

Σχεδίαση & κατασκευή DC τάσεων αναφοράς με κυψέλες θερμικής σταθεροποίησης

Βανδίκας Ιωάννης, Ασημόπουλος Νικόλαος, Πατουλίδης Γεώργιος
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. Τ.Ε.Ι. Δυτικής Μακεδονίας, Κοίλα 1, Κοζάνη,
50100, ivandikas@teiko.gr

Περίληψη

Η εξέλιξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τάσεων αναφοράς είναι εντυπωσιακή. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αντικατέστησαν τα κυκλώματα βασισμένα σε zener αλλά και τους γραμμικούς σταθεροποιητές τάσης έχοντας πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά. Στην παρούσα εργασία έχοντας μελετήσει και συλλέξει δεδομένα από αρκετές γνωστές εμπορικές συσκευές σχεδιάζουμε και κατασκευάζουμε μια μονάδα τάσεων αναφοράς +5V και +10V. Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων παραγωγής τάσης αναφοράς (voltage reference ICs) κάνοντας χρήση μιας καινοτόμου τεχνικής κυψελών θερμικής σταθεροποίησης. Οι κυψέλες θερμικής σταθεροποίησης βασίζονται πάνω σε ένα σύστημα ελέγχου μέτρησης και απόδοσης θερμικής ενέργειας υλοποιούμενο αποκλειστικά με ημιαγωγούς. Στην πρότυπη κατασκευή χρησιμοποιήσαμε 5 κυψέλες, η μια εξ αυτών έχει ανάδραση από το ίδιο το ολοκληρωμένο που παράγει την τάση αναφοράς ώστε να επιτύχουμε ακριβέστερο έλεγχο. Επιπλέον μελετήσαμε την συμπεριφορά των ολοκληρωμένων τάσεων αναφοράς στις πρώτες 300 ώρες λειτουργίας για την «γήρανση» και την σταθερότητα τους. Το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή τάσεων αναφοράς υψηλής ποιότητας και σταθερότητας 5ppm/1000hours και ακρίβειας 0,01% κατάλληλη για όργανο αναφοράς (calibration instrument) ειδικά για πολύμετρα 4 ½ ψηφίων.

Λέξεις-κλειδιά: Buried zener reference, Σταθερότητα μακράς περιόδου, Κυψέλη θερμικής σταθεροποίησης.

Abstract

The evolution of the voltage reference Integrated Circuits is impressive. Having much better characteristics, the integrated circuits, replaced the Zener based circuits as well as the linear voltage regulators. In this paper, after the study and a vast collection of data from several well-known commercial devices, we designed and built a voltage reference unit of +5V and +10V. The purpose of this work is to improve the characteristics of the Voltage Reference ICs with the use of an innovative technic of Temperature Stabilization Cells. The Temperature Stabilization Cells are based in a control system of thermal energy measurement, implemented exclusively with semiconductors. In the prototype device, we used 5 cells in which, one of them has feedback from the same IC which produces the reference voltage in order to achieve a more precise control. In addition, we studied the behavior of the voltage reference ICs for the first 300 operating hours to ascertain their aging and stability. The outcome of this work is a construction of a high quality and stability voltage reference 5ppm/1000 hours and 0,01% precision, suitable for a reference instrument (calibration instrument) specially for multimeters 4 ½ digits.

Keywords: Buried zener reference, Long Term Stability, Temperature Stabilization Cells.

1. Εισαγωγή

Η απλούστερη τάση αναφοράς βασίζεται πάνω σε δίοδο Zener ακρίβειας $\pm 5\%$. Τα γραμμικά ολοκληρωμένα κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης αντικατέστησαν τις διόδους Zener πετυχαίνοντας ακρίβεια $\pm 3\%$. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα παραγωγής τάσεων αναφοράς επιτυγχάνουν ακόμη καλύτερη ακρίβεια της τάξεως του 0.01% . Η σταθερότητά τους, εξαρτάται από την θερμοκρασία, την υγρασία, την πίεση και την ολίσθηση του εξαρτήματος προκαλώντας έτσι μια αβεβαιότητα μερικών μονάδων στο εκατομμύριο ανά 1000 ώρες (ή ανά έτος). Εργαστηριακό πρότυπο αποτελεί το 732B της FLUKE με εξαιρετική ακρίβεια και σταθερότητα και με κυκλώματα θερμικής σταθεροποίησης (Fluke Corporation 1992).

