

Διπλωματική Εργασία

του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του
Πανεπιστημίου Πατρών

Βαργιακάκης Γεώργιος του Μιχαήλ

Αριθμός Μητρώου:
5923

Θέμα

**«Χάρτης Απωλειών Ρεύματος Δέσμης για την Τρίτη
Πειραματική Διάταξη του Συμπαγούς Γραμμικού
Επιταχυντή του CERN»**

Επιβλέπων

Δημήτρης-Αλέξανδρος Τουμπακάρης

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

Πάτρα, Ιούνιος 2011

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Πιστοποιείται ότι η Διπλωματική Εργασία με θέμα

**«Χάρτης Απωλειών Ρεύματος Δέσμης για την Τρίτη
Πειραματική Διάταξη του Συμπαγούς Γραμμικού
Επιταχυντή του CERN»**

Του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Βαργιακάκης Γεώργιος του Μιχαήλ

Αριθμός Μητρώου:
5923

Παρουσιάστηκε δημόσια και εξετάστηκε στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων
Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών στις

24/06/2011

Ο Επιβλέπων

Δημήτρης-Αλέξανδρος
Τουμπακάρης, Επίκουρος Καθηγητής

Ο Διευθυντής του Τομέα

Νικόλαος Φακωτάκης,
Καθηγητής

Αριθμός Διπλωματικής Εργασίας:

**Θέμα: «Χάρτης Απωλειών Ρεύματος Δέσμης για την Τρίτη
Πειραματική Διάταξη του Συμπαγούς Γραμμικού
Επιταχυντή του CERN»**

Φοιτητής: Βαργιακάκης Γεώργιος
Επιβλέπων: Δημήτρης Τουμπακάρης

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη διαδικασία δημιουργίας του χάρτη απωλειών ρεύματος της δέσμης ηλεκτρονίων κατά μήκος της Τρίτης Πειραματικής Διάταξης για το Συμπαγή Γραμμικό Επιταχυντή του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών CERN (Beam Loss Map for Clic Test Facility 3). Ο χάρτης απωλειών χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των σημείων στα οποία υπάρχει απώλεια ρεύματος των φορτίων της δέσμης. Ο προσδιορισμός των σημείων αυτών είναι πρωτεύουσας σημασίας, τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική πλευρά, επειδή πιθανές απώλειες συνεπάγονται αυξημένους κινδύνους έκθεσης σε ακτινοβολία για τον άνθρωπο, πιθανές βλάβες στα μαγνητικά στοιχεία, αλλά και μείωση της ισχύος της δέσμης.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών και οι πειραματικές εγκαταστάσεις στις οποίες έγινε η παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων με στόχο την χαρτογράφηση των σημείων απώλειας ρεύματος δέσμης στο σύμπλεγμα του CTF3.

Χάρτης Απωλειών Ρεύματος Δέσμης για την
Τρίτη Πειραματική Διάταξη του Συμπαγούς
Γραμμικού Επιταχυντή του CERN

Βαργιακάκης Γεώργιος

2009-2011

Σύνοψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στη διαδικασία δημιουργίας του χάρτη απωλειών ρεύματος της δέσμης ηλεκτρονίων κατά μήκος της Τρίτης Πειραματικής Διάταξης για το Συμπαγή Γραμμικό Επιταχυντή του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών CERN (Beam Loss Map for Clic Test Facility 3). Ο χάρτης απωλειών χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των σημείων στα οποία υπάρχει απώλεια ρεύματος των φορτίων της δέσμης. Ο προσδιορισμός των σημείων αυτών είναι πρωτεύουσας σημασίας, τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική πλευρά, επειδή πιθανές απώλειες συνεπάγονται αυξημένους κινδύνους έκθεσης σε ακτινοβολία για τον άνθρωπο, πιθανές βλάβες στα μαγνητικά στοιχεία, αλλά και μείωση της ισχύος της δέσμης.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών και οι πειραματικές εγκαταστάσεις στις οποίες έγινε η παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων με στόχο την χαρτογράφηση των σημείων απώλειας ρεύματος δέσμης στο σύμπλεγμα του CTF3.

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την βοήθεια του καθηγητή κ. Ευάγγελου Γαζή, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να βρεθώ στο CERN ως προπτυχιακός φοιτητής το καλοκαίρι του 2009. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω γιατί στάθηκε πάντα δίπλα μου, πρόθυμος να με βοηθήσει σε επαγγελματικό αλλά και προσωπικό επίπεδο.

Επίσης πολλές ευχαριστίες αξίζουν στον καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστήμιο Πάτρας, κ. Δημήτριο Τουμπακάρη. Από την πρώτη στιγμή υπήρξε αρωγός της προσπάθειάς μου για την επιτυχή αποτύπωση και περιγραφή της εργασίας αυτής. Οι συμβουλές του ήταν εύστοχες και ουσιαστικές.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου.

Περιεχόμενα

1	Περίληψη	8
2	Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών CERN	11
2.1	Εισαγωγή	11
2.2	Το ερευνητικό πρόγραμμα του CERN	12
3	Η Μελέτη του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή CLIC στο CERN	16
3.1	Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων	16
3.2	Οι διάδοχοι του LHC	18
3.2.1	Ο Συμπαγής Γραμμικός Επιταχυντής CLIC	18
4	Η Τρίτη Πειραματική Διάταξη CTF3 του Συμπαγούς Γραμμικού Επιτα- χυντή CLIC στο CERN	23
4.1	Εισαγωγή	23
4.2	Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης	23
4.3	Αντιστοιχία μεταξύ του CLIC και του CTF3	25
5	Οι Αισθητήρες Εντοπισμού της Θέσης της Δέσμης (BPMs)	28
5.1	Η Διάγνωση της Δέσμης	28
5.2	Οι Αισθητήρες Επαγωγικής Σύλληψης, IPUs	29
5.3	Οι Αισθητήρες Εντοίχιου Ρεύματος, WCMs	32
5.4	Ο κλωβός του Faraday	34
6	Συλλογή Δεδομένων και Μελέτη των Γραφημάτων με τη Δέσμη σε Πλήρη Ισχύ	36
6.1	Εισαγωγή	36
6.2	Γραφήματα ρεύματος-χρόνου κατά την πλήρη μετάδοση	36
6.2.1	Δεδομένα από το γραμμικό τμήμα του επιταχυντή (linac part)	36
6.2.2	Δεδομένα από το τμήμα TL1 της διάταξης	38
6.2.3	Δεδομένα από το Δακτύλιο Συνδυασμού (Combiner Ring)	38

6.3	Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακρίβειών στους Αι- σθητήρες	39
6.3.1	Ανάλυση γραφημάτων του γραμμικού τμήματος (linac part)	39
6.3.2	Ανάλυση γραφημάτων του τμήματος TL1	42
6.3.3	Ανάλυση γραφημάτων του Δακτυλίου Συνδυασμού (Combiner Ring)	43
7	Διαδικασία Βαθμονόμησης των Αισθητήρων και Καινούργιοι Συντελε- στές Βαθμονόμησης	45
7.1	Εισαγωγή	45
7.2	Περιγραφή της Διαδικασίας Βαθμονόμησης	46
7.3	Οι Καινούργιοι Συντελεστές Βαθμονόμησης	46
8	Μετρήσεις Έντασης Ρεύματος με τους Καινούργιους Συντελεστές Βαθ- μονόμησης	51
8.1	Εισαγωγή	51
8.2	Μετρήσεις Έντασης Ρεύματος για το Γραμμικό Τμήμα	52
8.3	Μετρήσεις Έντασης Ρεύματος για το Τμήμα TL1	53
9	Ο Χάρτης Απωλειών Ρεύματος στο CTF3	55
9.1	Εισαγωγή	55
9.2	Απώλειες Ρεύματος στο Γραμμικό Τμήμα	55
9.3	Απώλειες Ρεύματος στο Τμήμα TL1	57
10	Συμπεράσματα, Στόχοι και Επόμενα Βήματα	61

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Οι υπογραφές των εθνικών εκπροσώπων των 12 ιδρυτικών κρατών-μελών του CERN. [1]	12
2.2	Ο χάρτης της Ευρώπης με τα 20 κράτη-μέλη του CERN σήμερα. [1]	13
2.3	Αεροφωτογραφία του CERN και της γύρω περιοχής, με τις δύο εργαστηριακές υποδομές (Meyrin-Ελβετία, Preessin-Γαλλία) και τα δύο κύρια επιταχυντικά συστήματα SPS και LHC. [1]	13
2.4	Προσομοίωση των προϊόντων της αλληλεπίδρασης πρωτονίου-πρωτονίου σε ενέργεια κέντρου μάζας του συστήματος 14 TeV και του προσδιορισμού του σωματιδίου Higgs μέσω των τεσσάρων μιονίων στα οποία διασπάζεται (τέσσερις ευθείες τροχιές χρωματισμένες με κόκκινο), σύμφωνα με την αντίδραση $Higgs \rightarrow ZZ \rightarrow \mu + \mu - \mu + \mu -$. [2]	14
2.5	Σχηματική εξέλιξη του χρόνου μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) μέχρι σήμερα και η χρονική "θέση" των πειραμάτων LHC του CERN, μερικά εκατομμυριοστά του πρώτου δευτερολέπτου γέννησης του σύμπαντος. [3]	15
3.1	Στοιχειώδεις σωματιδιακές οικογένειες του Καθιερωμένου Προτύπου, το οποίο περιγράφει όλες τις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης (Ηλεκτρομαγνητική, ισχυρή και ασθενή πυρηνική) εκτός από τη δύναμη της βαρύτητας.	17
3.2	Το σχέδιο του CLIC για την επιτάχυνση των δύο δεσμών, για συγκρούσεις ενέργειας στο κέντρο της μάζας στα 3 TeV, με την κύρια δέσμη να επιταχύνεται από ισχύ RF που παρέχεται από τη δέσμη οδηγό, μικρότερης ενέργειας αλλά υψηλότερου ρεύματος (το σχέδιο είναι δίχως κλίμακα).[5]	19

3.3 Το δομικό διάγραμμα του CLIC. Διακρίνεται η διάταξη επιτάχυνσης των δύο δεσμών και οι διαστάσεις τους (κεντρικό κομμάτι), τα διάφορα συστατικά του συστήματος έγχυσης της κύριας δέσμης (κάτω μέρος) και το σύστημα δημιουργίας της δέσμης-οδηγού (επάνω μέρος).[5]	22
4.1 Διάγραμμα της τρίτης πειραματικής διάταξης του CLIC (CTF3), με γραμμικό επιταχυντή στα 150 MeV, βρόχο καθυστέρησης και δακτύλιο συνδυασμού. Στο Σχήμα φαίνεται και η πειραματική περιοχή, CLEX.	26
4.2 Το σχέδιο δημιουργίας, επιτάχυνσης και πολλαπλασιασμού RF μιας δέσμης-οδηγού.	27
5.1 Η χρονική δομή της ακτίνας της δέσμης-οδηγού του CTF3.[13]	30
5.2 Τα κομμάτια από τα οποία απαρτίζεται ένας Επαγωγικός Αισθητήρας.[13]	31
5.3 Ο Επαγωγικός Αισθητήρας συναρμολογημένος. Στο μπροστινό μέρος υπάρχουν τέσσερις έξοδοι και δύο εισοδοί βαθμονόμησης.[13]	32
5.4 Η αρχή λειτουργίας του Αισθητήρα Εντοίχιου Ρεύματος WCM.[14]	32
5.5 Το ισοδύναμο κύκλωμα του Αισθητήρα Εντοίχιου Ρεύματος WCM.[14]	33
5.6 Αισθητήρας Εντοίχιου Ρεύματος όπως είχε σχεδιαστεί για τη Δεύτερη Πειραματική Διάταξη του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή, CTF2.[14]	33
5.7 Σχέδιο του Κλωβού Faraday.[8]	34
5.8 Κλωβός Faraday με μια πλάκα πίεσης των ηλεκτρονίων στο εμπρόσθιο μέρος.[8]	35
6.1 Το ρεύμα που μετρήθηκε στον Αισθητήρα BPM0402 του γραμμικού τμήματος για μία, μόνο, συλλογή δεδομένων. Ρυθμός δειγματοληψίας: 512 δείγματα/δευτερόλεπτο.	37
6.2 Ο μέσος όρος των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας του γραμμικού τμήματος της διάταξης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος, υπολογισμένος από το ρυθμό δειγματοληψίας.	38
6.3 Το ρεύμα που μέτρησε ο Αισθητήρας BPI0608 του τμήματος TL1, για μία μόνο συλλογή δεδομένων. Ρυθμός δειγματοληψίας: 2048 δείγματα/δευτερόλεπτο.	39
6.4 Ο μέσος όρος των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας του τμήματος TL1 της διάταξης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος, υπολογισμένος από το ρυθμό δειγματοληψίας.	40

6.5	Το ρεύμα που μέτρησε ο Αισθητήρας BPI0130 του Δακτυλίου Συνδυασμού, για μία μόνο συλλογή δεδομένων. Η ιδιαίτερη μορφή του ρεύματος οφείλεται στους κύκλους που διαγράφει η δέσμη στο Δακτύλιο. Οι κύκλοι αυτοί συντελούν στο να πυκνώσει χρονικά η δέσμη και να αυξηθεί η ενέργειά της. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η δέσμη διαγράφει πέντε κύκλους. Ρυθμός δειγματοληψίας: 512 δείγματα/δευτερόλεπτο.	41
6.6	Ο μέσος όρος των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας του Δακτυλίου Συνδυασμού της διάταξης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος, υπολογισμένος από το ρυθμό δειγματοληψίας.	42
6.7	Λεπτομέρεια του γραφήματος των ρευμάτων που μέτρησαν οι αισθητήρες του γραμμικού τμήματος της διάταξης. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εύκολη η εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων για τη σωστή ή λανθασμένη βαθμονόμηση των αισθητήρων του γραμμικού τμήματος.	43
6.8	Ο λόγος του ρεύματος του BPM0790 ως προς τα ρεύματα των υπόλοιπων αισθητήρων του γραμμικού τμήματος. Επειδή οι λόγοι των υπόλοιπων αισθητήρων είναι μεγαλύτεροι της μονάδας, ο BPM0790 θα πρέπει να περάσει τη διαδικασία της βαθμονόμησης.	44
7.1	Φωτογραφία των αισθητήρων (στο αριστερό μέρος) και της γεννήτριας σημάτων (πάνω δεξιά).	46
7.2	Φωτογραφία του παλμογράφου κατά τη μέτρηση του σήματος βαθμονόμησης από τη γεννήτρια. Στην οθόνη φαίνεται και η καμπύλη του σήματος βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία.	47
8.1	Μετρήσεις ρεύματος με τους παλιούς συντελεστές βαθμονόμησης, στο γραμμικό τμήμα της διάταξης. Στο γράφημα φαίνεται πως οι αισθητήρες δε μετρούν σωστά τις τιμές του ρεύματος της δέσμης.	52
8.2	Μετρήσεις ρεύματος με τους καινούργιους συντελεστές βαθμονόμησης για το γραμμικό τμήμα. Σε αυτό το γράφημα οι ενδείξεις των αισθητήρων έχουν λογική σειρά, γεγονός που σημαίνει πως οι νέοι συντελεστές μπορούν, πλέον, να οδηγήσουν σε σωστές μετρήσεις.	53
8.3	Μετρήσεις ρεύματος με τους παλιούς συντελεστές βαθμονόμησης, στο τμήμα TL1. Στο γράφημα φαίνεται πως οι αισθητήρες δε μετρούν σωστά τις τιμές του ρεύματος της δέσμης.	54

8.4 Μετρήσεις ρεύματος με τους καινούργιους συντελεστές βαθμολόμησης για το τμήμα TL1. Σε αυτό το γράφημα οι ενδείξεις των αισθητήρων έχουν λογική σειρά, γεγονός που σημαίνει πως οι νέοι συντελεστές μπορούν, πλέον, να οδηγήσουν σε σωστές μετρήσεις.	54
9.1 Γενική απεικόνιση των διαφορών των τιμών των ρευμάτων για το γραμμικό τμήμα. Επίσης διακρίνονται τα σημεία που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες σε δυο χρονικά παράθυρα του γραφήματος.	56
9.2 Λεπτομέρεια του Σχήματος 9.1. Η πλειοψηφία των τιμών είναι στο θετικό άξονα, γεγονός που δίνει πληροφορίες για τις απώλειες ρεύματος δέσμης.	57
9.3 Γενική απεικόνιση των διαφορών των τιμών των ρευμάτων για διαδοχικά ζεύγη αισθητήρων, για το τμήμα TL1.	59
9.4 Λεπτομέρεια του Σχήματος 9.3 για το χρονικό διάστημα από 6.35×10^5 ns έως 6.8×10^5 ns. Σε αυτό το σχήμα είναι πλέον εφικτή η μελέτη των καμπυλών των διαφορών.	59
9.5 Λεπτομέρεια του Σχήματος 9.3 για το χρονικό διάστημα από 6.8×10^5 ns έως 7.25×10^5 ns. Σε αυτό το σχήμα είναι πλέον εφικτή η μελέτη των καμπυλών των διαφορών.	60
10.1 Οι μετρήσεις ρεύματος που διενεργεί ο νέος BPM1 190. Η μορφή της καμπύλης είναι πανομοιότυπη με τις υπόλοιπες καμπύλες των αισθητήρων του γραμμικού τμήματος.	62

Κατάλογος Πινάκων

7.1	Παλιοί και νέοι συντελεστές βαθμονόμησης για το γραμμικό τμήμα του CTF3. Στον Πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, το ποσοστό μεταβολής μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και το σχετικό σφάλμα τους. Τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για το γραμμικό τμήμα είναι μικρότερα της μονάδας, γεγονός που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της διαδικασίας βαθμονόμησης.	48
7.2	Παλιοί και νέοι συντελεστές βαθμονόμησης για το τμήμα TL1 της διάταξης. Στον Πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, το ποσοστό μεταβολής μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και το σχετικό σφάλμα τους. Τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για το τμήμα TL1 είναι πολύ μικρά, γεγονός που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της διαδικασίας βαθμονόμησης.	49
7.3	Παλιοί και νέοι συντελεστές βαθμονόμησης για το Δακτύλιο Συνδυασμού του CTF3. Στον Πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, το ποσοστό μεταβολής μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και το σχετικό σφάλμα τους. Τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για το Δακτύλιο Συνδυασμού είναι μεγάλα, γεγονός που επιβάλλει περαιτέρω διερεύνηση για αυτό το τμήμα της διάταξης.	50
9.1	Οι απώλειες ρεύματος δέσμης για το γραμμικό τμήμα της διάταξης. Οι παύλες δηλώνουν πως η συγκεκριμένη τιμή δεν υπάρχει ή δεν μπορεί να υπολογιστεί με τα υπάρχοντα δεδομένα. Οι απώλειες για τα διαστήματα που περιέχουν το BPM1190 έμειναν σκόπιμα κενές λόγω του προβλήματος του συγκεκριμένου αισθητήρα.	58
9.2	Οι απώλειες ρεύματος δέσμης για το τμήμα TL1 της διάταξης.	60

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η δημιουργία ενός χάρτη απωλειών της έντασης του ρεύματος της δέσμης ηλεκτρονίων κατά μήκος της Τρίτης Πειραματικής Διάταξης του Προγράμματος του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή CLIC (CLIC Test Facility 3). Ο χάρτης απωλειών ρεύματος της δέσμης αποτελεί, πρακτικά, τον εντοπισμό των σημείων κατά μήκος της διάταξης, στα οποία χάνεται μέρος των ηλεκτρονίων από τη δέσμη. Αυτή η απώλεια ηλεκτρονίων από τη δέσμη, έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια ρεύματος. Η απώλεια ρεύματος δέσμης σε μία επιταχυντική διάταξη αποτελεί σημαντικό πρόβλημα τόσο για τους ερευνητές όσο και για τους χειριστές και πρέπει να αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά. Οι ερευνητές μπορεί να παραπλανηθούν από λανθασμένες μετρήσεις και το ανθρώπινο δυναμικό που βρίσκεται στο δωμάτιο χειρισμού κινδυνεύει από την ακτινοβολία του ρεύματος της δέσμης που περνάει στον περιβάλλοντα χώρο της πειραματικής διάταξης.

Κατά μήκος της πειραματικής διάταξης είναι εγκατεστημένες πειραματικές συσκευές για τη μέτρηση ποικίλων παραμέτρων της δέσμης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι Αισθητήρες Επαγωγικής Σύλληψης για τον Εντοπισμό της Θέσης της Δέσμης (Inductive Pick-Up-IPU Beam Position Monitors-BPMs), οι οποίοι αποτελούν τα πιο πολυάριθμα εξαρτήματα κατά μήκος της διάταξης του CTF3 και οι οποίοι μετρούν την ένταση και τη θέση της δέσμης.

Η κύρια ιδέα για τη χαρτογράφηση των σημείων απώλειας ρεύματος της δέσμης είναι η εξής: Συλλογή τιμών ρεύματος από τους Αισθητήρες Επαγωγικής Σύλληψης και σύγκριση αυτών των τιμών μεταξύ τους. Διαφορές στις τιμές των μετρούμενων ρευμάτων σημαίνει και απώλεια ρεύματος. Τα σημεία απώλειας ρεύματος δέσμης μπορούν να καθοριστούν εύκολα, μιας και είναι γνωστές οι θέσεις των Αισθητήρων κατά μήκος της διάταξης.

