ότι μπορεί να επιτευχθεί συνολική οικονομία χρόνου-σε σχέση με τις προκαθορισμένες τιμές, προτεινόμενες από το BNM-LCIE, οι οποίες οδηγούν σε ένα συνολικό χρόνο μέτρησης, για μια και μόνο τιμή, ίσο με 42h- της τάξης του 50% (για $t_{av}=5000s$, $Nbcycles=10$, $NbVoltage=50$, $NbV=20$ και $NbE=30$), χωρίς να θυσιάσουμε κάτι από την ακρίβεια των μετρήσεών μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. Fantom, Radio frequency & microwave power measurement, London, Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- [2] C.F. Engen, Microwave circuit theory and foundations of microwave metrology, London, Peter Peregrinus Ltd., 1992.
- [3] U. Stumper, "New developments of RF and microwave power standards," CPEM'98 Digest, 1998 Conference on Precision Electromagnetic Measurements, Washington, D.C., USA, p. 296-297
- [4] Dieter Janik and Jan de Vreede, "Status of Precise RF Power Measurement," URSI, Proceedings of General Assembly, 2002, Maastricht
- [5] G. Genevès, "Microcalorimètres pour étalonnages des montures bolométriques en haute fréquence," Bulletin du BNM, no. 82, pp. 17-22, 1990.