Η εργασία αφορά την δημιουργία τάσης αναφοράς με χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων buried zener reference και την βελτίωση των επιδόσεων τους με την χρήση θερμικής σταθεροποίησης και κατάλληλης μηχανικής σχεδίασης. Επιλέξαμε απλή αναλογική σχεδίαση ώστε να κρατήσουμε χαμηλή την συνολική στάθμη θορύβου. Η πρωτοτυπία του ελέγχου θερμοκρασίας έγκειται στο γεγονός ότι η μέτρηση, ο έλεγχος και η παραγωγή της θερμοκρασίας υλοποιείται αποκλειστικά με ημιαγωγούς. Δημιουργείται έτσι μια αυτόνομη κυψέλη θερμικής σταθεροποίησης αποτελούμενη από έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία συγκριτού, ελεγχόμενο στοιχείο ένα transistor ισχύος, και ένα αισθητήρα θερμοκρασίας ως στοιχείο ανάδρασης. Στην πρωτότυπη κατασκευή έχουμε τέσσερις ανεξάρτητες μονάδες θέρμανσης και μια πέμπτη που λαμβάνει ως ανάδραση την θερμοκρασία από το ίδιο το ολοκληρωμένο που παράγει την τάση αναφοράς. Η ισχύς κάθε κυψέλης είναι $2,5W$, κατά συνέπεια η μέγιστη συνολική ισχύς δεν μπορεί να ξεπεράσει τα $12.5W$. Αυτό κάνει εφικτή την τροφοδοσία της συσκευής από μία μπαταρία $12V$ αποκτώντας έτσι το πλεονέκτημα της φορητότητας. Η τεχνική των κυψελών θερμοκρασιακής σταθεροποίησης έχει ως πλεονεκτήματα:

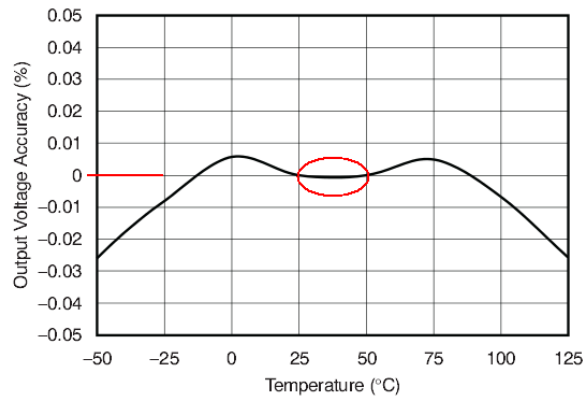
Μικρό χρόνο προθέρμανσης

Μεγάλη ακρίβεια στην ανάπτυξη της επιθυμητής θερμοκρασίας

Μεγαλύτερη ανοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές του περιβάλλοντος

Καλύτερη αξιοπιστία (σε περίπτωση βλάβης μια κυψέλης, αναλαμβάνουν οι υπόλοιπες)

Με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τάσης αναφοράς (REF5050), η ακρίβεια της τάσης εξόδου έχει μηδενικό σφάλμα από θερμοκρασία 25 έως $50^{\circ}C$. Επιλέγουμε θερμοκρασία στους $+42^{\circ}C \pm 0.8^{\circ}C$ μεγαλύτερη από την θερμοκρασία λήψης μετρήσεων και ανεπηρέαστη από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αποφύγαμε μεγαλύτερες θερμοκρασίες για να μην αναπτυχθούν θερμοζεύγοι (thermal emf). Στην σχεδίαση των κυψελών θερμοκρασιακής σταθεροποίησης θα λάβουμε υπόψη αυτά τα δεδομένα ώστε να καλύπτουν αυτές τις προδιαγραφές.



Σχήμα 1: Μεταβολή τάσης εξόδου με θερμοκρασία (Texas Instruments 2010).