Για να δημιουργηθεί ένας ακριβής χάρτης απωλειών της έντασης του ρεύματος κατά μήκος του συμπλέγματος, θα πρέπει πρώτα απ' όλα να

εξασφαλιστεί η σωστή βαθμονόμηση¹ των Αισθητήρων. Η βαθμονόμηση των αισθητήρων θα πρέπει να γίνει με ανοχή σφάλματος κοντά στο 1%. Για αυτόν το λόγο, η διαδικασία βαθμονόμησης έγινε, πρώτα, με τη δέσμη να βρίσκεται σε πλήρη ισχύ. Έτσι, εντοπίστηκαν οι ανακρίβειες στις βαθμονομήσεις των αισθητήρων. Έπειτα, αυτές οι βαθμονομήσεις ελέγχθηκαν συστηματικά με ένα συγκεκριμένο σήμα βαθμονόμησης 300 mA. Ως ανακρίβειες, ορίζονται φαινόμενα όπου η ένταση του ρεύματος της δέσμης που μετράται από τον BPM_{i+1} , έχει τιμή μεγαλύτερη από την ένταση του ρεύματος της δέσμης που μέτρησε ο BPM_i . Οι δείκτες i και $i+1$ συμβολίζουν τη σειρά με την οποία είναι εγκατεστημένοι οι αισθητήρες κατά μήκος της διάταξης. Είναι προφανές πως πιθανές τέτοιες τιμές από τους αισθητήρες δε δικαιολογούνται από φυσικής πλευράς, αφού δεν είναι δυνατό να υπάρχει δημιουργία ηλεκτρονίων στο εσωτερικό της δέσμης. Επομένως, όποιοι αισθητήρες εμφάνιζαν ανακριβείς τιμές έντασης ρεύματος, υποβάλλονταν σε νέα βαθμονόμηση. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίστηκε η εγκυρότητα των μετρήσεων που λαμβάνονταν από τους αισθητήρες. Στη συνέχεια, με τη δέσμη σε πλήρη ισχύ, για μία ακόμη φορά, συλλέχθηκαν δεδομένα από τους σωστά βαθμονομημένους πια αισθητήρες. Έπειτα, εντοπίστηκαν τα σημεία απώλειας ρεύματος δέσμης, δηλαδή τα σημεία όπου το μετρούμενο ρεύμα δέσμης του BPM_{i+1} ήταν αισθητά μικρότερο από το ακριβώς προηγούμενό του, BPM_i .

Περίληπτικά, η εργασία δομείται ως εξής: Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών CERN, από την ίδρυσή του μέχρι σήμερα, τι στόχους επιτελεί και πού αποσκοπεί η λειτουργία του. Αυτή την εποχή το CERN συγκαταλέγεται στα πιο σημαντικά ερευνητικά κέντρα στον τομέα της φυσικής υψηλών ενεργειών. Επίσης, σήμερα στο CERN λειτουργεί ο Μεγάλος Αδρονικός Επιταχυντής LHC με μήκος περιφέρειας 27 km.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή CLIC, ο οποίος είναι αυτή τη στιγμή ο επικρατέστερος διάδοχος του LHC. Σκοπός είναι ο CLIC να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του μποζονίου του Higgs, πέραν του LHC και για τη συμπλήρωση του υπερσυμμετρικού φάσματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η Τρίτη Πειραματική Διάταξη του CLIC, CTF3, η οποία είναι αυτή τη στιγμή σε πλήρη λειτουργία και αποτέλεσε το ερευνητικό περιβάλλον της παρούσας εργασίας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται οι Αισθητήρες για τον Εντοπισμό της Θέσης της Δέσμης (BPMs–Beam Position Monitors) των οποίων οι παράμετροι και οι ρυθμίσεις μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η συλλογή των δεδομένων με τη δέσμη σε πλήρη ισχύ, μέσω ανάπτυξης κώδικα στο πρόγραμμα Matlab και η μελέτη των γραφημάτων που προκύπτουν από αυτά τα δεδομένα.

¹Αγγλ. Calibration

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων με σκοπό να διορθωθούν τυχόν ανακρίβειές τους. Ακολουθεί ο υπολογισμός των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Ακολουθεί το όγδοο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζονται τα νέα διορθωμένα γραφήματα των ρευμάτων, βάσει των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης.

Στο ένατο κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος εντοπισμού των σημείων όπου υπάρχει απώλεια ρεύματος δέσμης και η δημιουργία του τελικού χάρτη απωλειών δέσμης στο CTF3.

Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της εργασίας, οι στόχοι και τα επόμενα βήματα για την πορεία της χαρτογράφησης των απωλειών σε πραγματικό χρόνο μέσω γραφικού περιβάλλοντος.

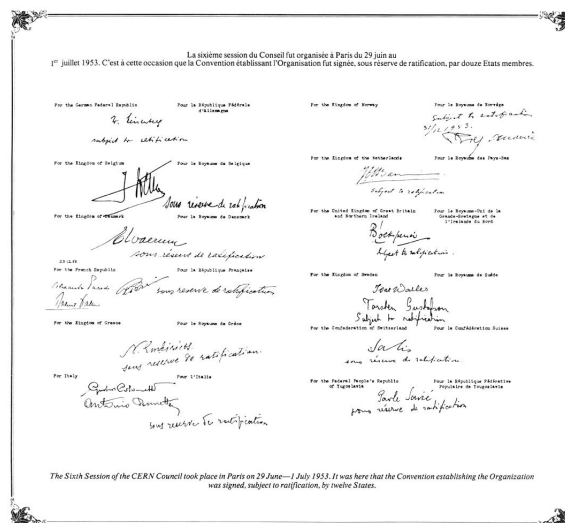
Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών CERN

2.1 Εισαγωγή

Το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών “European Organization for Nuclear Research”, τα αρχικά του οποίου συνθέτουν τη λέξη CERN, έχει ως σκοπό τη μελέτη και διερεύνηση των φαινομένων και ιδιοτήτων που εμφανίζουν οι πιο μικροί θεμελιώδεις δομικοί λίθοι της ύλης, οι δυνάμεις με τις οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και οι συμμετρίες που παρουσιάζουν, στα πλαίσια των θεμάτων που μελετά η Σωματιδιακή Φυσική ή Φυσική των Υψηλών Ενεργειών.

Το CERN ιδρύθηκε το 1955 από 12 χώρες-μέλη, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα. Από τότε εξελίχθηκε και λειτουργεί, πλέον, ως διεθνής οργανισμός που απαρτίζεται από 20 χώρες-μέλη. Η έδρα του CERN βρίσκεται στη Γενεύη της Ελβετίας. Σε αντίθεση, όμως, με πολλούς διεθνείς οργανισμούς, οι οποίοι επιτελούν ως επί το πλείστον διοικητικό ρόλο, το CERN είναι ένα από τα μεγαλύτερα εργαστήρια βασικής έρευνας σε παγκόσμια κλίμακα και το μεγαλύτερο με διαφορά στο πεδίο της φυσικής των στοιχειωδών σωματιδίων.

Το CERN βρίσκεται στην Ελβετική Ρομανδία, τη γαλλόφωνη περιοχή της Ελβετίας, με την πρωτεύουσα των διεθνών οργανισμών, τη Γενεύη. Λόγω της έκτασης και του όγκου των εγκαταστάσεών του, έχει επεκταθεί και στη γειτονική Γαλλία. Στο κέντρο αυτό απασχολούνται μόνιμα περίπου 3000 εργαζόμενοι που εκπροσωπούν μια μεγάλη ποικιλία επιστημών και ειδικοτήτων, όπως φυσικοί, μηχανικοί, τεχνικοί, διοικητικοί υπάλληλοι και τεχνίτες. Το επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό που υποστηρίζει το κέντρο σχεδιάζει και υλοποιεί τις μοναδικές εγκαταστάσεις των επιταχυντικών συστημάτων που παρέχουν δέσμες φορτισμένων σωματιδίων με υπερυψηλές



Σχήμα 2.1: Οι υπογραφές των εθνικών εκπροσώπων των 12 ιδρυτικών κρατών-μελών του CERN. [1]

ενέργειες (ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια σε GeV και πρωτόνια σε TeV), καθώς και σύνθετες συσκευές ανιχνευτικών συστημάτων και, γενικά, το σύνολο των κατασκευών που εξασφαλίζουν την άρτια ερευνητική λειτουργία του κέντρου.

Επίσης, στις εγκαταστάσεις του οργανισμού έχει αναπτυχθεί μοναδική τεχνογνωσία γύρω από την οργάνωση, προετοιμασία, διεξαγωγή, ανάλυση και επεξεργασία σύνθετων επιστημονικών πειραμάτων. Κάθε χρόνο περίπου 7000 επισκέπτες επιστήμονες και σπουδαστές, οι μισοί από τους οποίους φυσικοί στοιχειωδών σωματιδίων, έρχονται στο CERN για να συμμετάσχουν στην ερευνητική διαδικασία. Εκπροσωπούν 500 πανεπιστήμια και περισσότερα από 100 κράτη από όλες τις ηπείρους.

2.2 Το ερευνητικό πρόγραμμα του CERN

Όπως προαναφέρθηκε, τα πειράματα που διεξάγονται στο CERN, έχουν ως επίκεντρο τη μελέτη και ανάδειξη φαινομένων στη σύγχρονη σωματιδιακή φυσική. Το σύνολο, σχεδόν, των πειραμάτων διεξάγεται σε εγκαταστάσεις κάτω από το έδαφος του κέντρου. Σε βάθος περίπου 100 μέτρων, αυτή τη στιγμή πραγματοποιείται το πείραμα του μεγάλου αδρονικού κυκλικού επιταχυντή συγκρουομένων δεσμών πρωτονίων (Large Hadron Collider-LHC) του CERN περιμέτρου 27 km (Σχήμα 2.3). Τα πειράματα διεξάγονται από το 2009 με τη χρήση του επιταχυντή LHC και εκτιμάται ότι θα διαρκέσουν για είκοσι τουλάχιστον χρόνια.



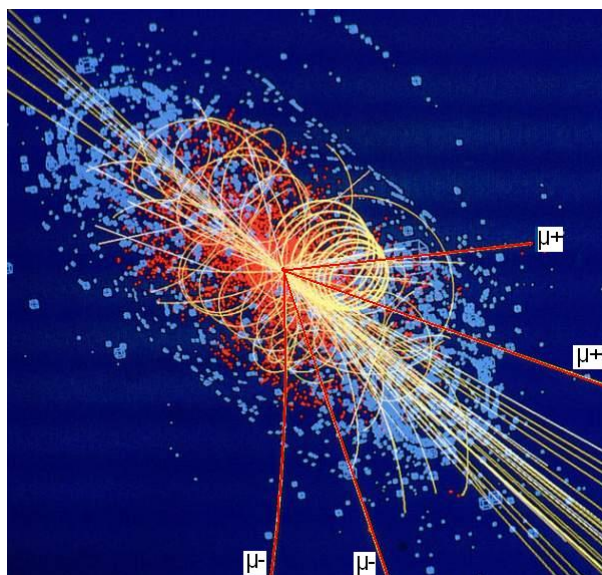
Σχήμα 2.2: Ο χάρτης της Ευρώπης με τα 20 κράτη-μέλη του CERN σήμερα. [1]

Μέσω αυτών των πειραμάτων, οι επιστήμονες του CERN ελπίζουν να αναλύσουν σε μεγαλύτερο βαθμό, σε σχέση με τα μέχρι τώρα δεδομένα, το φαινόμενο των αποτελεσμάτων της μεγάλης έκρηξης (Big Bang) (Σχήμα 2.5) και της περαιτέρω εξέλιξης και να προσδιορίσουν εάν υπάρχει το σωματίδιο Higgs, (Σχήμα 2.4). Το σωματίδιο Higgs φέρεται να είναι το απαραίτητο λανθάνον σωματίδιο για τη συμπλήρωση του Καθιερωμένου Προτύπου (Standard Model) και το αίτιο προέλευσης της μάζας των στοιχειωδών σωματιδίων. Ωστόσο, δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί αν πράγματι υπάρχει, γιατί για τη δημιουργία του, απαιτείται πολύ μεγάλη ενέργεια, η οποία δεν ήταν πειραματικά διαθέσιμη έως τώρα.



Σχήμα 2.3: Αεροφωτογραφία του CERN και της γύρω περιοχής, με τις δύο εργαστηριακές υποδομές (Meyrin-Ελβετία, Preveessin-Γαλλία) και τα δύο κύρια επιταχυντικά συστήματα SPS και LHC. [1]

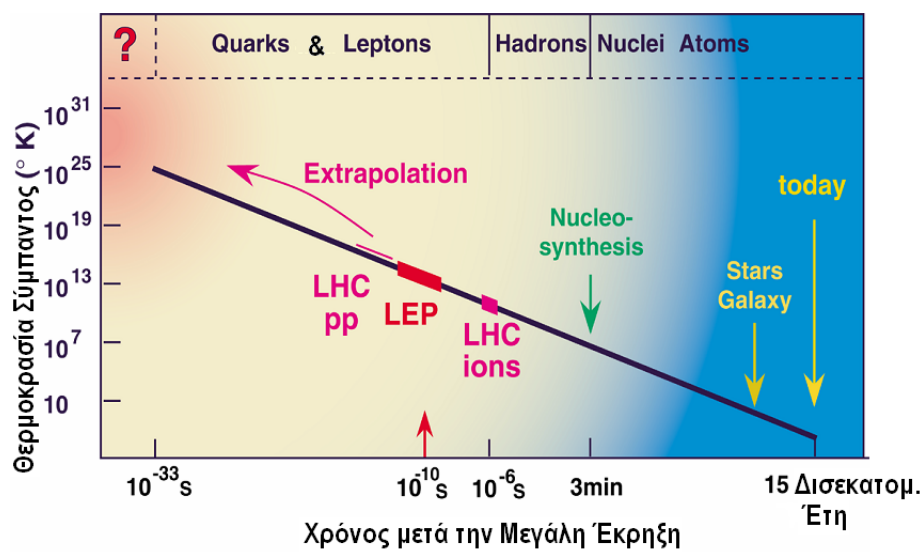
Παράλληλα, ένα ακόμη πολύ σημαντικό αποτέλεσμα που ενδέχεται να προκύψει και να αποτελέσει πραγματική επανάσταση στη σωματιδιακή φυσική είναι η πειραματική επαλήθευση της Θεωρίας της Υπερσυμμετρίας και της ύπαρξης υπερσυμμετρικών σωματιδίων.



Σχήμα 2.4: Προσομοίωση των προϊόντων της αλληλεπίδρασης πρωτονίου-πρωτονίου σε ενέργεια κέντρου μάζας του συστήματος 14 TeV και του προσδιορισμού του σωματιδίου Higgs μέσω των τεσσάρων μιονίων στα οποία διασπάται (τέσσερις ευθείες τροχιές χρωματισμένες με κόκκινο), σύμφωνα με την αντίδραση $Higgs \rightarrow ZZ \rightarrow \mu + \mu - \mu + \mu -$. [2]

Η Θεωρία της Υπερσυμμετρίας επεκτείνει το Καθιερωμένο Πρότυπο με τα υπερσυμμετρικά σωματίδια. Σύμφωνα με τη θεωρία, για κάθε γνωστό στοιχειώδες σωματίδιο υπάρχει το υπερσυμμετρικό του, το οποίο έχει διαφορετική ιδιοστροφορμή (spin) και αντίθετο φορτίο. Αναμένεται η ανακάλυψη του πιο ελαφρού σε μάζα ουδέτερου υπερσυμμετρικού σωματιδίου (neutralino), το οποίο, σύμφωνα με τους θεωρητικούς φυσικούς, θα αποτελέσει το δομικό λίθο δημιουργίας της άγνωστης μέχρι στιγμής σκοτεινής ύλης (Dark Matter).

Τέλος, ένα πρόσθετο πρόβλημα που λύνει η υπερσυμμετρική θεωρία, είναι η επίτευξη της ενοποίησης των τεσσάρων βασικών δυνάμεων της φύσης: ισχυρή, ηλεκτρομαγνητική, ασθενής σε υποατομικό επίπεδο και βαρυτική.



Σχήμα 2.5: Σχηματική εξέλιξη του χρόνου μετά τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang) μέχρι σήμερα και η χρονική “θέση” των πειραμάτων LHC του CERN, μερικά εκατομμυριοστά του πρώτου δευτερολέπτου γέννησης του σύμπαντος. [3]

Η Μελέτη του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή CLIC στο CERN

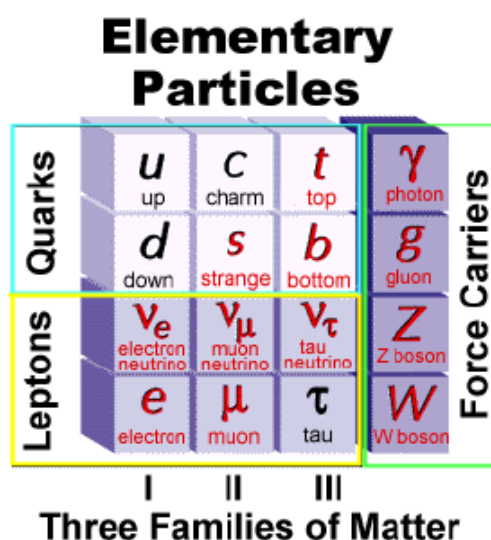
3.1 Ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων

Ο επιταχυντής που είναι στο προσκήνιο αυτήν τη στιγμή στο CERN είναι ο Μεγάλος Επιταχυντής Αδρονίων (Large Hadron Collider – LHC), ο οποίος έχει δημιουργήσει τις προϋποθέσεις για ένα πολύ πλούσιο πρόγραμμα στον τομέα της φυσικής σε ένα νέο μέτωπο υψηλής-ενέργειας, μέσα στα επόμενα χρόνια. Από το Νοέμβριο του 2009 και μετά, ο LHC διερευνά τη νέα ενεργειακή περιοχή της κλίμακας των “τέρα”. Βασικός στόχος είναι η διάψευση ή μη της ύπαρξης του μποζονίου του Higgs με σκοπό να συμπληρωθεί το Καθιερωμένο Πρότυπο (Standard Model) (Σχήμα 3.1), εξηγώντας πώς ορισμένα σωματίδια αποκτούν τη μάζα τους, μέσω του μηχανισμού Higgs.

Τα πειράματα του LHC θα εξερευνήσουν, επίσης, τις πιθανότητες για φυσική πέραν του Καθιερωμένου Προτύπου, όπως για παράδειγμα, η υπερσυμμετρία, οι επιπλέον διαστάσεις και τα νέα μποζόνια βαθμίδας¹ [4]. Το όφελος της ανακάλυψης είναι τεράστιο και θα δείξει την κατεύθυνση για πιθανούς μελλοντικούς επιταχυντές υψηλής ενέργειας. Ωστόσο, η κοινότητα της σωματιδιακής φυσικής παγκοσμίως, έχει ομόφωνα καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα του LHC θα χρειαστεί να συμπληρωθούν από πειράματα σε έναν επιταχυντή ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων, που θα δουλεύει στην ενεργειακή περιοχή των TeV.

Η πιο υψηλή ενέργεια στο κέντρο της μάζας σε συγκρούσεις ηλεκτρονίων–

¹Ο αγγλικός όρος είναι μποζόνια βαθμίδας (Gauge Bosons). Τα νέα μποζόνια βαθμίδας ανακαλύφθηκαν στο CERN το 1983 και είναι το W και το Z. Η ανακάλυψή τους, αντιμετωπίστηκε ως μια σπουδαία επιτυχία του καθιερωμένου προτύπου της σωματιδιακής φυσικής.



Σχήμα 3.1: Στοιχειώδεις σωματιδιακές οικογένειες του Καθιερωμένου Προτύπου, το οποίο περιγράφει όλες τις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης (Ηλεκτρομαγνητική, ισχυρή και ασθενή πυρηνική) εκτός από τη δύναμη της βαρύτητας.

ποζιτρονίων μέχρι τώρα, τα 209 GeV, επετεύχθη στο LEP (Μεγάλος Επιταχυντής Ηλεκτρονίων και Ποζιτρονίων) στο CERN. Σε έναν κυκλικό επιταχυντή, όπως ήταν ο LEP, τα κυκλοφορούντα σωματίδια εκπέμπουν ακτινοβολία συγχρότρου και η ενέργεια που χάνεται με αυτόν τον τρόπο πρέπει να αντικαθίσταται από ένα ισχυρό επιταχυντικό σύστημα ράδιοσυχνοτήτων (RF). Στον LEP, για παράδειγμα, υπήρχε απώλεια περίπου 3% της ενέργειας της δέσμης σε κάθε κύκλο.

Το μεγαλύτερο υπεραγωγίμο σύστημα RF που έχει κατασκευαστεί μέχρι τώρα, το οποίο παρείχε συνολικά 3640 MV σε κάθε περιστροφή, ήταν οριακά επαρκές για να κρατάει τη δέσμη στο LEP στην ονομαστική της ενέργεια. Επιπλέον, η ενεργειακή απώλεια από την ακτινοβολία συγχρότρου, αυξάνεται ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της ενέργειας της κυκλοφορούσας δέσμης. Έτσι, η χρήση ενός αποθηκευτικού δακτυλίου φαίνεται πως δεν είναι σωστή επιλογή, για έναν επιταχυντή ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων, ο οποίος θα λειτουργεί σε μια ενέργεια σημαντικά πιο πάνω από αυτήν του LEP, καθώς η ποσότητα της ισχύος RF που χρειάζεται για να κρατηθεί η δέσμη σε κυκλοφορία είναι απαγορευτική.

3.2 Οι διάδοχοι του LHC

Επομένως, οι γραμμικοί επιταχυντές αποτελούν τη μοναδική επιλογή για την υλοποίηση συγκρούσεων ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων σε ενέργειες της τάξης των TeV, αποφεύγοντας τις απώλειες ακτινοβολίας συγχρότρου. Η βασική αρχή εδώ είναι απλή: Δύο γραμμικοί επιταχυντές συναντιούνται μετωπικά, ο ένας επιταχύνοντας ηλεκτρόνια (e^-), και ο άλλος ποζιτρόνια (e^+), έτσι ώστε οι δύο δέσμες των σωματιδίων να συγκρούονται μετωπικά. Το σχέδιο των γραμμικών επιταχυντών, έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη σχεδίαση. Πρώτα απ' όλα, οι γραμμικοί επιταχυντές θα πρέπει να επιταχύνουν τα σωματίδια με ένα και μοναδικό πέρασμα. Επίσης, μετά την επιτάχυνση, οι δύο δέσμες συγκρούονται μόνο μια φορά.