2. Εφαρμογή

Το μπλοκ διάγραμμα της κατασκευής απεικονίζεται στο Σχήμα 2 και περιλαμβάνει:

Φίλτρο ισχύος δικτύου

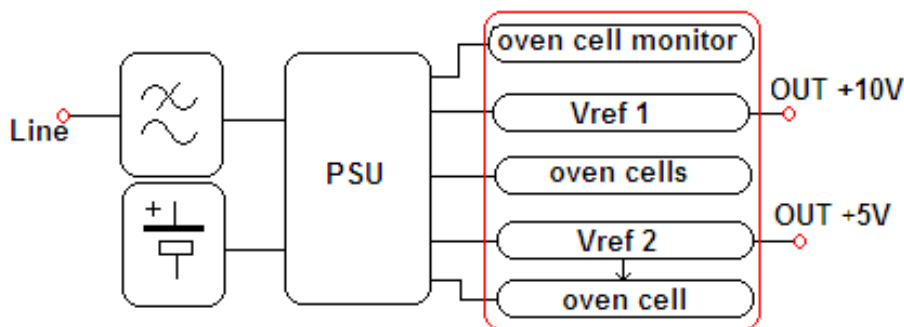
Χαμηλού θορύβου γραμμικό τροφοδοτικό

Στοιχείο θέρμανσης (5 μονάδες ένα από αυτά ελεγχόμενο από την τάση αναφοράς)

Επιτηρητής θερμοκρασίας

Τάση αναφοράς +5V

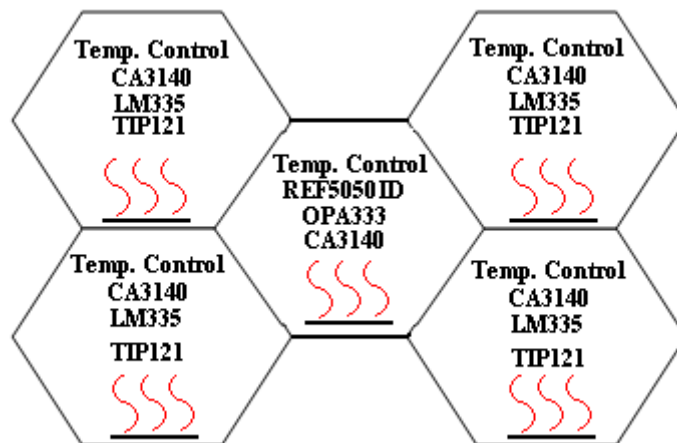
Τάση αναφοράς +10V



Σχήμα 2: Μπλοκ Διάγραμμα κατασκευής.

Η τροφοδοσία γίνεται είτε από μπαταρία (με πλεονεκτήματα τον αμελητέο θόρυβο στη γραμμή τροφοδοσίας και την φορητότητα), είτε από το δίκτυο ηλεκτροδότησης με χρήση φίλτρου και γραμμικό τροφοδοτικό χαμηλού θορύβου. Το τροφοδοτικό παρέχει τροφοδοσία τόσο στις κυψέλες θερμικής σταθεροποίησης και επιτήρησης θερμοκρασίας, όσο και στα ολοκληρωμένα κυκλώματα τάσεων αναφοράς. Για την παραγωγή των +5V βασίζομαστε στο REF5050ID και για τα +10V στο REF102CP της Texas Instruments. Πρόκειται για ολοκληρωμένα κυκλώματα τεχνολογίας buried zener, χαμηλού θορύβου και ολίσθησης, ακριβείς τάσης αναφοράς. Στο Σχ. 3 παρουσιάζουμε την αρχιτεκτονική των κυψελών θερμικής σταθεροποίησης, κατά την οποία, οι τέσσερις, πανομοιότυπες κατασκευαστικά, κυψέλες είναι αυτόνομες και ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η πέμπτη κυψέλη δεν περιλαμβάνει αισθητήρα θερμοκρασίας, γιατί χρησιμοποιείται ο ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας του REF5050ID. Επιτυγχάνεται έτσι άμεση μέτρηση στο εσωτερικό του ολοκληρωμένου δίνοντας την ακριβή θερμική εικόνα του. Όλες οι κυψέλες