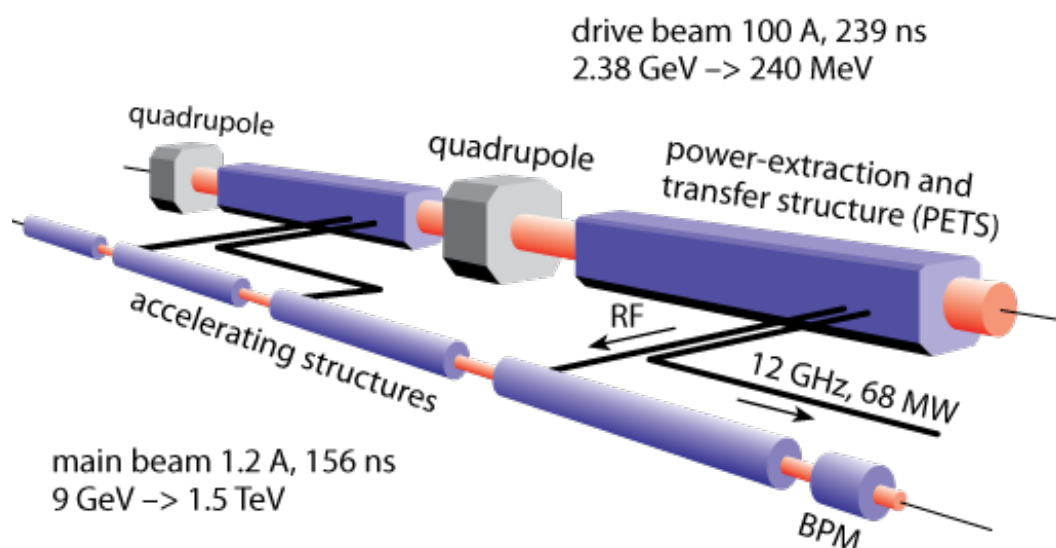
Σε μια κυκλική μηχανή οι αντίθετα κινούμενες δέσμες συγκρούονται με μία επαναληψιμότητα υψηλής συχνότητας (στην περίπτωση του LEP, 44 kHz). Αντίθετα, ένας γραμμικός επιταχυντής, θα είχε μια συχνότητα επαναληψιμότητας της τάξεως των 5–100 Hz. Αυτό σημαίνει ότι το ποσοστό των συγκρούσεων ή η φωτεινότητα (luminosity) που είναι απαραίτητη για τα πειράματα πυρηνικής φυσικής, μπορούν να επιτευχθούν μόνο με δέσμη πολύ μικρών διαστάσεων στο σημείο αλληλεπίδρασης και με τον υψηλότερο δυνατό αριθμό φορτισμένων σωματιδίων για κάθε δέσμη. Επειδή η φωτεινότητα είναι ανάλογη με την ισχύ της ακτίνας, η συνολική αποδοτικότητα της επιτάχυνσης είναι πρωτεύουσας σημασίας.

Η συνεργασία για το Διεθνή Γραμμικό Επιταχυντή (International Linear Collider-ILC) μελετά μία επιταχυντική μηχανή με ενέργεια κέντρου μάζας στα 500 GeV και πιθανή μελλοντική αναβάθμιση στο 1 TeV. Αυτή η μελέτη βασίζεται σε ένα σύστημα RF το οποίο χρησιμοποιεί υπεραγώγιμες κοιλότητες για επιτάχυνση, με ένα ονομαστικό επιταχυντικό πεδίο στα 31.5 MV/m και ένα συνολικό μήκος στα 31 km για ενέργεια σύγκρουσης ακτίνας στα 500 GeV. Το σύστημα των υπεραγώγιμων κοιλοτήτων RF είναι μια επαρκώς μελετημένη και αποδεδειγμένη τεχνολογία η οποία αντιπροσωπεύει ό,τι καλύτερο έχει να επιδείξει η τεχνολογία επιταχυντών αυτήν τη στιγμή.

3.2.1 Ο Συμπαγής Γραμμικός Επιταχυντής CLIC

Την ίδια στιγμή, η μελέτη για το Συμπαγή Γραμμικό Επιταχυντή (CLIC), στοχεύει σε ονομαστική ενέργεια 3 GeV και προβλέπει την κατασκευή του σε στάδια, αρχίζοντας από τη χαμηλότερη ενέργεια που είναι απαραίτητη από τη φυσική, με διαδοχικές ενεργειακές αναβαθμίσεις οι οποίες μπορούν να φτάσουν έως και πέντε φορές την ενέργεια του ILC. Το σχέδιο του CLIC είναι βασισμένο σε κανονικώς αγώγιμες επιταχυντικές διατάξεις οδευόντων κυμάτων, οι οποίες θα λειτουργούν σε συχνότητα των 12 GHz και με πολύ

υψηλά ηλεκτρικά πεδία των 100 MV/m ούτως ώστε να κρατηθεί το συνολικό μήκος περίπου στα 48 km για μια ενέργεια στη δέσμη σύγκρουσης στα 3 TeV. Τέτοια υψηλά πεδία απαιτούν υψηλή μέγιστη ισχύ και επομένως, μια καινούργια πηγή ισχύος. Για το σκοπό αυτό προτείνεται ένα καινοτόμο σύστημα με δύο δέσμες, στο οποίο η πρώτη δέσμη με την ονομασία κύρια επιταχυντική δέσμη, λαμβάνει ενέργεια από την δεύτερη δέσμη, με την ονομασία “δέσμη-οδηγός”.



Σχήμα 3.2: Το σχέδιο του CLIC για την επιτάχυνση των δύο δεσμών, για συγκρούσεις ενέργειας στο κέντρο της μάζας στα 3 TeV, με την κύρια δέσμη να επιταχύνεται από ισχύ RF που παρέχεται από τη δέσμη οδηγό, μικρότερης ενέργειας αλλά υψηλότερου ρεύματος (το σχέδιο είναι δίχως κλίμακα).[5]

Επομένως, ο CLIC βασίζεται στην αρχιτεκτονική δύο ακτίνων επιτάχυνσης: Η ισχύς RF στα 12 GHz δημιουργείται από μία ακτίνα ηλεκτρονίων υψηλού ρεύματος (δέσμη οδηγός-drive beam), η οποία τρέχει παράλληλα στην κύρια δέσμη. Αυτή η ακτίνα οδηγός επιβραδύνεται σε ειδικές διατάξεις εξαγωγής ισχύος (power extraction structures - PETS) και η παραγόμενη ισχύς RF μεταφέρεται στην κύρια δέσμη. Αυτό οδηγεί σε μια σύραγγα πολύ απλής μορφής δίχως κανενός είδους κύκλωμα RF (π.χ. κλειστρά). Και οι δύο ακτίνες μπορούν να δημιουργηθούν σε ένα κεντρικό σύμπλεγμα εγχυτήρων δέσμης και να μεταφερθούν κατά μήκος του γραμμικού τμήματος του επιταχυντή (linac part).

Η μέγιστη ισχύς RF που χρειάζεται για να δημιουργηθούν τα ηλεκτρικά πεδία των 100 MV/m φτάνει περίπου τα 275 MW για κάθε ενεργό μέτρο της επιταχυντικής διάταξης. Με δεδομένο ότι τα δύο γραμμικά κομμάτια του επιταχυντή έχουν μήκος 42 km όταν το συνολικό μήκος του CLIC είναι 48 km, η χρήση ατομικών γεννητριών ισχύος RF, όπως τα κλειστρά, είναι

αδύνατον να παράσχει τόσο υψηλή ισχύ. Αντ' αυτού, η ιδέα κλειδί στον CLIC είναι ένα σχέδιο με δύο δέσμες οι οποίες θα παράγουν και θα διανέμουν την υψηλή ισχύ RF.

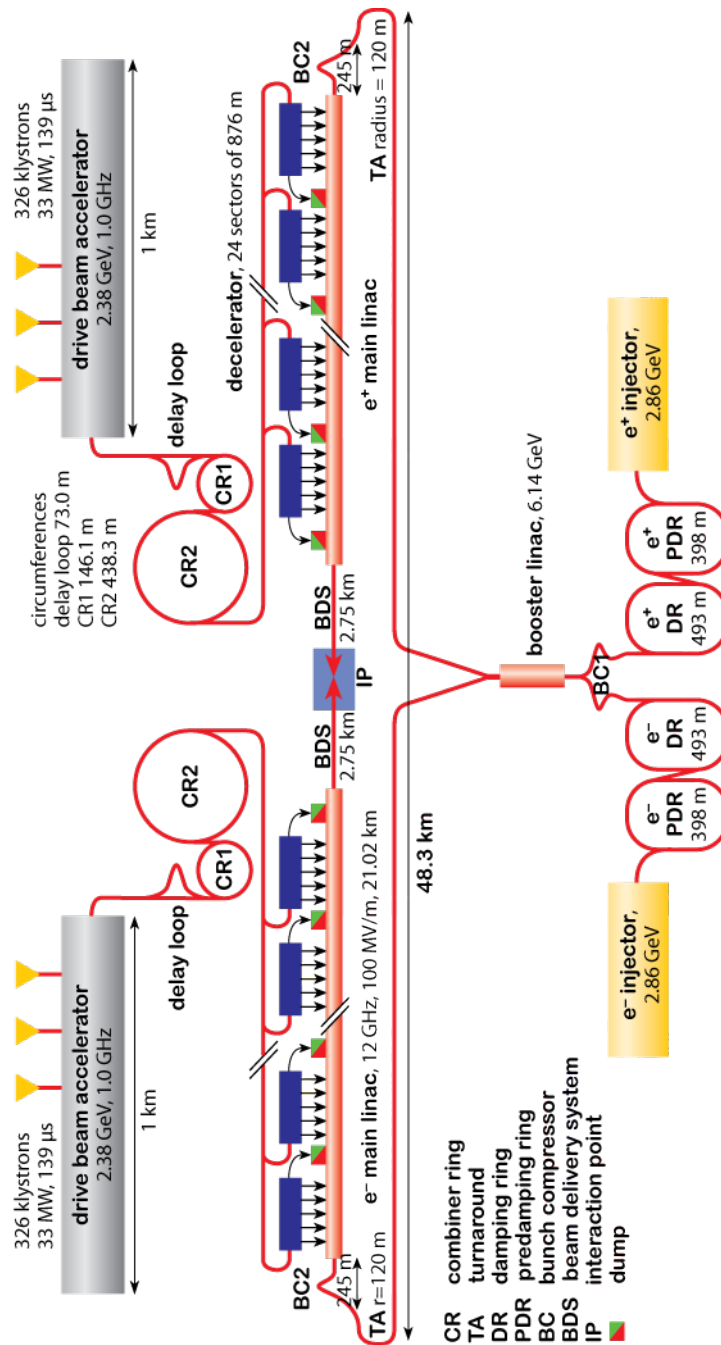
Για τη μεταφορά της ενέργειας στην κύρια δέσμη, η δέσμη οδηγός διέρχεται μέσω των καινούργιων Διατάξεων Εξαγωγής και Μεταφοράς Ισχύος (PETS—Power Extraction and Transfer Structures) που φαίνονται στο Σχήμα 3.2, όπου προκαλεί ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις (για παράδειγμα, η δέσμη χάνει την κινητική της ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητική). Άρα, καθώς η δέσμη επιβραδύνεται, η ενέργεια RF εξάγεται από τις διατάξεις και στέλνεται μέσω κυματοδηγών στις επιταχυντικές διατάξεις στην παράλληλη κύρια δέσμη. Οι PETS είναι κινούμενες κυματικές διατάξεις, όπως οι επιταχυντικές διατάξεις για την κύρια δέσμη, αλλά με διαφορετικές παραμέτρους.

Το προτεινόμενο σχέδιο για το CLIC παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε τα κύρια τμήματα. Στην κεντρική περιοχή βρίσκονται οι δύο κύριοι γραμμικοί επιταχυντές δέσμης που συναντιούνται μετωπικά ούτως ώστε να ωθούν τα ηλεκτρόνια, από την αριστερή πλευρά, και τα ποζιτρόνια από τη δεξιά πλευρά, σε σύγκρουση. Οι σωματιδιακοί ανιχνευτές θα εγκατασταθούν στο σημείο αλληλεπίδρασης (Interaction Point—IP), όπου προκύπτουν οι συγκρούσεις. Ακριβώς πριν, δύο εξελιγμένα συστήματα μεταφοράς δέσμης (Beam Delivery Systems—BDS), ένα για κάθε γραμμή δέσμης, θα εστιάζουν τη δέσμη σε διαστάσεις της τάξης του 1 nm (τιμή rms) στο κάθετο επίπεδο και στα 40 nm στο οριζόντιο επίπεδο, με σκοπό να επιτευχθεί η φωτεινότητα που απαιτούν τα πειράματα. Παράλληλα με το κάθε κύριο γραμμικό επιταχυντή, υπάρχουν δύο γραμμές επιβράδυνσης με σκοπό να εξάγουν την ισχύ RF από τις δέσμες οδηγούς μέσω των PETS και μετά να τις μεταφέρουν στις κύριες δέσμες για να επιταχυνθούν. Στο πάνω μέρος του σχεδίου μπορεί να παρατηρηθεί το σύστημα δημιουργίας των δύο δεσμών το οποίο αποτελείται από δύο γραμμικούς επιταχυντές δεσμών—οδηγών και κλείστρα, ακολουθούμενα από μια σειρά τριών δακτυλίων για κάθε γραμμικό επιταχυντή: Ένα βρόχο καθυστέρησης (DL—Delay Loop) και δύο δακτυλίους συνδυασμού (CR—Combiner Rings), τα οποία παράγουν δέσμη—οδηγό με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά: μέση τιμή ρεύματος δέσμης 100 A, ενέργεια 2.38 GeV και πακέτα δέσμεων με απόσταση 2.5 cm (12 GHz) σε ριπές μήκους 239 ns. Επίσης, οι κύριες δέσμες θα αποκτούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά εξαιτίας του συστήματος έγχυσης κύριας δέσμης, όπου οι δέσμες ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων προέρχονται από τους αντίστοιχους εγχυτήρες, στα 2.4 GeV και, τελικά, επιταχύνονται στα 9 GeV από τον επιταχυντή ώθησης. Εν συνεχεία, εισέρχονται στους κύριους γραμμικούς επιταχυντές.

Αυτή τη στιγμή, πολλές από τις παραμέτρους του πειράματος είναι υπό συνεχή συζήτηση μεταξύ των επιστημόνων. Συνοπτικά, για το μέλλον, υπάρχει ένας αριθμός προκλήσεων που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν:

1. Η αποδοτική δημιουργία της δέσμης-οδηγού υψηλής έντασης,
2. Οι διατάξεις εξαγωγής και μεταφοράς ισχύος (PETS) θα πρέπει να παράγουν την απαιτούμενη ισχύ,
3. Οι επιταχυντικές διατάξεις των 12GHz θα πρέπει να είναι ικανές να παράγουν την απαιτούμενη κλίση σε ένα χαμηλό ποσοστό διακοπών RF,
4. Η παραγωγή και διατήρηση μιας χαμηλής εκπομπής κύριας δέσμης,
5. Η εστίαση της ακτίνας σε κλίμακα νανομέτρου και
6. Η ακριβής ευθυγράμμιση των διαφορετικών στοιχείων.

Πολλές σημαντικές πτυχές του σχεδίου CLIC έχουν ήδη διαπιστωθεί πειραματικά σε προγενέστερες διατάξεις (CTF, CTF2). Ο στόχος της παρούσας τρίτης πειραματικής διάταξης, CTF3, είναι να εξετάσει όλα τα εναπομείναντα σημαντικά θέματα που σχετίζονται συγκεκριμένα με το CLIC μέχρι το 2011, έτσι ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι εφικτή η υλοποίηση του προτεινόμενου σχεδίου για το CLIC.



Σχήμα 3.3: Το δομικό διάγραμμα του CLIC. Διακρίνεται η διάταξη επιτάχυνσης των δύο δεσμών και οι διαστάσεις τους (κεντρικό κομμάτι), τα διάφορα συστατικά του συστήματος έγχυσης της κύριας δέσμης (κάτω μέρος) και το σύστημα δημιουργίας της δέσμης-οδηγού (επάνω μέρος).[5]

Η Τρίτη Πειραματική Διάταξη CTF3 του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή CLIC στο CERN

4.1 Εισαγωγή

Η νέα πειραματική διάταξη του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή (CLIC Test Facility 3-CTF3), η οποία αναπτύσσεται στο CERN από μια διεθνή διεπιστημονική συνεργασία, προσπαθεί να εξετάσει κατά πόσο είναι εφικτό το σχέδιο του CLIC για το γραμμικό επιταχυντή ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων σε ενέργειες πολλών TeV.

Ο σκοπός είναι να διερευνηθεί το κατά πόσο είναι τεχνικά εφικτές οι βασικές έννοιες (concepts) της καινούργιας πηγής ισχύος RF του CLIC. Για παράδειγμα, η δημιουργία υψηλού φορτίου, τα υψηλής συχνότητας πακέτα ηλεκτρονίων που δημιουργούνται από το συνδυασμό δέσμης σε ένα δακτύλιο (χρησιμοποιώντας εγκάρσιους εκτροπείς RF) και η λειτουργία της δέσμης οδηγού με τον επιταχυντή σε πλήρη ισχύ λειτουργίας.

Το CTF3 θα χρησιμοποιηθεί, επίσης, για να δοκιμαστούν τα κρίσιμα συστατικά του CLIC και, πιο συγκεκριμένα, θα παρέχει την ισχύ RF των 30 GHz που χρειάζεται για να δοκιμαστούν οι επιταχυντικές διατάξεις της κύριας δέσμης σε ονομαστική κλίση (gradient) και μήκος παλμού 150 MV/m και διάρκειας 70 ns.

4.2 Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης

Το CTF3 εδράζεται στο παλιό σύμπλεγμα κτιρίων της εκκίνησης των δεσμών του Μεγάλου επιταχυντή Ηλεκτρονίων-Ποζιτρονίων LEP (Large Electron-

Positron collider) που έκλεισε το 2001. Η εγκατάστασή του βρίσκεται σε εξέλιξη: Ο γραμμικός επιταχυντής, ο βρόχος καθυστέρησης και ο δακτύλιος συνδυασμού έχουν λειτουργήσει με δέσμη, ενώ διεξάγονται περαιτέρω συζητήσεις για την εγκατάσταση και των υπολοίπων τμημάτων της διάταξης. Το νέο κτήριο για το CLEX (CLIC EXperimental area) είναι τώρα έτοιμο, το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού έχει εγκατασταθεί και έχει λειτουργήσει με δέσμη, από τον Αύγουστο του 2008. Το σχήμα 4.1 δείχνει την εγκατάσταση στην τελική της μορφή.

Το CTF3 αποτελείται από ένα γραμμικό επιταχυντή των 150 MeV, που ακολουθείται από μια σειρά δύο δακτυλίων, το βρόχο καθυστέρησης και το δακτύλιο συνδυασμού. Αυτό το κομμάτι του CTF3 είναι μια μικρογραφία του συμπλέγματος που απαιτείται για να παραχθεί η δέσμη-οδηγός του CLIC. Στο CTF3 η συμπιεσμένη δέσμη, με ενέργεια της τάξης των 150 MeV, ονομαστικό ρεύμα δέσμης στα 32 A, απόσταση μικροπαλμών στα 83 ps (12 GHz) και μήκος παλμού στα 140 ns, στέλνεται στην πειραματική περιοχή του CLIC (CLEX-CLIC EXperimental area). Το CLEX στεγάζει τη Γραμμή Δέσμης Δοκιμών (TBL-Test Beam Line) και ένα παράπηγμα δοκιμών δύο δεσμών (Two Beam Test Stand-TBTS) όπου θα δοκιμαστεί το σχέδιο επιτάχυνσης του CLIC. Ακόμη θα γίνουν και άλλες δοκιμές, συμπεριλαμβανομένης της εξαγωγής της ισχύος RF από τη δέσμη οδηγό και της μεταφοράς της στην επιταχυντική διάταξη. Αυτή η διαδικασία θα επιταχύνει την κύρια δέσμη, ώστε να επιδειχθεί η αρχή επιτάχυνσης του CLIC.

Ο μακρύς παλμός των 1.6 μs της δέσμης-οδηγού, παράγεται από ένα θερμικά ιονισμένο πυροβόλο. Η χρονική δομή του παλμού δημιουργείται σε ένα σύστημα ακτίνας που αποτελείται από τρεις υπό-αρμονικούς παραγωγούς ακτίνας των 1.5 GHz, έναν προ-παραγωγό ακτίνας 3 GHz και έναν παραγωγό ακτίνας οδεύοντος κύματος των 3 GHz. Επομένως, οι ακτίνες που λαμβάνονται έχουν απόσταση μεταξύ τους 20 cm (δύο πακέτα των 3 GHz) και έχουν φορτίο της τάξης των 2.3 nC ανά ακτίνα. Αυτό σημαίνει, κατά μέσο όρο, ρεύμα της τάξης των 3.5 A. Ο εγχυτήρας της δέσμης-οδηγού συμπληρώνεται από δύο διατάξεις πλήρως φορτισμένου οδεύοντος κύματος στα 3 GHz, φτάνοντας την ενέργεια της δέσμης στα 20 MeV. Κατά μήκος όλου του εγχυτήρα χρησιμοποιείται σωληνοειδής εστίαση.