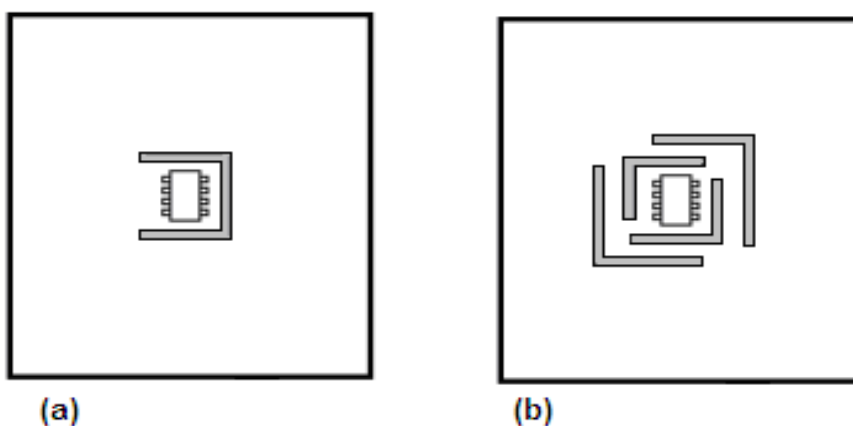
θερμοκρασιακής σταθεροποίησης επιτηρούνται από ένα επιτηρητή θερμοκρασίας (Oven cell monitor) που μας παρέχει οπτικά (με χρήση LED) σήμα της επίτευξης κατάλληλης θερμοκρασίας και κατά συνέπεια της παροχής αξιόπιστων τάσεων εξόδου. Η μέτρηση αυτή λαμβάνεται κοντά στα ολοκληρωμένα παραγωγής τάσης δίνοντάς μας έτσι, την κατά το δυνατόν ακριβέστερη θερμική εικόνα τους.



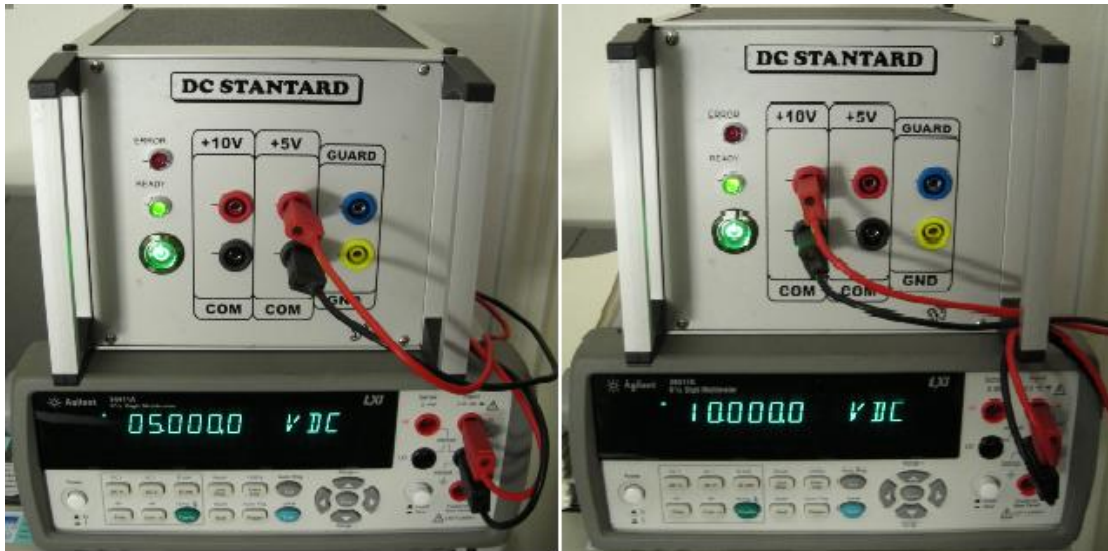
Σχήμα 3: Αρχιτεκτονική κυψελών θερμοκρασιακής σταθεροποίησης.

Ειδική μελέτη έγινε στην τοποθέτηση των ολοκληρωμένων τάσεων αναφοράς στο τυπωμένο κύκλωμα τα οποία δεν είναι ελαστικά, με συνέπεια, μηχανικές εξωτερικές καταπονήσεις να μπορούν να προκαλέσουν μόνιμη απόκλιση στην τάση εξόδου που φτάνει τα 60ppm (AN82 Linear Technology 1999). Επιπροσθέτως, στις μηχανικές καταπονήσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη και το φαινόμενο της διαστολής/συστολής που παρατηρείται στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Η προτεινόμενη λύση είναι η κατάλληλη μηχανική κατεργασία του τυπωμένου με χάραξη διάκενο γύρω από το ολοκληρωμένο, ελαχιστοποιώντας έτσι το ενδεχόμενο μηχανικής καταπόνησής του. Στο σχ. 4 παρουσιάζουμε δυο προτεινόμενες κατεργασίες.