Έπειτα από ένα μαγνητικό chicane το οποίο χρησιμοποιείται για την ευθυγράμμιση και τη διάγνωση της δέσμης, η δέσμη-οδηγός φτάνει την τελική της ενέργεια (150 MeV) στον επιταχυντή της δέσμης-οδηγού. Σε αυτό το στάδιο η δέσμη αποτελείται από 16 ακτίνες, πλήρως φορτισμένων (3 GHz) οδεύοντων κυμάτων, ταυτόσημων με αυτά που χρησιμοποιούνται στον εγχυτήρα. Οι ακτίνες έχουν μήκος περίπου 1 m και λειτουργούν περίπου στα 7 MV/m με τη χρησιμοποίηση μιας κατάλληλης διάταξης RF. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται αποδοτικότητα δέσμης κοντά στο 95%. Η ισχύς παρέχεται από 8 κλειστρά (klystrons) των 30 MW και συμπιέζεται με έναν παράγοντα 2 έτσι ώστε να δώσει μια μέγιστη τιμή ισχύος, σε κάθε ακτίνα,

περίπου στα 30 MW. Για να επιτευχθεί η εστίαση της δέσμης στον επιταχυντή, χρησιμοποιούνται τριπλές τετραπόλιν.

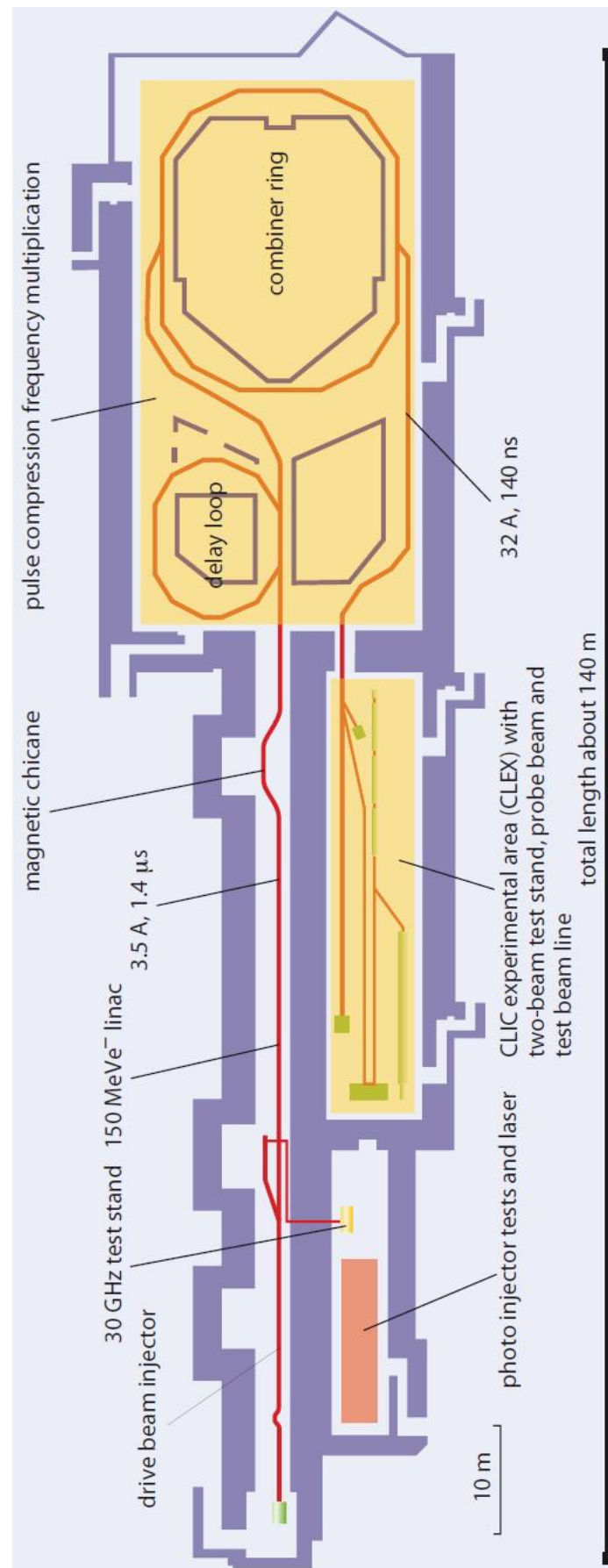
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, ένα πρώτο στάδιο συμπίεσης του παλμού ηλεκτρονίων και πολλαπλασιασμού της συχνότητας της δέσμης, επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν ανάστροφο εκτροπέα RF των 1.5 GHz και ένα Βρόχο Καθυστέρησης (Delay Loop) των 42 m. Το Βρόχο Καθυστέρησης ακολουθεί ένας Δακτύλιος Συνδυασμού (Combiner Ring) των 84 m, στον οποίο λαμβάνεται ένας περαιτέρω παράγοντας συμπίεσης του παλμού ίσος με 5. Σε αυτό το σημείο ο παλμός της δέσμης-οδηγού έχει μήκος 140 ns και ρεύμα 35 A. Οι δέσμες με φορτίο 2.3 nC έχουν απόσταση 2 cm.

Οι μεμονωμένες ακτίνες συμπιέζονται ώστε το μήκος τους να είναι περίπου 0.5 mm (τιμή rms), σε ένα μαγνητικό συμπιεστή ακτίνας και μεταφέρονται στη πειραματική περιοχή CLEX με σκοπό την παραγωγή ισχύος RF στα 30 GHz. Το CLEX αποτελεί ένα πεδίο δοκιμών υψηλής ισχύος. Στην ίδια περιοχή, ένας άλλος γραμμικός επιταχυντής θα παρέχει μία κύρια δέσμη, για το μοντέλο δύο δεσμών του CLIC και ένας δοκιμαστικός επιβραδυντής θα χρησιμοποιείται για μελέτες σταθερότητας της δέσμης-οδηγού.

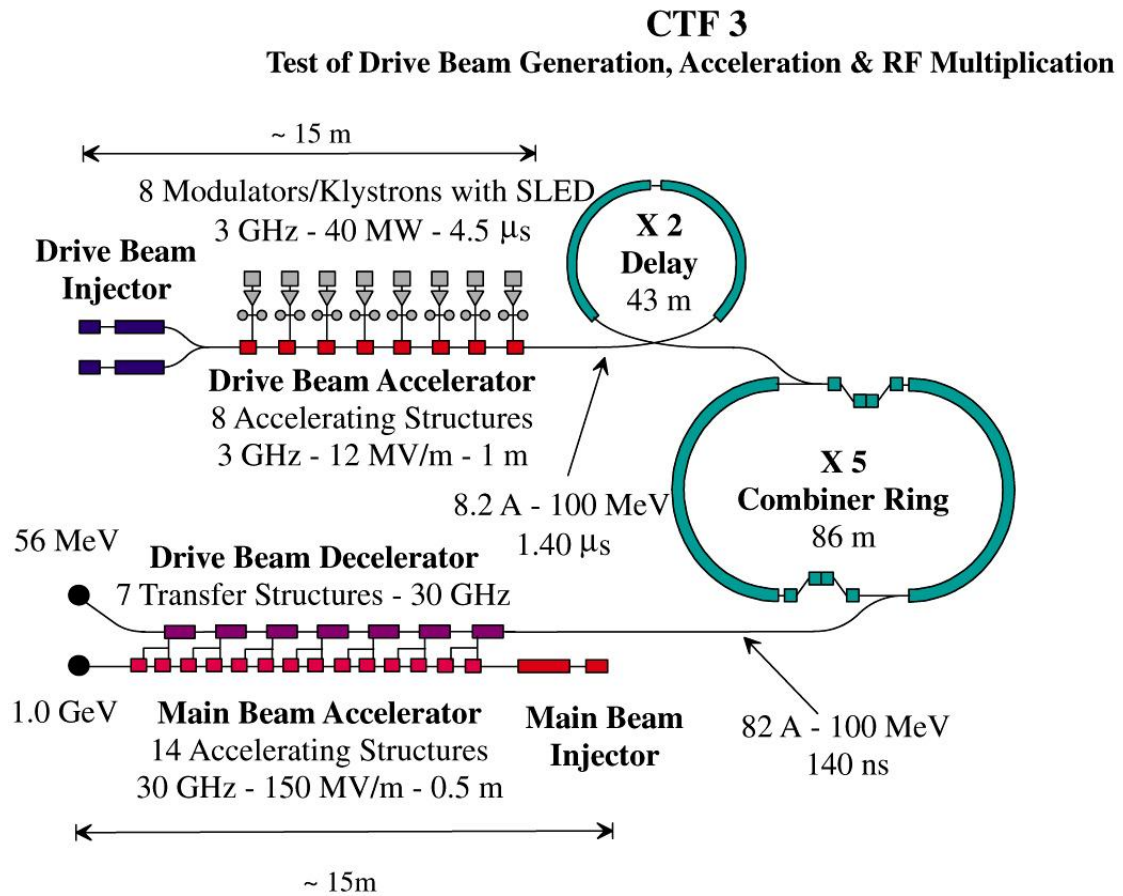
Το CTF3 διαθέτει, επίσης, ένα δεύτερο σταθμό ισχύος RF των 30 GHz (στο μεσοδιάστημα του γραμμικού επιταχυντή), ο οποίος δουλεύει σε ένα χαμηλότερο ρεύμα από αυτό της δέσμης-οδηγού.

4.3 Αντιστοιχία μεταξύ του CLIC και του CTF3

Οι βασικές διαφορές μεταξύ της δέσμης του CTF3 και της δέσμης-οδηγού του CLIC είναι η ενέργεια και το ρεύμα. Η δέσμη-οδηγός του CLIC έχει ρεύμα 100 A και επιβραδύνεται από τα 2.3 GeV στα 0.23 GeV, χάνοντας πάνω από το 90% της ενέργειάς της. Η δέσμη-οδηγός του CTF3 έχει ρεύμα 32 A και επιβραδύνεται από τα 150 MeV στα 0.15 MeV χάνοντας, επίσης, 90% της ενέργειάς της.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα της τρίτης πειραματικής διάταξης του CLIC (CTF3), με γραμμικό επιταχυντή στα 150 MeV, βρόχο καθυστέρησης και δακτύλιο συνδυασμού. Στο Σχήμα φαίνεται και η πειραματική περιοχή, CLEX.



Σχήμα 4.2: Το σχέδιο δημιουργίας, επιτάχυνσης και πολλαπλασιασμού RF μιας δέσμης-οδηγού.

Οι Αισθητήρες Εντοπισμού της Θέσης της Δέσμης (BPMs)

5.1 Η Διάγνωση της Δέσμης

Η διάγνωση της δέσμης (Beam Diagnostics) είναι μια απαραίτητη λειτουργία κάθε επιταχυντικής μηχανής. Ως σύνολο, απαρτίζεται από τα όργανα του επιταχυντή που μετρούν και ελέγχουν τις παραμέτρους της δέσμης και τις ιδιότητές της. Σκοπός της, η μεταφορά όλων των απαραίτητων πληροφοριών στο δωμάτιο ελέγχου (control room) του επιταχυντή. Τέτοιες πληροφορίες είναι η συμπεριφορά της δέσμης, τα φυσικά χαρακτηριστικά της και διαφόρων ειδών χρήσιμα δεδομένα κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Γενικά, μία δέσμη μέσα στο σωλήνα κενού ενός επιταχυντή είναι πολύ ευαίσθητη σε οποιαδήποτε αλλαγή του σχεδιασμού του επιταχυντή και έχει ένα πολύ στενό όριο ευστάθειας. Επομένως, δίχως κατάλληλη διάγνωση θα ήταν αδύνατο για κάποιον να χειριστεί τον επιταχυντή και οι προβλεπόμενες βελτιώσεις θα ήταν ακατόρθωτες.

Για να επιτευχθεί η επιθυμητή λειτουργία του επιταχυντή και άρα καλές προδιαγραφές για τη δέσμη, ο χειρισμός της μηχανής πρέπει να διενεργηθεί διορθώνοντας, αρχικά, τις παραμέτρους των μαγνητικών στοιχείων τα οποία οδηγούν τη δέσμη στις επιθυμητές, για την εξαγωγή επιστημονικών συμπερασμάτων, ρυθμίσεις. Ένα παράδειγμα είναι η ανάγνωση της θέσης της δέσμης από τους αισθητήρες και η διόρθωση της τροχιάς της, στην ονομαστική τιμή, από τον χειριστή της διάταξης. Η απαραίτητη διόρθωση της τροχιάς της δέσμης γίνεται από τον χειριστή αλλάζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους των μαγνητών.

Υπάρχει μία μεγάλη ποικιλία από παραμέτρους δέσμης προς μέτρηση. Για καλή ευθυγράμμιση και ευστάθεια της δέσμης, όλες οι σχετικές παράμετροι θα πρέπει να είναι ελεγχόμενες. Μερικά παραδείγματα σημαντικών

παραμέτρων δέσμης, προς έλεγχο, είναι: Η ένταση του ρεύματος, το εγκάρσιο και το διαμήκες προφίλ (μέγεθος και σχήμα των ριπών της δέσμης), η ενέργεια και η θέση της. Οι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν από αρκετές συσκευές διάγνωσης δέσμης, όπως: Μετασχηματιστές δέσμης, αισθητήρες εντοίχιου ρεύματος (wall current monitors–WCMs), αισθητήρες επαγωγικής σύλληψης (pick-ups–PUs) ή κλωβοί Faraday (Faraday Cups) για τη μέτρηση της έντασης της δέσμης.

Στην ευρύτερη κατηγορία “Beam Position Monitors” (BPMs), δηλαδή “Αισθητήρες για τον Εντοπισμό της Θέσης της Δέσμης”, συγκαταλέγονται όλοι οι τύποι των συσκευών διάγνωσης οι οποίες, βάσει και του αρχικού τους σκοπού, μπορούν να μετρήσουν την εγκάρσια θέση της δέσμης μέσα στο σωλήνα κενού του επιταχυντή. Η θέση της δέσμης είναι μία από τις παραμέτρους που μπορεί να μετρηθεί από μια μεγάλη ποικιλία συσκευών διάγνωσης. Η πιο δημοφιλής και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη συσκευή, στην περίπτωση δέσμης που αποτελείται από ριπές, είναι τα Pick Ups (PUs), εξαιτίας του σχετικά απλού τους σχεδιασμού και της υψηλής αξιοπιστίας χαρακτηριστικών. Ακόμη, αποτελούν μια μέθοδο η οποία δεν παρεμβαίνει στη δέσμη, πράγμα που προτιμάται όποτε είναι δυνατόν.

5.2 Οι Αισθητήρες Επαγωγικής Σύλληψης, IPUs

Τα BPMs που χρησιμοποιούνται στο CTF3 είναι τύπου IPU (Inductive Pick-Up). Ένας Αισθητήρας Επαγωγικής Σύλληψης (IPU) μετράει την αζιμουθιακή κατανομή του κατοπτρικού ρεύματος¹ της δέσμης. Η κατασκευή του είναι παρεμφερής με του Αισθητήρα Εντοίχιου Ρεύματος (WCM) που θα παρουσιαστεί αργότερα, αλλά το εσωτερικό τοίχωμα του αισθητήρα είναι χωρισμένο σε ηλεκτρόδια, καθένα από τα οποία σχηματίζει το πρωτεύον πηνίο ενός τοροειδούς μετασχηματιστή.

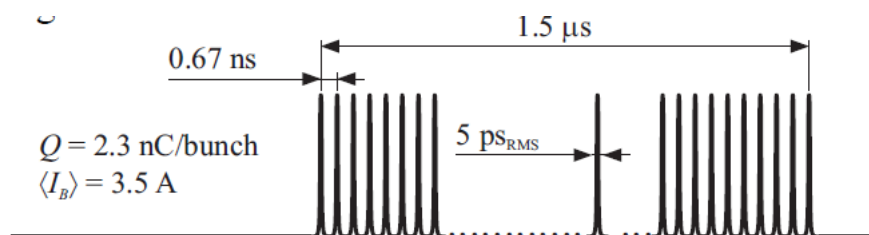
Το ποσοστό του κατοπτρικού ρεύματος της δέσμης που περνάει σε κάθε ηλεκτρόδιο μετασχηματίζεται σε ένα δευτερεύον πηνίο, το οποίο συνδέεται με μία έξοδο του αισθητήρα. Τέσσερα σήματα από τις εξόδους του αισθητήρα οδηγούν ένα Ενεργό Υβριδικό Κύκλωμα AHC. Αυτά τα σήματα παράγουν ένα προσθετικό σήμα (sum signal–Σ), ανάλογο με το ρεύμα της δέσμης, και δύο σήματα διαφοράς Δ, ανάλογα επίσης με τις οριζόντιες και κάθετες θέσεις της δέσμης.

Το εύρος ζώνης αυτών των σημάτων κυμαίνεται από 1 kHz και χαμηλότερα και φτάνει μέχρι τα 150 MHz. Κάθε μετασχηματιστής ηλεκτροδίων έχει

¹Αγγλ. Image Current: Όταν τα φορτισμένα σωματίδια περνούν μέσα από ένα μεταλλικό σωλήνα, συνοδεύονται από ένα κατοπτρικό επαγωγικό ρεύμα το οποίο βρίσκεται στη μεταλλική επιφάνειά του. Καθώς αυτές οι ακτίνες υψηλής έντασης περνούν κοντά ή ακόμα και μέσα από τη μεταλλική επιφάνεια, το κατοπτρικό ρεύμα μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές. Αυτό το ρεύμα μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την υπερθέρμανση της επιφάνειας του σωλήνα, ειδικά σε περιπτώσεις που η δέσμη αποτελείται από πολλές ακτίνες.[6]

μια επιπρόσθετη σπείρα στην οποία, ένας παλμός από μια πηγή ρεύματος με μεγάλη ακρίβεια εφαρμόζεται με σκοπό να είναι εφικτή η ρύθμιση του αισθητήρα για να επιτευχθεί ακριβής θέση της δέσμης και μετρήσεις ρεύματος. Ο Επαγωγικός Αισθητήρας έχει αναπτυχθεί για το γραμμικό κομμάτι του επιταχυντή της δέσμης (Drive Beam Linac-DBL) του CTF3. Για αυτό το σκοπό, ο Επαγωγικός Αισθητήρας έπρεπε να ρυθμιστεί με γνώμονα τη χαμηλή αγωγιμότητα διαμήκους σύζευξης στην περιοχή των GHz.

Η ακτίνα (bunch) του γραμμικού τμήματος του επιταχυντή για το CTF3 αποτελείται από μία ακολουθία διάρκειας 1.5 μs , με φορτίο 2.3 nC και παλμούς ηλεκτρονίων στα 5 ps (τιμή rms), με ρυθμό επανάληψης στο 1.5 GHz, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.

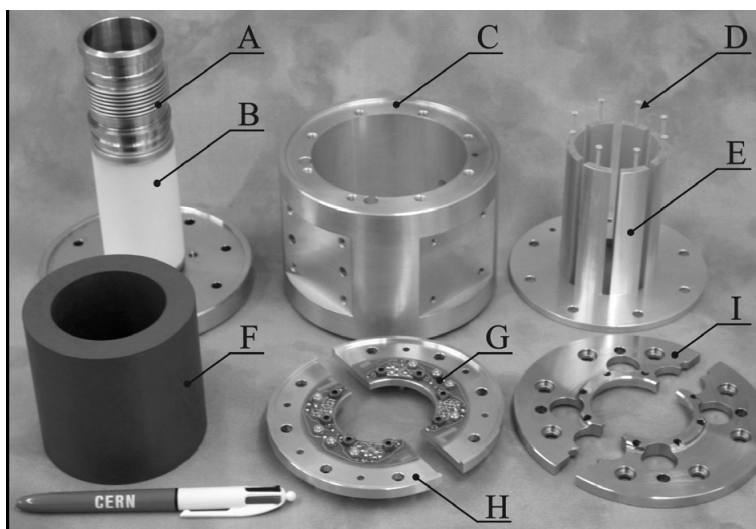


Σχήμα 5.1: Η χρονική δομή της ακτίνας της δέσμης-οδηγού του CTF3.[13]

Ένας Αισθητήρας Θέσης για μια τέτοια ακτίνα θα έπρεπε να έχει μία χαμηλή συχνότητα αποκοπής στην περιοχή των kHz για να περιορίσει τις βυθίσεις του σήματος. Επίσης, να διαθέτει υψηλή συχνότητα αποκοπής άνω των 100 MHz, για να παρατηρούνται οι γρήγορες κινήσεις της ακτίνας και αγωγιμότητα διαμήκους σύζευξης Z_c που να είναι χαμηλή στην περιοχή των GHz. Αυτές οι απαιτήσεις υπαγόρευαν σημαντικές βελτιώσεις πάνω στους αισθητήρες του πειράματος LEP, από τους οποίους προήλθε και ο σχεδιασμός για τους συγκεκριμένους Επαγωγικούς Αισθητήρες.

Τα συστατικά ενός Επαγωγικού Αισθητήρα και η συνδεσμολογία των κομματιών από τα οποία απαρτίζεται φαίνονται στα Σχήματα 5.2 και 5.3, αντίστοιχα. Τα οχτώ ηλεκτρόδια E έχουν μια εσωτερική διάμετρο μόλις 9 mm μεγαλύτερη από το θάλαμο κενού των 40 mm και καλύπτουν το 75% της περιμέτρου, με σκοπό να κάνουν τον Επαγωγικό Αισθητήρα όσο το δυνατόν περισσότερο διάφανο, για να ελαχιστοποιηθεί η Z_c . Ο κεραμικός σωλήνας B της κατασκευής κενού A βιδώνεται στο σπείρωμα της διαμέτρου. Αυτός ο σωλήνας είναι επικαλυμμένος με τιτάνιο στο εσωτερικό του. Τα ηλεκτρόδια καλύπτονται από τον κύλινδρο F, κατασκευασμένο από φερρίτη, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο σώμα C. Στις πλάκες H ακουμπούν τα PCBs² G, στα οποία φορτώνονται οι μετασχηματιστές. Ένας κοχλίας D περνάει μέσω κάθε δακτυλίου μετασχηματιστή, συνδέοντας ένα ηλεκτρόδιο E με

²PCBs: Πολυχλωριωμένα διφαινύλια (Polychlorinated biphenyls).



Σχήμα 5.2: Τα κομμάτια από τα οποία απαρτίζεται ένας Επαγωγικός Αισθητήρας.[13]

μια πλάκα H. Οι βίδες I σφίγγουν τις πλάκες H. Για να επιτευχθούν χαμηλές αποκρίσεις συχνότητας από το κύκλωμα, οι παρασιτικές αντιστάσεις του πρωτεύοντος κυκλώματος έπρεπε να κρατηθούν χαμηλότερες από 1 mΩ και ως αποτέλεσμα, το σώμα C, τα ηλεκτρόδια E και οι πλάκες H είναι φτιαγμένα από χαλκό. Οι πλάκες, καθώς και οι βίδες D που είναι φτιαγμένες από χαλκό βηρυλλίου, έχουν επιχρυσωθεί. Τα ηλεκτρόδια και η βοηθητική τους πλάκα είναι φτιαγμένα ως ενιαίο κομμάτι, με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι αντιστάσεις λόγω επαφών μεταξύ των μικρών επιφανειών και για να επιτευχθεί υψηλή μηχανολογική ακρίβεια.

Οι τέσσερις έξοδοι του Επαγωγικού Αισθητήρα συνδέονται στο Ενεργό Υβριδικό Κύκλωμα AHC, το οποίο ακολουθείται από ενισχυτές τοποθετημένους σε ένα κοινό περίβλημα. Οι ενισχυτές έχουν δύο βαθμίδες κέρδους που μπορούν να ρυθμιστούν από απόσταση. Ενισχύουν τα σήματα Δ και Σ σε ένα επίπεδο κατάλληλο για να μπορούν να σταλούν μέσω καλωδίων μεγάλου μήκους στο δωμάτιο εξοπλισμού.

Το συνολικό κατοπτρικό ρεύμα της δέσμης πρέπει να περάσει μέσω των μετασχηματιστών. Ως αποτέλεσμα, ο Επαγωγικός Αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόλυτη μέτρησή του. Για να ρυθμιστεί ο Αισθητήρας για αυτόν το σκοπό, κάθε μετασχηματιστής έχει μια σπείρα ρύθμισης που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει έναν παλμό ρεύματος με πλάτος, το οποίο, επίσης, είναι ανεξάρτητο από τις παρασιτικές αντιστάσεις των καλωδίων και των συνδέσεων. Παρόμοιοι παλμοί χρησιμοποιούνται για να δοκιμαστούν τα κανάλια Δ και Σ για να ρυθμιστούν οι βαθμίδες κέρδους

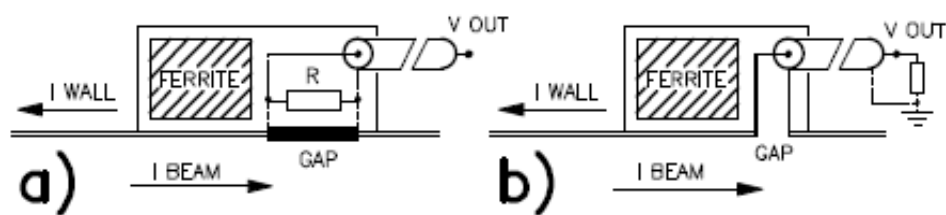


Σχήμα 5.3: Ο Επαγωγικός Αισθητήρας συναρμολογημένος. Στο μπροστινό μέρος υπάρχουν τέσσερις εξοδοί και δύο εισοδοί βαθμονόμησης.[13]

τους και για να ελεγχθεί το $CMRR^3$, εφαρμόζοντας παρόμοια σήματα στους μετασχηματιστές των αντίθετων ζευγαριών ηλεκτροδίων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, μιας και τα Ενεργά Υβριδικά Κυκλώματα είναι σε απόσταση μόλις ενός μέτρου από τη δέσμη και εκτίθενται σε ακτινοβολία.

5.3 Οι Αισθητήρες Εντοίχιου Ρεύματος, WCMs

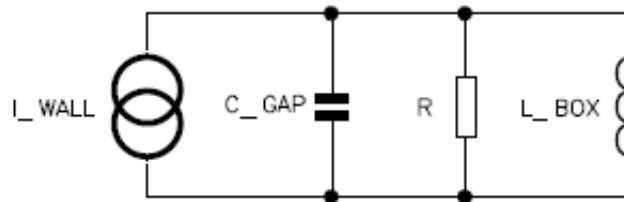
Η γενική αρχή του Αισθητήρα Εντοίχιου Ρεύματος (Wall Current Monitor-WCM) είναι πολύ απλή. Μια αντίσταση έχει συνδεθεί, είτε απευθείας (Σχήμα 5.4(a)), είτε μέσω ενός καλωδίου (Σχήμα 5.4(b)), στην άκρη του σωλήνα κενού.



Σχήμα 5.4: Η αρχή λειτουργίας του Αισθητήρα Εντοίχιου Ρεύματος WCM.[14]

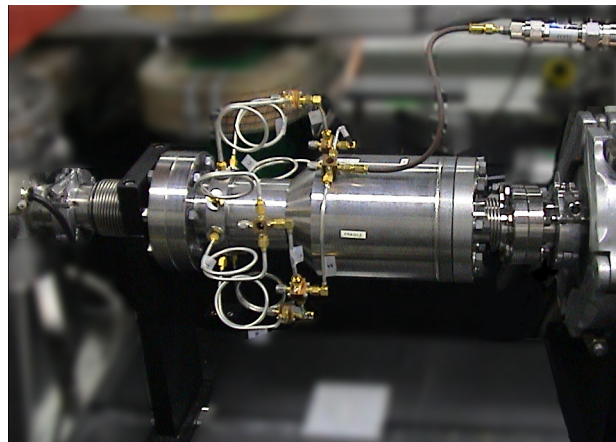
³Λόγος Απόρριψης Κοινού Σήματος (Common Mode Rejection Ratio-CMRR): Η ικανότητα ενός τελεστικού ενισχυτή να απορρίπτει κοινά σήματα. Ορίζεται ως: $CMRR = |A|/|A_{cm}|$, όπου A είναι το διαφορικό κέρδος και A_{cm} το κέρδος κοινού σήματος.[7]

Το κατοπτρικό ρεύμα, το οποίο συνοδεύει τη δέσμη κατά μήκος του εσωτερικού του σωλήνα κενού, δημιουργεί μια τάση στην αντίσταση. Ένα κουτί ελέγχου γεμισμένο με μαγνητικό υλικό, συνήθως φερρίτη, έχει συνδεθεί ηλεκτρικά στις δύο πλευρές για να αναγκάζει το κατοπτρικό ρεύμα να περνάει μέσω της αντίστασης. Το ισοδύναμο κύκλωμα μιας τέτοιας διάταξης δείχνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Το ισοδύναμο κύκλωμα του Αισθητήρα Εντοίχιου Ρεύματος WCM.[14]

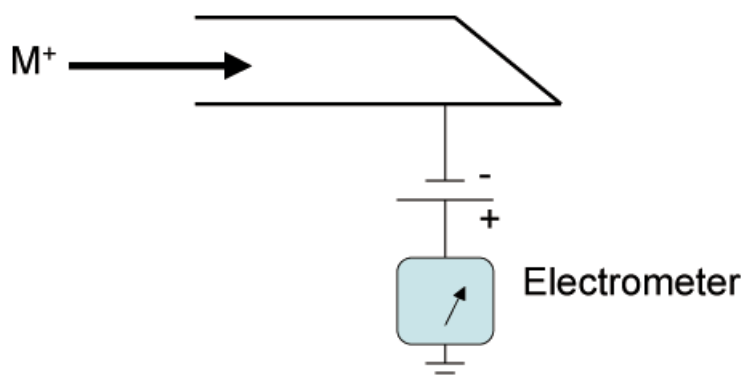
Η εξάρτηση του παρατηρούμενου σήματος από την ακτινική θέση της δέσμης ελαχιστοποιείται συλλέγοντας και προσθέτοντας το κατοπτρικό ρεύμα σε οχτώ σημεία γύρω από την περίμετρο του χάσματος, χρησιμοποιώντας οχτώ περάσματα και έναν εξωτερικό συνδυαστή.



Σχήμα 5.6: Αισθητήρας Εντοίχιου Ρεύματος όπως είχε σχεδιαστεί για τη Δεύτερη Πειραματική Διάταξη του Συμπαγούς Γραμμικού Επιταχυντή, CTF2.[14]

5.4 Ο κλωβός του Faraday

Ένας κλωβός Faraday είναι ένα μεταλλικό (αγώγιμο) κύπελλο που έχει σχεδιαστεί για να δεσμεύει φορτισμένα σωματίδια που βρίσκονται στο κενό. Το ρεύμα που προκύπτει μπορεί να μετρηθεί και να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί ο αριθμός των ιόντων ή των ηλεκτρονίων που προσκρούουν στο κύπελλο. Ο κλωβός Faraday φέρει το όνομα του Michael Faraday⁴ που πρώτος υποστήριξε θεωρητικά την ύπαρξη των ιόντων γύρω στο 1830.



Σχήμα 5.7: Σχέδιο του Κλωβού Faraday.[8]

Όταν μια δέσμη ή μια ομάδα ιόντων χτυπήσει το μέταλλο, αυτό αποκτά ένα μικρό πλέγμα φορτίου καθώς τα ιόντα ουδετεροποιούνται. Το μέταλλο μπορεί τότε να αποφορτιστεί με σκοπό να μετρηθεί ένα μικρό ρεύμα το οποίο θα είναι ισοδύναμο με τον αριθμό των προσκρούοντων ιόντων. Αναγκαστικά, τον κλωβό Faraday αποτελεί μέρος ενός κυκλώματος όπου τα ιόντα είναι οι φορείς του φορτίου στο κενό. Ο κλωβός Faraday είναι η διεπαφή με το συμπαγές μέταλλο όπου τα ηλεκτρόνια λειτουργούν ως φορείς του φορτίου (όπως, άλλωστε, συμβαίνει και με τα περισσότερα κυκλώματα). Μετρώντας το ηλεκτρικό ρεύμα στο μεταλλικό κομμάτι του κυκλώματος, μπορεί να καθοριστεί ο αριθμός του φορτίου που μεταφέρεται από τα ιόντα στο μέρος του κενού. Για μια συνεχόμενη ροή δέσμης ιόντων ισχύει: $N/t = I/e$, όπου είναι ο αριθμός των ιόντων που παρατηρούνται σε χρόνο t , I είναι το μετρούμενο ρεύμα και e είναι το ηλεκτρονικό φορτίο. Έτσι λοιπόν, ένα μετρούμενο ρεύμα 1 nA αντιστοιχεί σε περίπου 6 δισεκατομμύρια ιόντα που προσκρούουν στον κλωβό Faraday κάθε δευτερόλεπτο.

Αντίστοιχα, ένας κλωβός Faraday μπορεί να λειτουργήσει ως συλλέκτης ηλεκτρονίων στο κενό. Σε αυτήν την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια απλά χτυ-

⁴Michael Faraday: Άγγλος Φυσικός και Χημικός (1791–1867). Συνέβαλε σημαντικά στα επιστημονικά πεδία του Ηλεκτρομαγνητισμού και της Ηλεκτροχημείας. Γνωστός μεταξύ άλλων για το Νόμος Επαγωγής, το φαινόμενο Faraday και το Κύπελλο Faraday. Ο Einstein τον θεωρούσε αντάξιο του Isaac Newton και του James Clerk Maxwell.[8]



Σχήμα 5.8: Κλωβός Faraday με μια πλάκα πίεσης των ηλεκτρονίων στο εμπρόσθιο μέρος.[8]

πούν τη μεταλλική πλάκα/κλωβό και παράγεται κάποιο ρεύμα. Οι κλωβοί Faraday δεν είναι τόσο ευαίσθητοι όσο οι ανιχνευτές ηλεκτρονίων, αλλά θεωρούνται αρκετά αξιόπιστοι λόγω της σαφούς σχέσης μεταξύ του μετρούμενου ρεύματος και του αριθμού των ιόντων.

Συλλογή Δεδομένων και Μελέτη των Γραφημάτων με τη Δέσμη σε Πλήρη Ισχύ

6.1 Εισαγωγή

Μετά την παρουσίαση του περιβάλλοντος στο οποίο εκπονήθηκε η συγκεκριμένη εργασία, ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της δουλειάς που επιτελέστηκε, με τελικό σκοπό τη δημιουργία του χάρτη απωλειών για το σύμπλεγμα του CTF3.

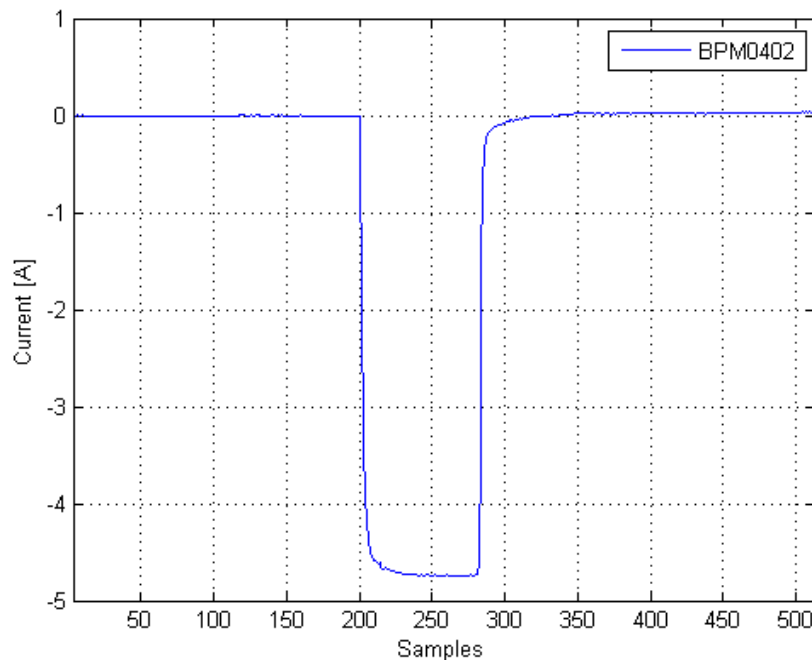
Πρώτα βήματα για τη μελέτη αποτέλεσαν η συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες της διάταξης και η μελέτη των γραφημάτων από αυτά τα στοιχεία. Αυτά τα βήματα περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο. Τα επόμενα βήματα παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια και είναι η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων, ο υπολογισμός των καινούργιων παραγόντων βαθμονόμησης τους και η χαρτογράφηση των απωλειών ρεύματος στη διάταξη.

6.2 Γραφήματα ρεύματος-χρόνου κατά την πλήρη μετάδοση

6.2.1 Δεδομένα από το γραμμικό τμήμα του επιταχυντή (linac part)

Στο γραμμικό τμήμα του επιταχυντή (linac part), το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1, είναι εγκατεστημένοι 13 αισθητήρες για τον εντοπισμό της θέσης της δέσμης. Ως πρώτο βήμα, χρειάστηκε να γραφτεί κώδικας σε Matlab ο οποίος διαβάζει τις τιμές των ρευμάτων από τους αισθητή-

ρες κατά την πλήρη μετάδοση δέσμης¹. Με τη χρήση Matlab και κατάλληλου κώδικα, προέκυψε το γράφημα του Σχήματος 6.1 για τον πρώτο αισθητήρα του γραμμικού τμήματος και από μία μόνο μέτρηση ρεύματος.

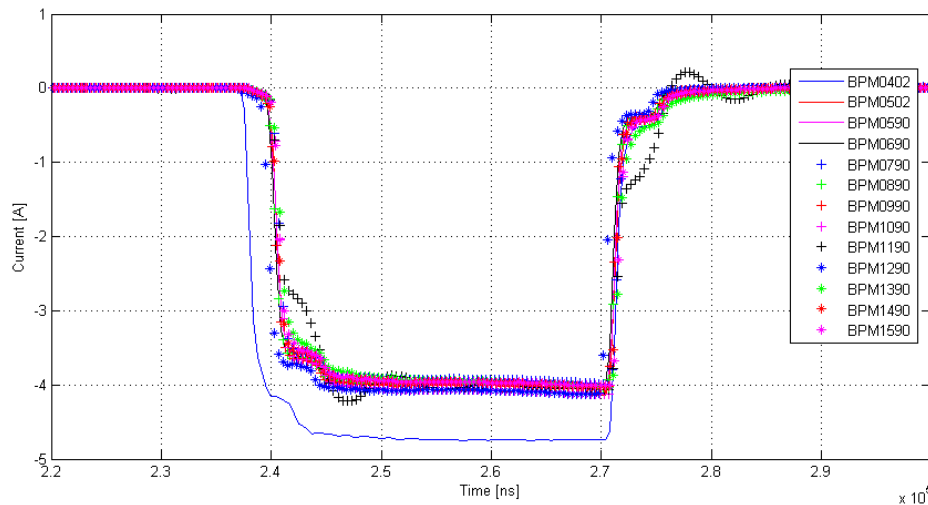


Σχήμα 6.1: Το ρεύμα που μετρήθηκε στον Αισθητήρα BPM0402 του γραμμικού τμήματος για μία, μόνο, συλλογή δεδομένων. Ρυθμός δειγματοληψίας: 512 δείγματα/δευτερόλεπτο.

Η συλλογή δεδομένων έγινε για καθέναν από τους 13 αισθητήρες του γραμμικού τμήματος, με τη διάταξη να λειτουργεί σε πλήρη ισχύ. Για κάθε αισθητήρα πραγματοποιήθηκαν δεκατρείς επαναλήψεις αυτής της διαδικασίας συλλογής δεδομένων. Τα στοιχεία των μετρήσεων αποθηκεύθηκαν σε κατάλληλα αρχεία², ούτως ώστε να υπάρχει ασφάλεια στην εξαγωγή συμπερασμάτων και, όσο το δυνατόν, μικρότερα στατιστικά σφάλματα. Ο μέσος όρος αυτών των δεκατριών μετρήσεων, για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, σχεδιάζεται στο γράφημα του Σχήματος 6.2.

¹Πλήρης μετάδοση δέσμης: Κατά την πλήρη μετάδοση δέσμης, η διάταξη λειτουργεί σε πλήρη ισχύ και το ρεύμα της δέσμης είναι το μέγιστο δυνατό.

².mat files



Σχήμα 6.2: Ο μέσος όρος των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας του γραμμικού τμήματος της διάταξης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος, υπολογισμένος από το ρυθμό δειγματοληψίας.

6.2.2 Δεδομένα από το τμήμα TL1 της διάταξης

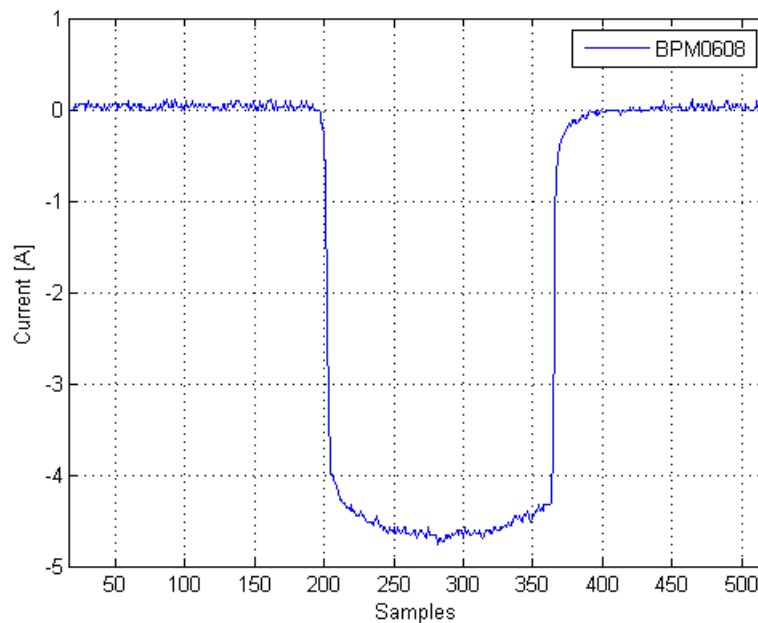
Ακολούθησε η συλλογή δεδομένων από το τμήμα TL1 του συμπλέγματος CTF3. TL1 είναι η ονομασία που δόθηκε στο κομμάτι του επιταχυντή λίγο πριν το μαγνητικό chicane και μέχρι το βρόχο καθυστέρησης (Σχήμα 4.1). Η συλλογή δεδομένων για το τμήμα TL1 έγινε με την ίδια μέθοδο που ακολουθήθηκε στο γραμμικό τμήμα.

Δέκα επαναλήψεις συλλογής δεδομένων, για καθέναν από τους επτά αισθητήρες του συγκεκριμένου τμήματος και εξαγωγή των μέσων τιμών, είχαν ως αποτέλεσμα το γράφημα που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.

6.2.3 Δεδομένα από το Δακτύλιο Συνδυασμού (Combiner Ring)

Στη συνέχεια, έγινε συλλογή τιμών ρεύματος από το Δακτύλιο Συνδυασμού της διάταξης (Σχήμα 4.1). Ο Δακτύλιος Συνδυασμού έχει εγκατεστημένους είκοσι πέντε Αισθητήρες Εντοπισμού Θέσης της Δέσμης.

Το γράφημα του Σχήματος 6.6 προέκυψε μετά από τριάντα έξι επαναλήψεις συλλογής δεδομένων και υπολογισμό των μέσων τιμών ρεύματος.



Σχήμα 6.3: Το ρεύμα που μέτρησε ο Αισθητήρας BPM0608 του τμήματος TL1, για μία μόνο συλλογή δεδομένων. Ρυθμός δειγματοληψίας: 2048 δείγματα/δευτερόλεπτο.