Στην (a) προτείνεται δημιουργία εγκοπής πλάτους 3mm στις τρεις από τις τέσσερις πλευρές στο τυπωμένο κύκλωμα και στην (b) προτείνεται δημιουργία εγκοπών και στις τέσσερις πλευρές με τον διαδοχικό περιμετρικό σχεδιασμό του ελληνικού γράμματος Γ (γάμμα).



Σχήμα 4: Μηχανική κατασκευή τυπωμένου κυκλώματος δημιουργία διακένου 3mm.



Εικόνα 1: Πρότυπη κατασκευή και μετρήσεις με πολύμετρο Agilent 34411A 6 ½ ψηφίων.

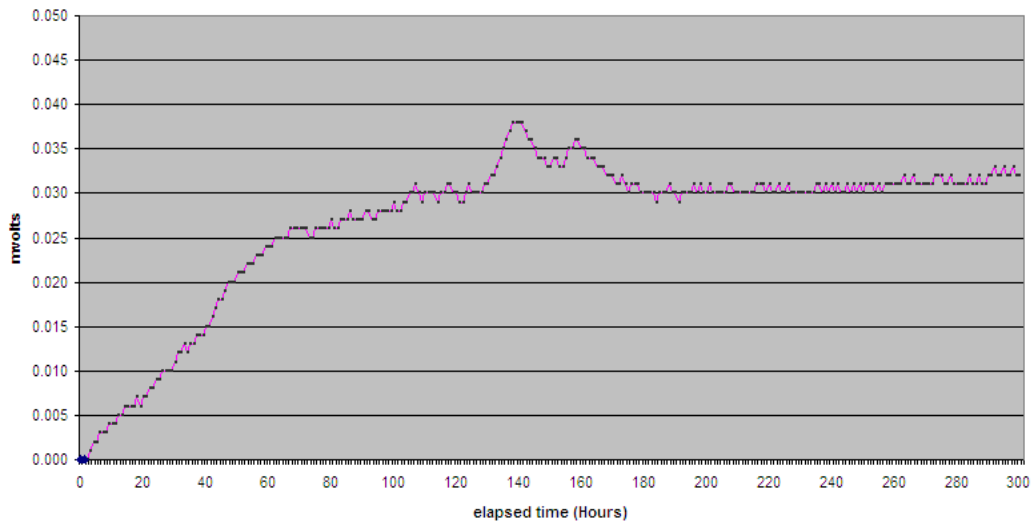
3. Μετρήσεις και Αποτελέσματα

Μετά την κατασκευή του προτεινόμενου κυκλώματος (εικ. 1), για την παρατήρηση του ολίσθησης μακράς περιόδου (long term drift), πάρθηκαν μετρήσεις ανά ώρα και για 300 ώρες λειτουργίας. Παρατηρήθηκαν μεγάλες αποκλίσεις στις πρώτες 200 ώρες και μια αξιοσημείωτη σταθερότητα μετά το πέρας αυτών. Οι μεταβολές της εξόδου πλέον, παίρνουν την μορφή «βαδίσματος μεθυσμένου», είναι τυχαίες και δεν μπορούν να προβλεφθούν και να εξαλειφθούν. Έχει παρατηρηθεί ότι μετά τις 1000 ώρες λειτουργίας, το εύρος της διακύμανσης της τάσης μειώνεται στο ένα τέταρτο του εύρους διακύμανσης που παρατηρείται κατά τις πρώτες 1000 ώρες λειτουργίας.