6.3 Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακριβειών στους Αισθητήρες

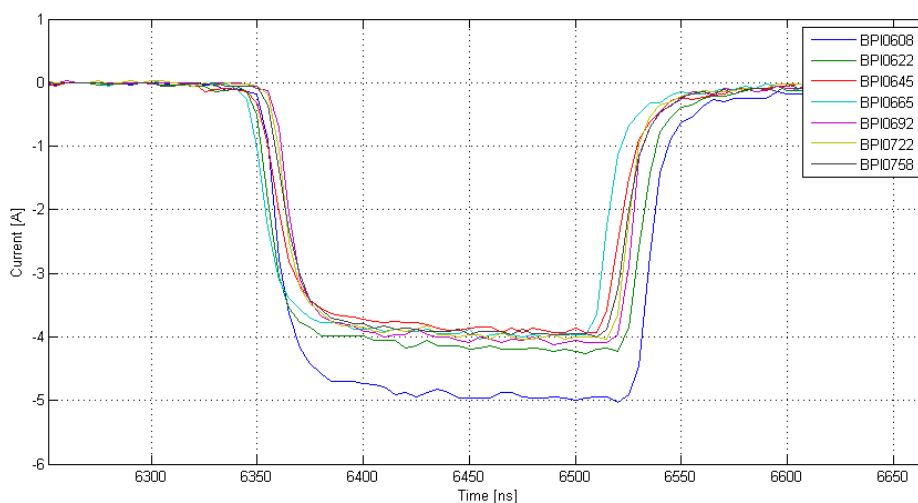
6.3.1 Ανάλυση γραφημάτων του γραμμικού τμήματος (linac part)

Αφού έγινε η συλλογή των δεδομένων μέσω της Matlab, ακολούθησε η μελέτη των γραφημάτων. Από το Σχήμα 6.2 δεν είναι εφικτή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τις πιθανές ανακριβείες των αισθητήρων, αφού η κλίμακα με την οποία αποτυπώνονται τα δεδομένα είναι αρκετά μεγάλη. Με μία γρήγορη ματιά, όμως, φαίνεται πως ο αισθητήρας BPM1190 (μαύρος σταυρός στο γράφημα) παρουσιάζει κάποια διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τους υπόλοιπους αισθητήρες του γραμμικού τμήματος. Πιθανή αιτία αυτής της συμπεριφοράς είναι κάποιο πρόβλημα στο υλικό (hardware) του συγκεκριμένου Αισθητήρα, γεγονός που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

Επομένως, είναι απαραίτητο να σχεδιαστούν γραφήματα, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις τιμές του ρεύματος, για την ανάλυση και τη μελέτη της συμπεριφοράς των αισθητήρων.

Με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων του Σχήματος 6.2 στη Matlab, αποτυπώνονται με λεπτομέρεια οι τιμές των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε

6.3 Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακριβειών στους Αισθητήρες⁴⁰



Σχήμα 6.4: Ο μέσος όρος των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας του τμήματος TL1 της διάταξης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος, υπολογισμένος από το ρυθμό δειγματοληψίας.

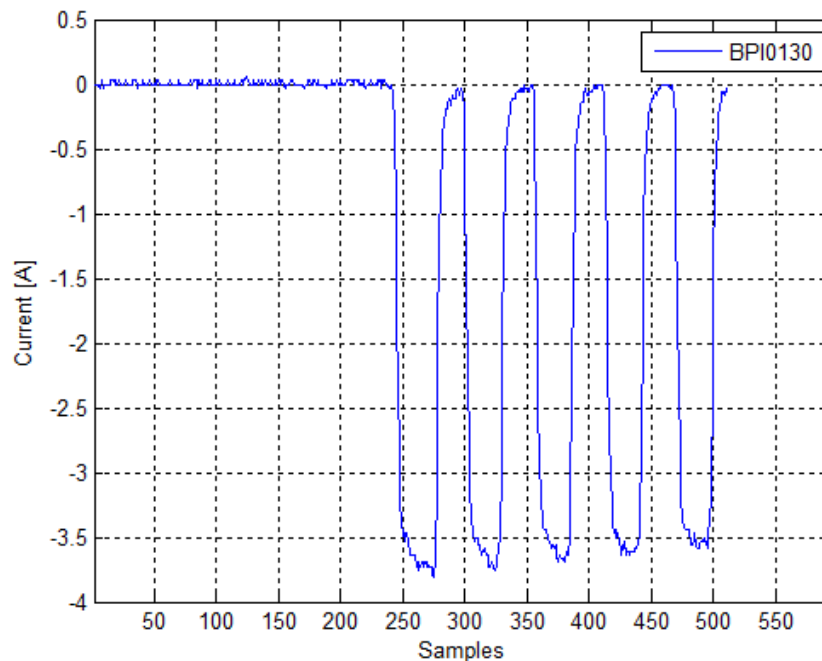
αισθητήρας του γραμμικού τμήματος. Έτσι, λοιπόν, η μελέτη γίνεται μέσω του Σχήματος 6.7. Το κύριο κριτήριο για την ορθότητα των μετρήσεων του κάθε αισθητήρα είναι να απεικονίζει μικρότερη τιμή ρεύματος από τον προηγούμενό του³ στη διάταξη.

Ξεκινώντας από τον πρώτο Αισθητήρα BPM0402, φαίνεται ότι από τη μία έχει μετρήσει, σωστά, το περισσότερο ρεύμα, αλλά από την άλλη, το ρεύμα αυτό είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από τα ρεύματα όλων των υπόλοιπων. Για αρχή, θεωρούμε πως έχει σωστή βαθμονόμηση. Ο BPM0502 δείχνει να μετράει σωστά το ρεύμα, μιας και είναι ο αμέσως επόμενος και σε σειρά, αλλά και στο γράφημα των ρευμάτων. Μόνο ο BPM1290 έχει μετρήσει κάποιες τιμές μεγαλύτερες από αυτόν, γεγονός που κατατάσσει τον BPM1290 στους υπό βαθμονόμηση Αισθητήρες. Κρίνοντας από το σωστό ρεύμα που απεικονίζει ο BPM0502, ο BPM0590 που είναι ο αμέσως επόμενός του, σαφώς χρειάζεται βαθμονόμηση μιας και το ρεύμα που μετράει είναι αδικαιολόγητα μικρό. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για τον Αισθητήρα BPM0690, αφού το ρεύμα του είναι πολύ μικρότερο του αναμενόμενου. Άρα και ο BPM0690 χρειάζεται βαθμονόμηση.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο Αισθητήρας BPM0790, ο οποίος απεικονίζει το μικρότερο ρεύμα στο γράφημα, πράγμα το οποίο δεν μπορεί να αποτελέσει σωστή μέτρηση, μιας και ο συγκεκριμένος Αισθητήρας είναι πολύ πριν το τέλος του γραμμικού τμήματος. Επομένως, και στην περίπτωση

³ Η σειρά των Αισθητήρων στη διάταξη φαίνεται στο πάνω δεξιό μέρος των γραφημάτων.

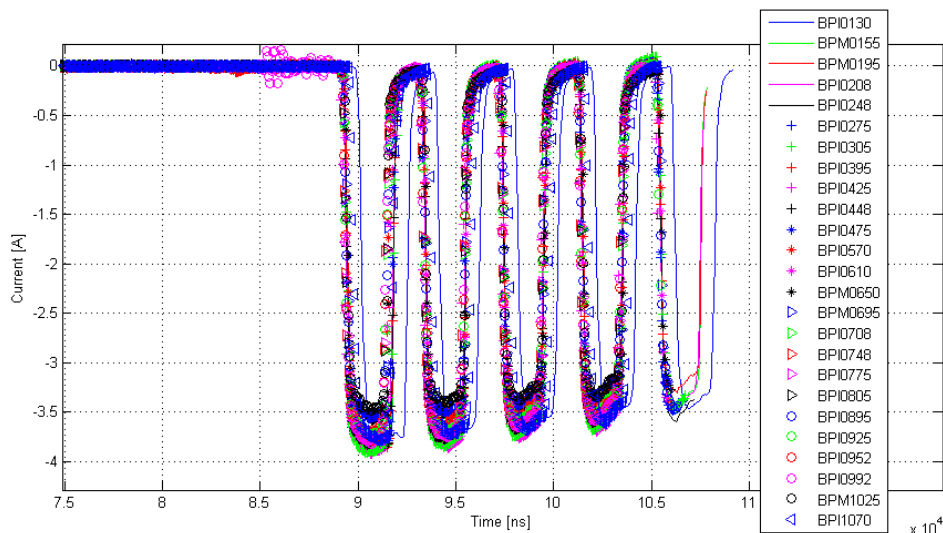
6.3 Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακρίβειών στους Αισθητήρες41



Σχήμα 6.5: Το ρεύμα που μέτρησε ο Αισθητήρας BPI0130 του Δακτυλίου Συνδυσασμού, για μία μόνο συλλογή δεδομένων. Η ιδιαίτερη μορφή του ρεύματος οφείλεται στους κύκλους που διαγράφει η δέσμη στο Δακτύλιο. Οι κύκλοι αυτοί συντελούν στο να πυκνώσει χρονικά η δέσμη και να αυξηθεί η ενέργειά της. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η δέσμη διαγράφει πέντε κύκλους. Ρυθμός δειγματοληψίας: 512 δείγματα/δευτερόλεπτο.

του BPM0790 απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Οι αισθητήρες BPM0890 και BPM0990 βρίσκονται στο μέσο περίπου του γραμμικού τμήματος και πολύ σωστά, σύμφωνα με τη θέση τους, μετρούν ρεύμα που έχει τιμές στο μέσο του γραφήματος. Όσον αφορά τον επόμενο αισθητήρα, BPM1090, το μετρούμενο ρεύμα του είναι μεγαλύτερο από τους δύο προηγούμενους στη σειρά αισθητήρες BPM0890 και BPM0990 και, μάλιστα, έχει παρεμφερή τιμή με το BPM0502 που είναι δεύτερος σε σειρά. Οπότε και ο BPM1090 θα πρέπει να περάσει τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Η περίπτωση του Αισθητήρα BPM1190 αναφέρθηκε και προηγουμένως ως πρόβλημα στο υλικό. Θα μελετηθεί και αυτός αργότερα. Ο Αισθητήρας BPM1290, αν και βρίσκεται στο τέλος περίπου της σειράς, μετράει ρεύμα πολύ υψηλότερο απ' ό,τι θα περίμενε κανείς και, μάλιστα, σε πολύ υψηλά επίπεδα τιμών. Επομένως απαιτείται διερεύνηση και για το BPM1290. Τέλος, οι τρεις τελευταίοι αισθητήρες του γραμμικού τμήματος BPM1390, BPM1490 και BPM1590, μετρούν το ίδιο ρεύμα (με διαφορές μεταξύ τους, στα όρια του στατιστικού

6.3 Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακρίβειών στους Αισθητήρες42



Σχήμα 6.6: Ο μέσος όρος των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας του Δακτυλίου Συνδυασμού της διάταξης. Στον οριζόντιο άξονα φαίνεται ο χρόνος, υπολογισμένος από το ρυθμό δειγματοληψίας.

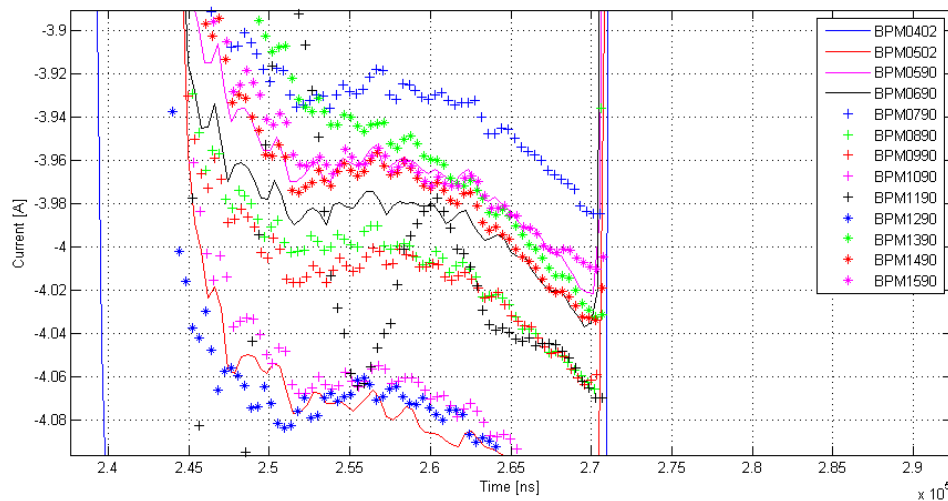
σφάλματος) και, έτσι, κρίνονται σωστά βαθμονομημένοι.

Προς επιβεβαίωση των παραπάνω συμπερασμάτων, υπολογίστηκε και ο λόγος της τιμής του ρεύματος ενός αισθητήρα ως προς τις τιμές των ρευμάτων που μέτρησαν οι υπόλοιποι αισθητήρες. Για παράδειγμα, ο λόγος του ρεύματος του BPM0790 ως προς ρεύματα των υπόλοιπων, απεικονίζεται στο Σχήμα 6.8. Δείχνει ότι ο συγκεκριμένος αισθητήρας όντως έχει πρόβλημα βαθμονόμησης, μιας και όλοι οι λόγοι των υπόλοιπων αισθητήρων ως προς τον BPM0790 είναι μεγαλύτεροι από το 1, δηλαδή έχουν ρεύματα μεγαλύτερα από τον BPM0790. Αυτό φυσικά, δεν μπορεί να είναι σωστό κρίνοντας από τη θέση του και σαν αποτέλεσμα, όντως ο BPM0790 πρέπει να περάσει τη διαδικασία βαθμονόμησης.

6.3.2 Ανάλυση γραφημάτων του τμήματος TL1

Από το Σχήμα 6.4 φαίνεται αμέσως ότι ο αισθητήρας BPI0608 καταγράφει τιμές ρεύματος κατά 1 A περίπου μεγαλύτερες από τις τιμές των υπόλοιπων αισθητήρων. Επειδή το τμήμα TL1 περιλαμβάνει λίγους, σε αριθμό, αισθητήρες, κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθούν όλοι ως προς τη βαθμονόμησή τους. Η διαδικασία της βαθμονόμησης, για όλους τους αισθητήρες του τμήματος TL1, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7 της εργασίας.

6.3 Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακρίβειών στους Αισθητήρες⁴³

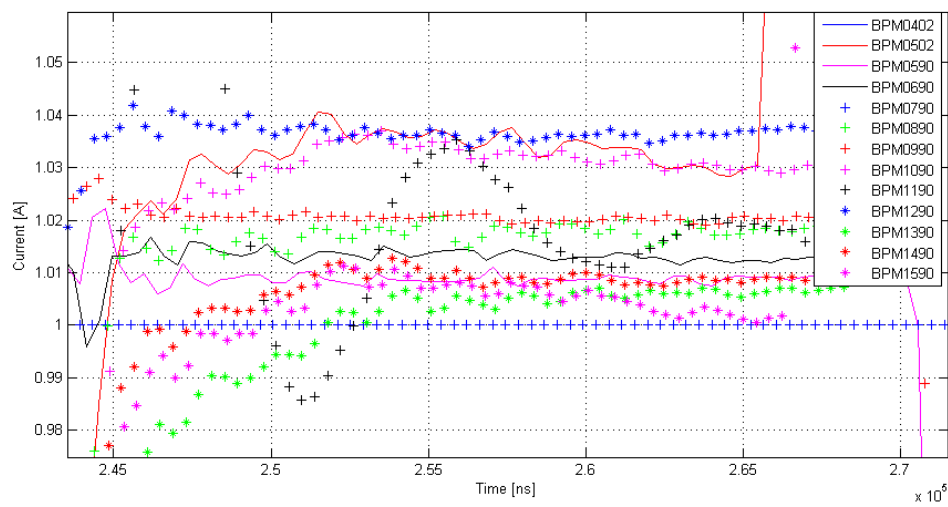


Σχήμα 6.7: Λεπτομέρεια του γραφήματος των ρευμάτων που μέτρησαν οι αισθητήρες του γραμμικού τμήματος της διάταξης. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εύκολη η εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων για τη σωστή ή λανθασμένη βαθμονόμηση των αισθητήρων του γραμμικού τμήματος.

6.3.3 Ανάλυση γραφημάτων του Δακτυλίου Συνδυασμού (Combiner Ring)

Για το γραμμικό τμήμα της διάταξης, έγινε μελέτη των Αισθητήρων καθενός από τους αισθητήρες ξεχωριστά, μέσω του γραφήματος των ρευμάτων, με σκοπό να εντοπιστούν οι ανακρίβειές τους και ποιοι από αυτούς πρέπει να περάσουν τη διαδικασία της βαθμονόμησης. Στο Δακτύλιο Συνδυασμού, όπως και στο τμήμα TL1 της διάταξης, επιλέχθηκε να περάσουν από βαθμονόμηση όλοι οι αισθητήρες. Για το Δακτύλιο Συνδυασμού συγκεκριμένα, λόγω των πολυάριθμων αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι, δεν ήταν δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων από το γράφημα των μέσων όρων των ρευμάτων (Σχήμα 6.6). Σαν αποτέλεσμα, όλοι οι Αισθητήρες και σε αυτό το τμήμα πέρασαν τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

6.3 Μελέτη γραφημάτων και εντοπισμός ανακρίβειών στους Αισθητήρες44



Σχήμα 6.8: Ο λόγος του ρεύματος του BPM0790 ως προς τα ρεύματα των υπόλοιπων αισθητήρων του γραμμικού τμήματος. Επειδή οι λόγοι των υπόλοιπων αισθητήρων είναι μεγαλύτεροι της μονάδας, ο BPM0790 θα πρέπει να περάσει τη διαδικασία της βαθμονόμησης.

Διαδικασία Βαθμονόμησης των Αισθητήρων και Καινούργιοι Συντελεστές Βαθμονόμησης

7.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η διαδικασία συλλογής των δεδομένων από τους αισθητήρες και η μελέτη των γραφημάτων με τα ρεύματα που μετρήθηκαν. Το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία της βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Για το γραμμικό τμήμα της διάταξης η διαδικασία της βαθμονόμησης θα γίνει για ορισμένους από τους αισθητήρες μετά από μελέτη των γραφημάτων. Οι αισθητήρες του γραμμικού τμήματος των οποίων οι μετρήσεις κρίθηκαν ανακριβείς είναι οι: BPM0590, BPM0690, BPM0790, BPM1090, BPM1190 και BPM1290.

Για το τμήμα TL1 του CTF3 κρίθηκε σκόπιμο να περάσουν όλοι οι αισθητήρες από τη διαδικασία βαθμονόμησης. Οι αισθητήρες του τμήματος TL1 είναι οι: BPI0608, BPI0622, BPI0645, BPI0665, BPI0722 και BPI0758.

Τέλος, για το Δακτύλιο Συνδυασμού, όλοι οι αισθητήρες πέρασαν από τη διαδικασία βαθμονόμησης. Οι αισθητήρες για το Δακτύλιο Συνδυασμού είναι οι: BPI0130, BPM0155, BPM0195, BPI0208, BPI0248, BPI0275, BPI0305, BPI0395, BPI0425, BPI0448, BPI0475, BPI0570, BPI0610, BPM0650, BPM0695, BPI0708, BPI0748, BPI0775, BPI0805, BPI0895, BPI0925, BPI0952, BPI0992, BPM1025 και BPI1070.

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης των παραπάνω αισθητήρων και υπολογίζονται οι νέοι συντελεστές βαθμονόμησης τους.

7.2 Περιγραφή της Διαδικασίας Βαθμονόμησης

Η διαδικασία βαθμονόμησης έχει ως εξής: Ένα σήμα βαθμονόμησης (calibration signal) εφαρμόζεται ως είσοδος σε κάθε αισθητήρα. Μια γεννήτρια σημάτων (Σχήμα 7.1), συνδεέται με την ειδική είσοδο βαθμονόμησης του αισθητήρα. Το σήμα έχει ένταση ρεύματος 300 mA. Η καμπύλη του σήματος βαθμονόμησης φαίνεται στο Σχήμα 7.2. Το σήμα αυτό αποτυπώνεται στον παλμογράφο, ο οποίος έχει συνδεθεί με τη γεννήτρια, με σκοπό να ελεγχθεί η ορθότητά του. Με τη χρησιμοποίηση του κώδικα συλλογής δεδομένων σε Matlab¹, καταγράφονται² οι τιμές των ρευμάτων που μετρά ο αισθητήρας για χρονικό διάστημα 6–10 λεπτών. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών των ρευμάτων που μέτρησε ο κάθε αισθητήρας. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέση τιμή των ρευμάτων υπολογίζονται οι νέοι συντελεστές βαθμονόμησης των αισθητήρων.



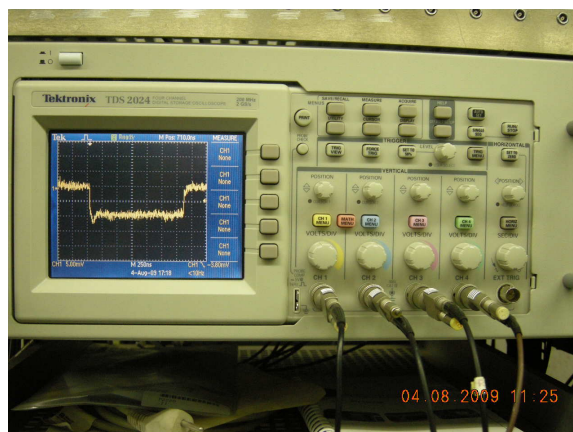
Σχήμα 7.1: Φωτογραφία των αισθητήρων (στο αριστερό μέρος) και της γεννήτριας σημάτων (πάνω δεξιά).

7.3 Οι Καινούργιοι Συντελεστές Βαθμονόμησης

Κάθε αισθητήρας της διάταξης έχει έναν συντελεστή βαθμονόμησης (scaling factor) ως παράμετρο ρύθμισης της λειτουργίας του. Για τη διόρθωση της ανακριβούς βαθμονόμησης του αισθητήρα, πρέπει να διορθωθεί ο συντελεστής βαθμονόμησης. Οι παράμετροι αυτές βρίσκονται στη βάση δεδομένων

¹Είναι ο ίδιος κώδικας που χρησιμοποιήθηκε και για τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες κατά την πλήρη μετάδοση της δέσμης.

²Αποθήκευση των τιμών των ρευμάτων σε ένα αρχείο .txt.



Σχήμα 7.2: Φωτογραφία του παλμογράφου κατά τη μέτρηση του σήματος βαθμονόμησης από τη γεννήτρια. Στην οθόνη φαίνεται και η καμπύλη του σήματος βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία.

του πειράματος³. Επομένως, θα υπολογιστούν οι νέοι, σωστοί, συντελεστές βαθμονόμησης και θα αντικαταστήσουν τους παλιούς και λανθασμένους, στη βάση δεδομένων του CTF3.

Ο τρόπος υπολογισμού των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης έχει ως εξής: Από τις τιμές των ρευμάτων που αποθηκεύτηκαν στα αρχεία .txt υπολογίζεται η μέση τιμή των ρευμάτων κάθε αισθητήρα. Έπειτα, ανατρέχοντας στη βάση δεδομένων, καταγράφεται ο υπάρχων συντελεστής βαθμονόμησης. Για να βρεθεί ο νέος και σωστός συντελεστής βαθμονόμησης, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$[(\text{Συντελεστής Βαθμονόμησης}_{\text{παλιός}}) \times (-0.3)] / \text{Ρεύμα}_{\text{μέση τιμή}} \quad (7.1)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ποσοστό μεταβολής % μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή βαθμονόμησης:

$$\frac{[(\text{Συντελεστής Βαθμονόμησης}_{\text{νέος}} - \text{Συντελεστής Βαθμονόμησης}_{\text{παλιός}})]}{\text{Συντελεστής Βαθμονόμησης}_{\text{παλιός}}} \times 100. \quad (7.2)$$

Για να υπάρχει ένας δείκτης εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, υπολογίζεται, επίσης, ο Δείκτης Κανονικής Κατανομής των τιμών των ρευμάτων που συλλέχθηκαν και, στη συνέχεια, το Σχετικό Σφάλμα της Μέτρησης %. Το

³Το αρχείο που περιέχει όλα τα στοιχεία για τους συντελεστές βαθμονόμησης των αισθητήρων, ονομάζεται: XenericSamplerDeviceData.xml και αποτελεί μέρος της βάσης δεδομένων του πειράματος με σκοπό την κοινή χρήση από τα μέλη του.

Σχετικό Σφάλμα Μέτρησης υπολογίστηκε με τον παρακάτω τρόπο:

$$[|\Delta\epsilon\iota\kappa\tau\eta\varsigma\ \tau\upsilon\pi\iota\kappa\eta\varsigma\ \text{Απόκλισης}/\text{Ρεύμα}_{\text{μέση τιμή}}|] \times 100. \quad (7.3)$$

Τα αποτελέσματα αυτής της διαδικασίας φαίνονται στους Πίνακες 7.1, 7.2 και 7.3.

Οι συντελεστές βαθμονόμησης, τόσο για το γραμμικό τμήμα, όσο και για το τμήμα TL1, μπορούν να αντικαταστήσουν τους παλιούς συντελεστές βαθμονόμησης στη βάση δεδομένων του πειράματος. Αυτό προκύπτει ως συμπέρασμα εξετάζοντας τις τιμές της τελευταίας στήλης των Πινάκων: Όλες οι τιμές του Σχετικού Σφάλματος των Μετρήσεων είναι κοντά στο 1% για αυτά τα δύο τμήματα της διάταξης. Αυτά τα ποσοστά σφάλματος κρίνονται αρκετά μικρά για να αποτελέσουν εμπόδιο στα επόμενα βήματα της διαδικασίας.

Αντίθετα, ορισμένα από τα Σχετικά Σφάλματα των Μετρήσεων για το Δακτύλιο Συνδυασμού είναι αρκετά μεγάλα και τα περισσότερα μεγαλύτερα από το 1%. Έτσι, δεν μπορεί να γίνει αντικατάσταση των παλιών συντελεστών βαθμονόμησης για τους αισθητήρες του Δακτύλιου Συνδυασμού. Για αυτό το τμήμα της διάταξης χρειάζεται περαιτέρω μελέτη ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι νέοι συντελεστές βαθμονόμησης των αισθητήρων.

Αισθη- τήρας	Συντελεστής Βαθμονόμησης		Μεταβολή %	Τυπική Απόκλιση των Μετρήσεων	Σχετικό Σφάλμα % των Μετρήσεων
Παλιός	Νέος				
BPM0590	0.005775	0.005831	0.97	0.001270	0.43
BPM0690	0.006006	0.006026	0.34	0.002019	0.67
BPM0790	0.005809	0.005899	1.55	0.001800	0.61
BPM0890	0.006420	0.006343	-1.20	0.002000	0.64
BPM0990	0.006	0.005867	-2.22	0.001900	0.61
BPM1090	0.006	0.005877	2.06	0.001300	0.43
BPM1190	0.006	0.005940	1.00	0.003060	0.98
BPM1290	0.006	0.005820	3.00	0.002323	0.74
BPM1390	0.006	0.005855	-2.41	0.001325	0.43
BPM1490	0.006	0.005909	-1.51	0.001188	0.39
BPM1590	0.006	0.005840	-2.66	0.001686	0.55

Πίνακας 7.1: Παλιοί και νέοι συντελεστές βαθμονόμησης για το γραμμικό τμήμα του CTF3. Στον Πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, το ποσοστό μεταβολής μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και το σχετικό σφάλμα τους. Τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για το γραμμικό τμήμα είναι μικρότερα της μονάδας, γεγονός που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της διαδικασίας βαθμονόμησης.

Αισθη- τήρας	Συντελεστής Βαθμονόμησης		Μεταβολή %	Τυπική Απόκλιση των Μετρήσεων	Σχετικό Σφάλμα % των Μετρήσεων
	Παλιός	Νέος			
BPI0608	0.0303	0.0271	10.5	0.00957	1.03
BPI0622	0.0300	0.0302	0.85	0.01555	1.74
BPI0645	0.0291	0.0305	4.8	0.00844	0.96
BPI0665	0.0290	0.0298	2.7	0.01083	1.20
BPI0692	0.0294	0.0295	0.4	0.00918	1.04
BPI0722	0.0294	0.02949	0.3	0.00861	0.97
BPI0758	0.0290	0.02913	0.43	0.00903	1.01

Πίνακας 7.2: Παλιοί και νέοι συντελεστές βαθμονόμησης για το τμήμα TL1 της διάταξης. Στον Πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, το ποσοστό μεταβολής μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και το σχετικό σφάλμα τους. Τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για το τμήμα TL1 είναι πολύ μικρά, γεγονός που επιβεβαιώνει την εγκυρότητα της διαδικασίας βαθμονόμησης.

Αισθη- τήρας	Συντελεστής Βαθμονόμησης		Μεταβολή %	Τυπική Απόκλιση των Μετρήσεων	Σχετικό Σφάλμα % των Μετρήσεων
	Παλιός	Νέος			
BPI0130	0.028	0.0282	0.709	0.01132	1.27
BPM0155	0.035	0.0404	15.39	0.01679	6.46
BPM0195	0.034	0.0378	11.24	0.01171	4.34
BPI0208	0.029	0.0288	0.628	0.0093	1.03
BPI0248	0.029	0.0263	9.232	0.01282	1.29
BPI0275	0.029	0.0284	2.025	0.01497	1.63
BPI0305	0.029	0.0278	3.97	0.0120	1.28
BPI0395	0.029	0.0289	0.066	0.01454	1.61
BPI0425	0.029	0.0296	2.02	0.0071	0.81
BPI0448	0.029	0.0287	1.002	0.0149	1.64
BPI0475	0.029	0.0289	0.3	0.00694	0.77
BPI0570	0.029	0.0278	4.274	0.00898	0.95
BPI0610	0.029	0.02907	0.249	0.007997	0.89
BPM0650	0.034	0.0348	2.422	0.01692	5.78
BPM0695	0.034	0.0385	13.17	0.007997	3.02
BPI0708	0.029	0.0286	1.211	0.007707	0.85
BPI0748	0.029	0.0309	6.648	0.01169	1.39
BPI0775	0.029	0.0302	4.246	0.01425	1.65
BPI0805	0.029	0.0284	2.182	0.009843	1.07
BPI0895	0.029	0.0280	3.373	0.010842	1.16
BPI0925	0.029	0.0276	4.941	0.009251	0.98
BPI0952	0.029	0.0291	0.384	0.01518	1.69
BPI0992	0.029	0.0281	2.979	0.01394	1.5
BPM1025	0.034	0.0375	10.436	0.01115	4.11
BPI1070	0.029	0.02902	0.073	0.010005	1.12

Πίνακας 7.3: Παλιοί και νέοι συντελεστές βαθμονόμησης για το Δακτύλιο Συνδυασμού του CTF3. Στον Πίνακα παρουσιάζεται, επίσης, το ποσοστό μεταβολής μεταξύ του νέου και του παλιού συντελεστή, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων και το σχετικό σφάλμα τους. Τα σχετικά σφάλματα των μετρήσεων για το Δακτύλιο Συνδυασμού είναι μεγάλα, γεγονός που επιβάλλει περαιτέρω διερεύνηση για αυτό το τμήμα της διάταξης.

Μετρήσεις Έντασης Ρεύματος με τους Καινούργιους Συντελεστές Βαθμονόμησης

8.1 Εισαγωγή

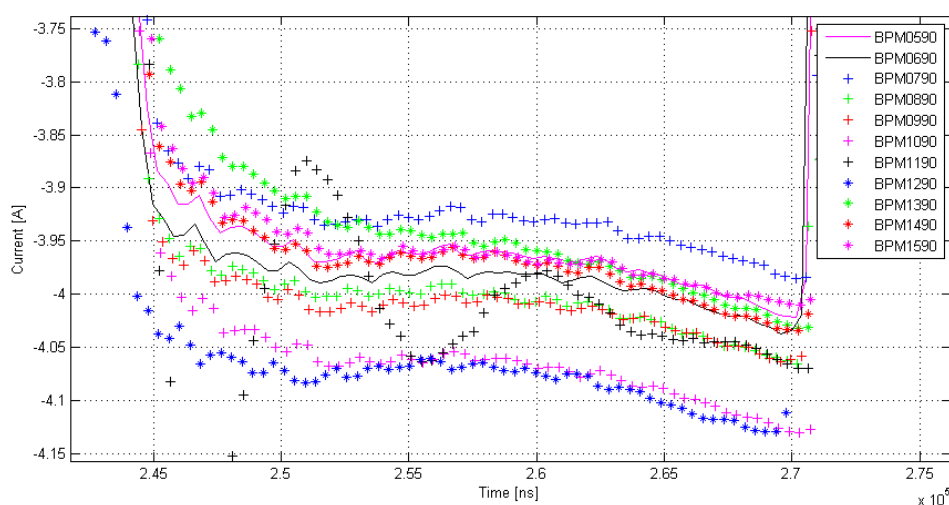
Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων και υπολογίστηκαν οι νέοι συντελεστές βαθμονόμησης τους. Στο γραμμικό τμήμα της διάταξης, όπως και στο τμήμα TL1, οι νέοι συντελεστές κρίθηκαν ακριβείς. Αντίθετα, στο Δακτύλιο Συνδυασμού, δεν βγήκαν ασφαλή συμπεράσματα. Για το λόγο αυτό, οι καινούργιοι συντελεστές βαθμονόμησης δε θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της εργασίας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η επίδραση των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης στις μετρήσεις για το γραμμικό τμήμα και το τμήμα TL1 της διάταξης. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε νέα συλλογή δεδομένων με τη δέσμη σε πλήρη ισχύ. Τα γραφήματα των ρευμάτων που μέτρησαν οι αισθητήρες φαίνονται στα Σχήματα 8.1 και 8.3. Έπειτα, στη βάση δεδομένων του πειράματος αντικαταστάθηκαν οι παλιοί συντελεστές βαθμονόμησης με τους καινούργιους συντελεστές. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 8.2 και 8.4, αυτή η αντικατάσταση διορθώνει τις προηγούμενες ανακριβείς μετρήσεις των αισθητήρων. Έτσι, οι αισθητήρες μπορούν, πλέον, να χρησιμοποιηθούν για τη σωστή μέτρηση των ρευμάτων της δέσμης και να οδηγήσουν σε ασφαλή συμπεράσματα για το ποιά είναι τα σημεία απώλειας δέσμης στη διάταξη.

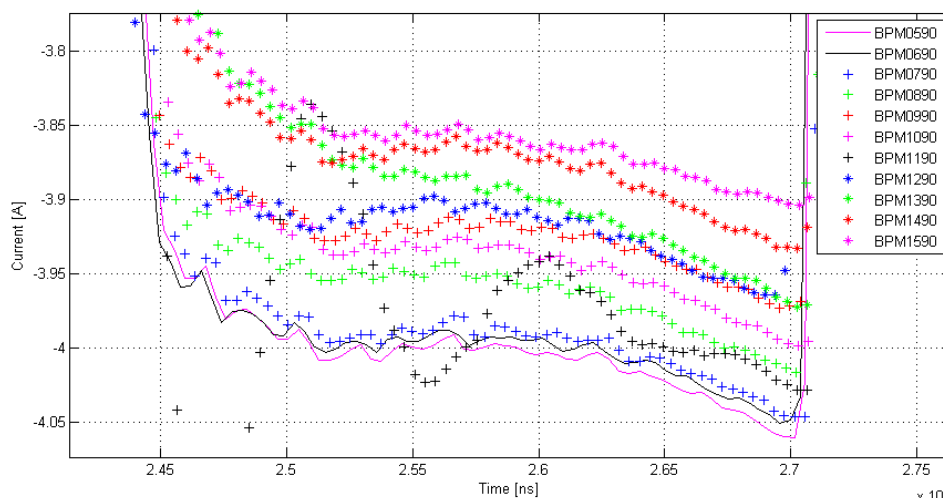
8.2 Μετρήσεις Έντασης Ρεύματος για το Γραμμικό Τμήμα

Το Σχήμα 8.1 απεικονίζει τις τιμές των ρευμάτων που μέτρησαν οι αισθητήρες του γραμμικού τμήματος της διάταξης. Είναι φανερό ότι η λανθασμένη βαθμονόμηση των αισθητήρων οδηγεί σε μετρήσεις που δεν είναι ακριβείς. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες BPM0590 και BPM0690 μετρούν ρεύμα μικρότερης έντασης από τους επόμενους αισθητήρες του γραμμικού τμήματος, γεγονός που δεν μπορεί να αποτελεί σωστή μέτρηση. Επίσης, ο αισθητήρας BPM0790 μετράει το μικρότερο ρεύμα, αν και είναι μόλις τρίτος στη σειρά. Τέλος, το μεγαλύτερο ρεύμα φαίνεται να το μετράει ο αισθητήρας BPM1290, αν και είναι από τους τελευταίους κατά σειρά.

Έτσι, λοιπόν, κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης για τους αισθητήρες του γραμμικού τμήματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.2, οι καινούργιοι συντελεστές βαθμονόμησης έχουν ως αποτέλεσμα μια πιο εξορθολογισμένη απεικόνιση των μετρούμενων ρευμάτων από τους αισθητήρες. Ο κάθε αισθητήρας της διάταξης μετράει μικρότερη τιμή ρεύματος από τον προηγούμενό του. Έτσι, μετά την εφαρμογή των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης, οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των σημείων απώλειας της δέσμης.



Σχήμα 8.1: Μετρήσεις ρεύματος με τους παλιούς συντελεστές βαθμονόμησης, στο γραμμικό τμήμα της διάταξης. Στο γράφημα φαίνεται πως οι αισθητήρες δε μετρούν σωστά τις τιμές του ρεύματος της δέσμης.

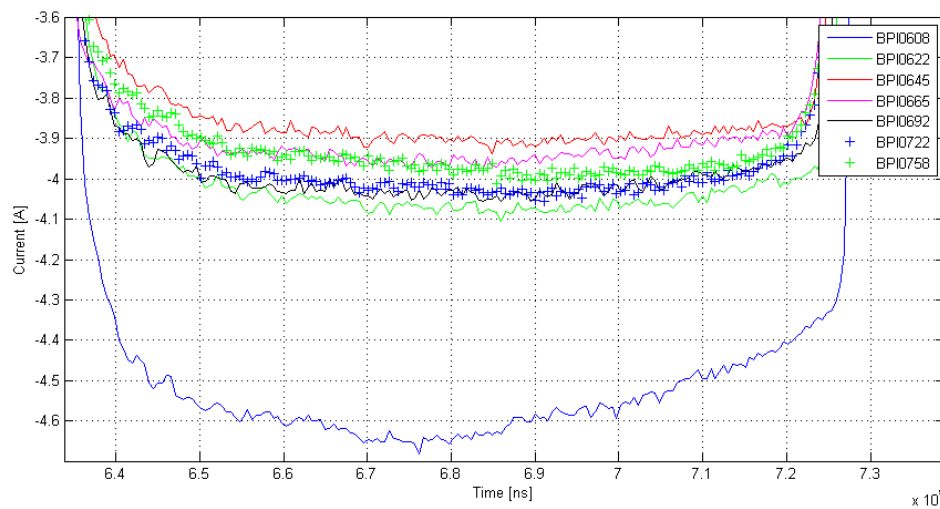


Σχήμα 8.2: Μετρήσεις ρεύματος με τους καινούργιους συντελεστές βαθμονόμησης για το γραμμικό τμήμα. Σε αυτό το γράφημα οι ενδείξεις των αισθητήρων έχουν λογική σειρά, γεγονός που σημαίνει πως οι νέοι συντελεστές μπορούν, πλέον, να οδηγήσουν σε σωστές μετρήσεις.

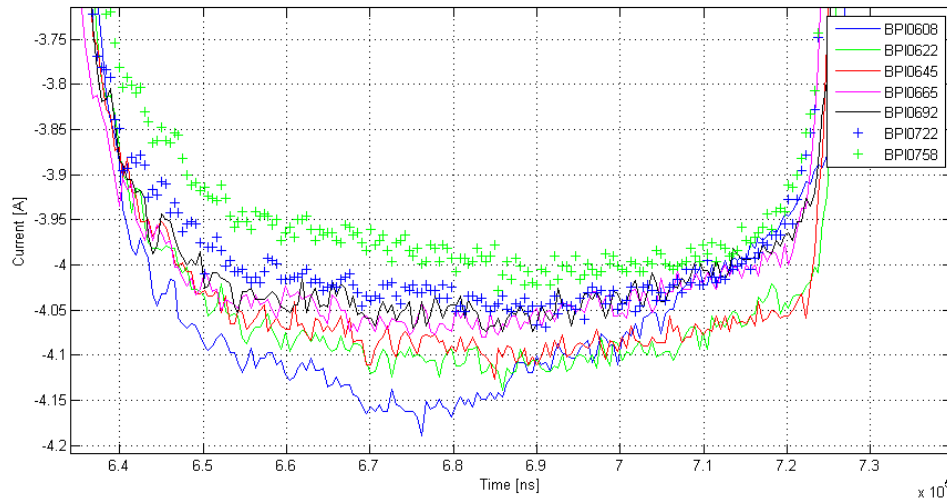
8.3 Μετρήσεις Έντασης Ρεύματος για το Τμήμα TL1

Εξετάζοντας το Σχήμα 8.3, οι τιμές των ρευμάτων που μετρούν οι αισθητήρες του τμήματος TL1 δεν είναι σωστές. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας BPM0608 μετρά 0.5 A ρεύματος περισσότερο σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους αισθητήρες του τμήματος. Επίσης, ο αισθητήρας BPM0645 μετρά λιγότερο ρεύμα από τους υπόλοιπους, αν και είναι μόλις ο τρίτος στη σειρά. Ακόμη, ο αισθητήρας BPM0692 απεικονίζει μεγαλύτερη τιμή ρεύματος από τον προηγούμενό του αισθητήρα BPM0665.

Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης στους αισθητήρες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 8.4. Οι καινούργιοι συντελεστές οδηγούν σε μετρήσεις που έχουν, πλέον, λογική. Κάθε αισθητήρας μετράει τιμές ρεύματος μεγαλύτερες σε σχέση με τον επόμενο σε σειρά αισθητήρα του τμήματος.



Σχήμα 8.3: Μετρήσεις ρεύματος με τους παλιούς συντελεστές βαθμονόμησης, στο τμήμα TL1. Στο γράφημα φαίνεται πως οι αισθητήρες δε μετρούν σωστά τις τιμές του ρεύματος της δέσμης.



Σχήμα 8.4: Μετρήσεις ρεύματος με τους καινούργιους συντελεστές βαθμονόμησης για το τμήμα TL1. Σε αυτό το γράφημα οι ενδείξεις των αισθητήρων έχουν λογική σειρά, γεγονός που σημαίνει πως οι νέοι συντελεστές μπορούν, πλέον, να οδηγήσουν σε σωστές μετρήσεις.

Ο Χάρτης Απωλειών Ρεύματος στο CTF3

9.1 Εισαγωγή

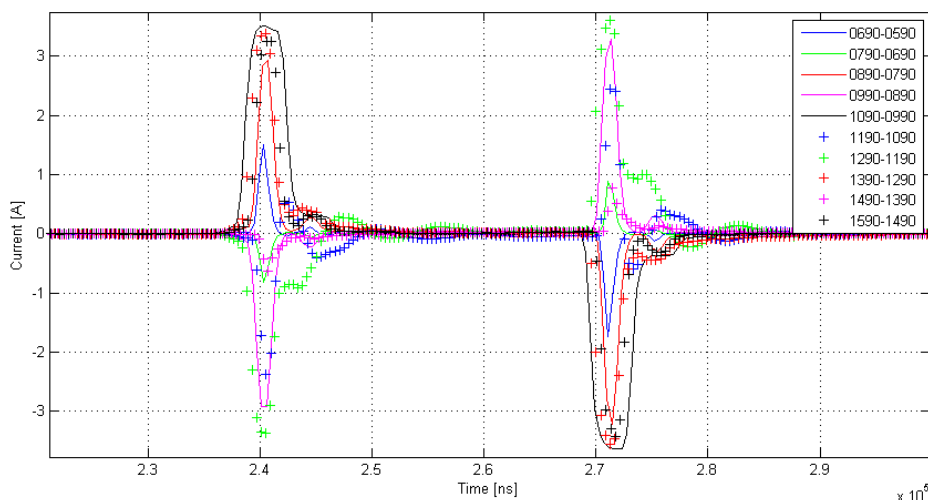
Στο προηγούμενο κεφάλαιο διερευνήθηκε η επίδραση των καινούργιων συντελεστών βαθμονόμησης στις μετρήσεις του ρεύματος από τους αισθητήρες. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 8.2 και 8.4, οι τιμές των ρευμάτων ανταποκρίνονται στις αναμενόμενες και, έτσι, οι αισθητήρες μπορούν, πλέον, να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια για τις μετρήσεις του ρεύματος της δέσμης.