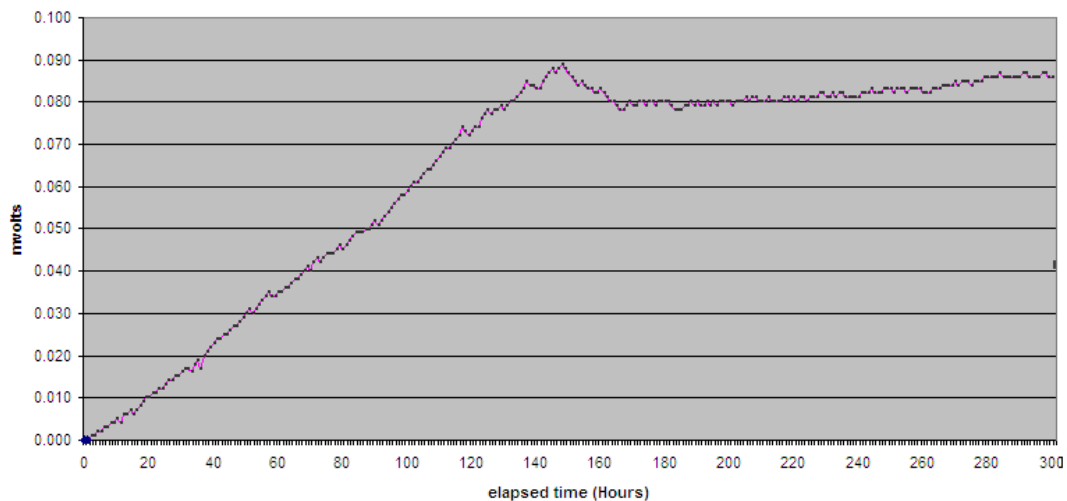
Τρόποι ελαχιστοποίησης της long term drift:

- Βαθμονόμηση της τάσης αναφοράς μετά το πέρας τουλάχιστον 200 ωρών λειτουργίας
- Λειτουργία του ολοκληρωμένου εκτός συστήματος για ένα χρονικό διάστημα (Colm Brazil Analog Devices).

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η καταγραφή μετρήσεων και απεικονίζεται η ολίσθηση τάσης εξόδου κατά τις πρώτες 300 ώρες λειτουργίας για το REF5050ID και στο σχ. 6 οι ίδιες μετρήσεις για το REF102CP. Η θερμοκρασία των ολοκληρωμένων ήταν $42^{\circ}\text{C} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$ και οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 5: Ολίσθηση μακράς περιόδου για REF5050ID τις πρώτες 300 ώρες λειτουργίας.



Σχήμα 6: Ολίσθηση μακράς περιόδου για REF102CP τις πρώτες 300 ώρες λειτουργίας.

4. Συμπεράσματα

Με την καινοτόμο τεχνική των κυβελών θερμικής σταθεροποίησης βελτιώνουμε τις επιδόσεις των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων παραγωγής τάσεων αναφοράς. Οι κυβέλες θερμικής σταθεροποίησης αυτόνομες και ανεξάρτητες μεταξύ τους έχουν μικρό χρόνο για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας, και είναι ευέλικτες. Επιτυγχάνουμε ένα σύστημα βασισμένο αποκλειστικά σε ημιαγωγούς με πολλαπλές αναδράσεις. Η κατάλληλη μηχανική σχεδίαση των τυπωμένου κυκλώματος βοηθάει επιπλέον στην μείωση ολίσθησης και σφαλμάτων που οφείλονται στις μηχανικές καταπονήσεις των εξαρτημάτων. Καταγράψαμε τις μετρήσεις για την μελέτη των πρώτων 300 ωρών για την μελέτη μακράς σταθερότητας. Το αποτέλεσμα είναι μια απόκλιση τις πρώτες 200 ώρες που μειώνετε εντυπωσιακά στις επόμενες ώρες λειτουργίας. Έτσι μπορούμε να πετύχουμε την κατασκευή τάσεων αναφοράς υψηλής ποιότητας και σταθερότητας 5ppm/1000hours – 10ppm/year και ακρίβειας 0,01% κατάλληλη για όργανο αναφοράς σε βιομηχανικό επίπεδο.

5. Βιβλιογραφία

732B/734A DC reference standard (part no. 869321) March 1992 Fluke Corporation.

Low noise, low drift Precision Voltage Reference REF5050 SBOS410E –JUNE2007
REVISED JUNE 2010 Texas Instruments

“The effect of Long-Term Drift on Voltage Reference” Application Note AN-713 by
Colm Brazil Analog Devices.

“Understanding and Applying Voltage References” by Mitchell Lee, November 1999,
AN82 Linear Technology