Με τους καινούργιους συντελεστές βαθμονόμησης στη βάση δεδομένων του πειράματος, μπορούν, πλέον, να εκτιμηθούν τα σημεία κατά μήκος της διάταξης στα οποία παρατηρούνται διαφορές στις τιμές του ρεύματος. Η διαδικασία έχει ως εξής: Μέτρηση του ρεύματος από κάθε αισθητήρα και αφαίρεση της τιμής αυτής από την τιμή που μέτρησε ο προηγούμενος, σε σειρά, αισθητήρας.

9.2 Απώλειες Ρεύματος στο Γραμμικό Τμήμα

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται το αποτέλεσμα των διαφορών των ρευμάτων που μέτρησαν οι αισθητήρες του γραμμικού τμήματος. Το ρεύμα που μετρήθηκε από κάθε αισθητήρα αφαιρείται από το ρεύμα που μέτρησε ο προηγούμενος σε σειρά αισθητήρας. Τα αποτελέσματα αυτών των αφαιρέσεων φαίνονται στο Σχήμα 9.1.

Από τα αποτελέσματα των αφαιρέσεων των ρευμάτων προκύπτουν στοιχεία για τις απώλειες ρεύματος δέσμης στα σημεία μεταξύ των διαδοχικών αισθητήρων. Το τμήμα του Σχήματος 9.1 περιέχει τις πληροφορίες από τα 2.42×10^5 ns έως τα 2.6×10^5 ns. Παρατηρείται μια ομοιομορφία στις δύο



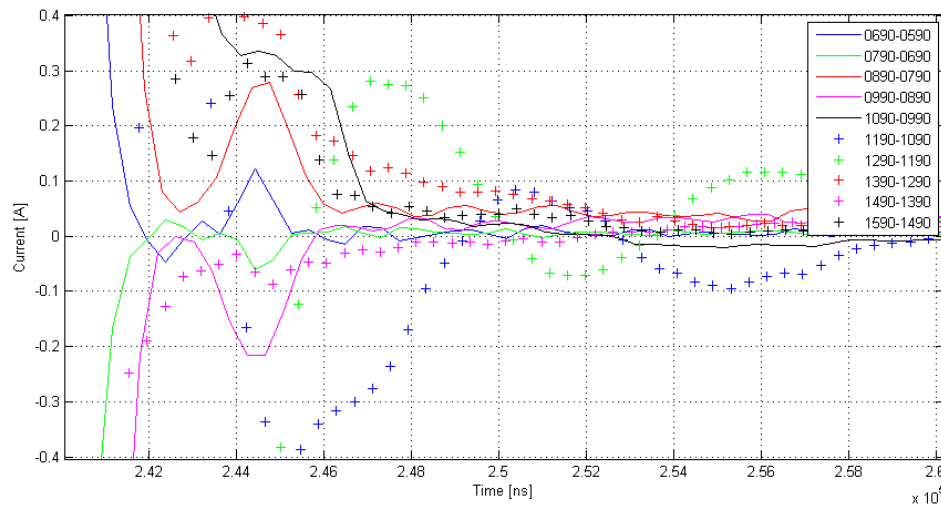
Σχήμα 9.1: Γενική απεικόνιση των διαφορών των τιμών των ρευμάτων για το γραμμικό τμήμα. Επίσης διακρίνονται τα σημεία που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες σε δυο χρονικά παράθυρα του γραφήματος.

χρονικές περιοχές στις οποίες βρίσκονται οι υψηλές διακυμάνσεις. Γι' αυτό επιλέχτηκε μόνο μία από τις δύο για τη μελέτη των απωλειών. Στο Σχήμα 9.2 φαίνεται η λεπτομέρεια του γραφήματος που θα μελετηθεί.

Οι απώλειες ρεύματος της δέσμης για το γραμμικό τμήμα προκύπτουν μελετώντας το Σχήμα 9.2. Τα αποτελέσματα έχουν συγκεντρωθεί στον Πίνακα 9.1. Για παράδειγμα, ο τρόπος εξαγωγής των απωλειών στο σημείο ανάμεσα στους αισθητήρες BPM0590 και BPM0690, έχει ως εξής: Η μπλε γραμμή συμβολίζει τις απώλειες ρεύματος δέσμης στα σημεία μεταξύ των δύο πρώτων αισθητήρων του γραμμικού τμήματος. Παρατηρείται μια κορυφή απωλειών ρεύματος κοντά στα 120 mA και σε χρόνο 2.44×10^5 ns. Ο μέσος όρος των τιμών του ρεύματος εκτιμάται στα 10 mA. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται η μέγιστη απώλεια ρεύματος και η μέση τιμή απωλειών για όλες τις καμπύλες, δηλαδή για όλα τα ζεύγη αισθητήρων.

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να επισημανθεί το πρόβλημα στο υλικό του αισθητήρα BPM1190. Οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις τιμές που έχουν μετρηθεί από αυτό τον αισθητήρα δε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, αφού παρατηρούνται μεγάλες διακυμάνσεις και, έτσι, δεν ενδείκνυνται για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ο Πίνακας 9.1 περιέχει μερικά ενδιαφέροντα στοιχεία για τις απώλειες ρεύματος της δέσμης. Στα πρώτα τέσσερα διαστήματα μεταξύ των αισθητήρων παρατηρούνται μέγιστα απωλειών σε κάποιες χρονικές στιγμές. Αυτό σημαίνει πως σε εκείνα τα σημεία η δέσμη χάνει, στιγμιαία, μεγάλη ποσότητα ρεύματος. Με το πέρασμα του χρόνου, οι καμπύλες αυτές σταθε-



Σχήμα 9.2: Λεπτομέρεια του Σχήματος 9.1. Η πλειοψηφία των τιμών είναι στο θετικό άξονα, γεγονός που δίνει πληροφορίες για τις απώλειες ρεύματος δέσμης.

ροποιούνται λίγο πάνω από το μηδέν. Είναι γεγονός ότι τα μέγιστα απωλειών είναι πιο σημαντικά σε σχέση με τις μικρές απώλειες στα υπόλοιπα χρονικά σημεία. Διαρκούν λιγότερο χρονικά, αλλά έχουν πολύ μεγαλύτερη τιμή απωλειών ρεύματος σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονικές στιγμές. Τέλος, στο διάστημα BPM0790-BPM0890 παρατηρείται τόσο μεγάλο μέγιστο καμπύλης (280 mA), όσο και υψηλή μέση τιμή (50 mA) στις υπόλοιπες χρονικές στιγμές. Αυτό σημαίνει ότι το συγκεκριμένο διάστημα έχει ιδιαίτερα υψηλές απώλειες ρεύματος δέσμης και θα πρέπει να ληφθούν μέτρα μείωσής τους.

9.3 Απώλειες Ρεύματος στο Τμήμα TL1

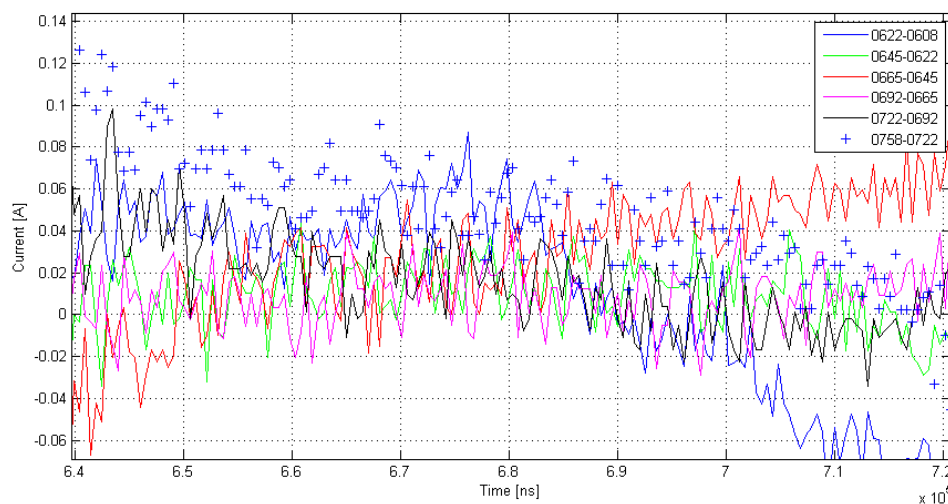
Σε αυτήν την ενότητα αφαιρούνται οι τιμές των ρευμάτων για το τμήμα TL1 της διάταξης, σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε για το γραμμικό τμήμα. Με αυτό τον τρόπο, θα εντοπιστούν τα σημεία απώλειας ρεύματος της δέσμης ανάμεσα στους αισθητήρες του συγκεκριμένου τμήματος.

Στο Σχήμα 9.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες των διαφορών των ρευμάτων που μέτρησαν οι αισθητήρες. Από το συγκεκριμένο σχήμα δεν είναι δυνατόν να βγούν συμπεράσματα, αφού δεν απεικονίζονται οι καμπύλες των διαφορών με την κατάλληλη λεπτομέρεια. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να γίνει η παρατήρηση ότι η πλειοψηφία των τιμών βρίσκονται στο θετικό ημιάξονα,

Διάστημα	Μέγιστη Απώλεια Ρεύματος (mA)	Μέση Απώλεια Ρεύματος (mA)
BPM0590-BPM0690	120	10
BPM0690-BPM0790	60	10
BPM0790-BPM0890	280	50
BPM0890-BPM0990	220	40
BPM0990-BPM1090	-	10
BPM1090-BPM1190	-	-
BPM1190-BPM1290	-	-
BPM1290-BPM1390	-	30
BPM1390-BPM1490	-	0
BPM1490-BPM1590	-	10

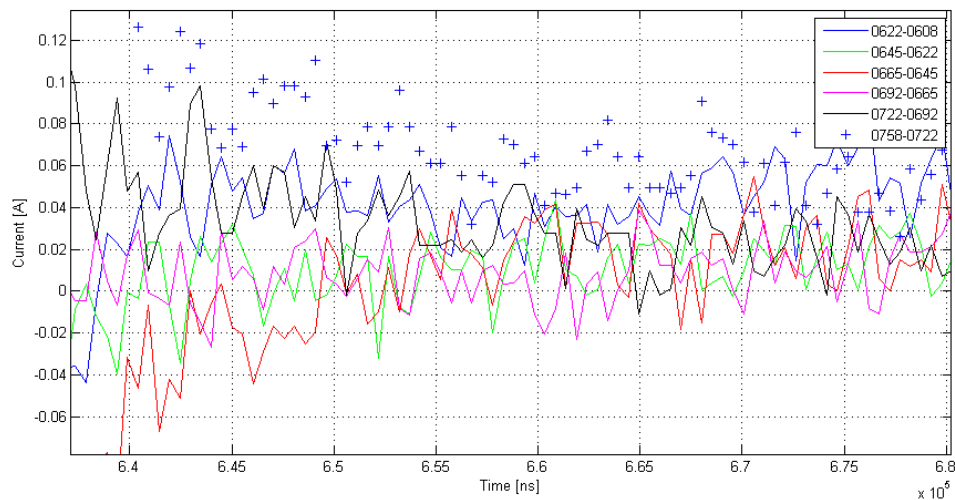
Πίνακας 9.1: Οι απώλειες ρεύματος δέσμης για το γραμμικό τμήμα της διάταξης. Οι παύλες δηλώνουν πως η συγκεκριμένη τιμή δεν υπάρχει ή δεν μπορεί να υπολογιστεί με τα υπάρχοντα δεδομένα. Οι απώλειες για τα διαστήματα που περιέχουν το BPM1190 έμειναν σκόπιμα κενές λόγω του προβλήματος του συγκεκριμένου αισθητήρα.

γεγονός που επιβεβαιώνει την ορθότητα της βαθμονόμησης των αισθητήρων που παρουσιάστηκε στο έβδομο κεφάλαιο της εργασίας.



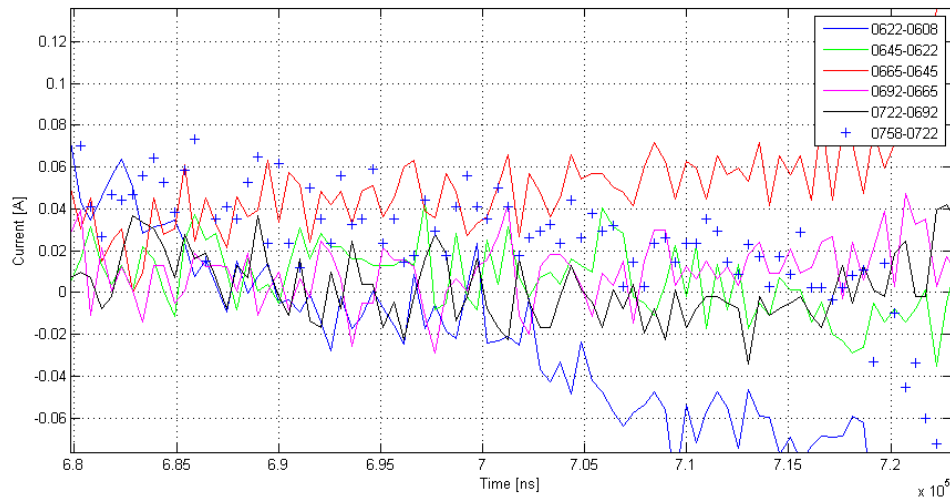
Σχήμα 9.3: Γενική απεικόνιση των διαφορών των τιμών των ρευμάτων για διαδοχικά ζεύγη αισθητήρων, για το τμήμα TL1.

Για την εξαγωγή των τιμών των απωλειών των ρευμάτων του τμήματος TL1 χρησιμοποιούνται τα Σχήματα 9.4 και 9.5 που είναι πιο λεπτομερείς απεικονίσεις περιοχών του Σχήματος 9.3. Η μελέτη των καμπυλών αυτών δίνει τις τιμές των απωλειών ρεύματος που παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2.



Σχήμα 9.4: Λεπτομέρεια του Σχήματος 9.3 για το χρονικό διάστημα από 6.35×10^5 ns έως 6.8×10^5 ns. Σε αυτό το σχήμα είναι πλέον εφικτή η μελέτη των καμπυλών των διαφορών.

Οι μέσες τιμές που δίνονται στον Πίνακα 9.2 παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για το ποιό είναι τα σημεία όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερη απώλεια ρεύματος. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στα διαστήματα μεταξύ των αισθητήρων BPM0608–BPM0622 και BPM0722–BPM0758 που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες απώλειες ρεύματος (50 mA). Ακόμη, μεγάλες απώλειες (40 mA) παρατηρούνται στο διάστημα BPM0645–BPM0665. Συμπερασματικά, όλα τα διαστήματα του τμήματος TL1 εμφανίζουν απώλειες ρεύματος δέσμης και, επομένως, θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω ενέργειες εξάλειψής τους.



Σχήμα 9.5: Λεπτομέρεια του Σχήματος 9.3 για το χρονικό διάστημα από 6.8×10^5 ns έως 7.25×10^5 ns. Σε αυτό το σχήμα είναι πλέον εφικτή η μελέτη των καμπυλών των διαφορών.

Διάστημα	Μέση Απώλεια Ρεύματος (mA)
BPM0608–BPM0622	50
BPM0622–BPM0645	20
BPM0645–BPM0665	40
BPM0665–BPM0692	20
BPM0692–BPM0722	20
BPM0722–BPM0758	50

Πίνακας 9.2: Οι απώλειες ρεύματος δέσμης για το τμήμα TL1 της διάταξης.

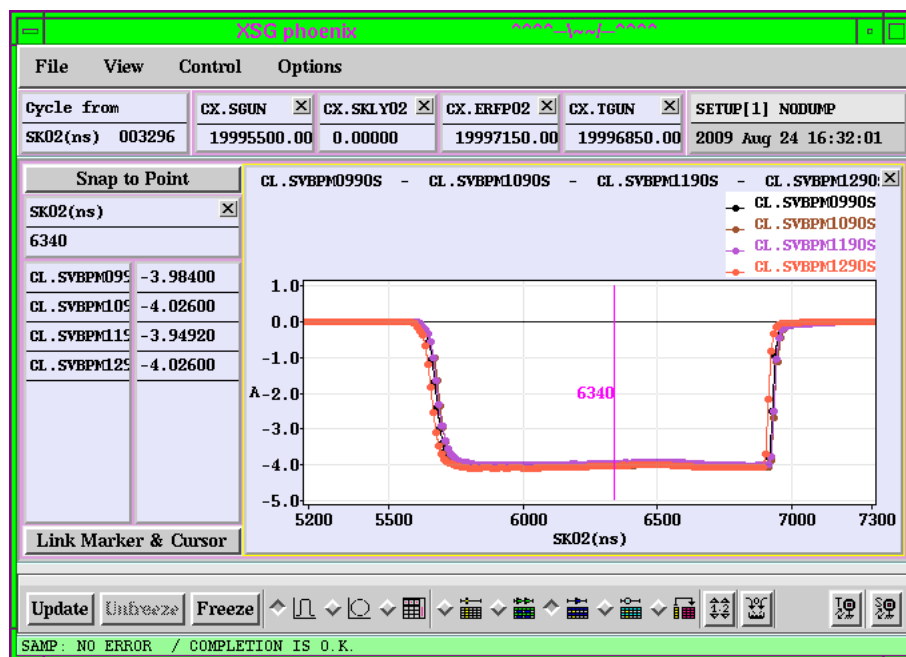
Συμπεράσματα, Στόχοι και Επόμενα Βήματα

Στο Κεφάλαιο 9 εκτιμήθηκαν οι απώλειες ρεύματος δέσμης για το γραμμικό τμήμα και το τμήμα TL1 της Τρίτης Πειραματικής Διάταξης του Γραμμικού Συμπαγούς Επιταχυντή του CERN. Η παρούσα εργασία αποτελεί το πρώτο βήμα για έναν ολοκληρωμένο χάρτη απωλειών ρεύματος δέσμης του CTF3. Σε επόμενες εργασίες, θα πρέπει να μελετηθούν όλα τα τμήματα της διάταξης σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε αυτήν την εργασία.

Οι συντελεστές βαθμονόμησης που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 7, θεωρήθηκαν ακριβείς. Για το λόγο αυτό, αντικατέστησαν τους παλιούς συντελεστές στη βάση δεδομένων του πειράματος. Η διαδικασία βαθμονόμησης θα πρέπει να επεκταθεί για όλους τους αισθητήρες της διάταξης, όπως περιγράφηκε στην εργασία. Για το Δακτύλιο Συνδυασμού (Combiner Ring), έχει γίνει το πρώτο βήμα σε αυτή την εργασία. Όμως, λόγω των υψηλών σχετικών σφαλμάτων που υπολογίστηκαν, κρίθηκε πιο ωφέλιμο να γίνει εκτενέστερη μελέτη για αυτούς τους συντελεστές βαθμονόμησης, πριν χρησιμοποιηθούν στη βάση δεδομένων του πειράματος.

Λόγω το προβλήματος στο υλικό του αισθητήρα BPM1190 κρίθηκε σκόπιμη η αντικατάστασή του. Στο Σχήμα 10.1 φαίνεται η σωστή μορφή της καμπύλης του ρεύματος που μέτρησε ο νέος αισθητήρας.

Η εργασία βασίστηκε σε μετρήσεις ρεύματος καθώς η δέσμη βρισκόταν σε πλήρη ισχύ. Επόμενο βήμα θα πρέπει να αποτελέσει ο σχεδιασμός γραφικού περιβάλλοντος (GUI) το οποίο θα συμπεριλαμβάνει όλους τους αισθητήρες της διάταξης και θα υπολογίζει τις απώλειες ρεύματος σε κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο της. Με αυτόν τον τρόπο, οι χειριστές στο δωμάτιο ελέγχου θα μπορούν να γνωρίζουν τα σημεία απώλειας ρεύματος της δέσμης σε πραγματικό χρόνο. Σε περίπτωση που οι απώλειες αυξηθούν εκθετικά και σε μεγάλο βαθμό, θα ενεργοποιείται συναγερμός.



Σχήμα 10.1: Οι μετρήσεις ρεύματος που διενεργεί ο νέος BPM1190. Η μορφή της καμπύλης είναι πανομοιότυπη με τις υπόλοιπες καμπύλες των αισθητήρων του γραμμικού τμήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] www.cern.ch
- [2] <http://www.scidacreview.org/0601/html/accelerator.html>
- [3] <http://www.physicsforums.com/>
- [4] <http://cern-discoveries.web.cern.ch/cern-discoveries/Courier/HeavyLight/Heavylight.html>
- [5] <http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/intro.html>
- [6] X. E. Lin and D. H. Whittum, Image current heating on a metal surface due to charged bunches, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94309.
- [7] A. Sedra, K. Smith, Ι. Παπαρνάνος, Microelectronic Circuits, Third Edition, Εκδόσεις Παπασρωτηρίου.
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday
- [9] <https://edms.cern.ch/nav/PS000041/CERN0000021711>
- [10] https://edms.cern.ch/file/547088/7/CTF3_girders_2007.ppt
- [11] http://clicstudy.web.cern.ch/CLICStudy/CTF3/Notes/CTF3_071.pdf
- [12] <http://cdsweb.cern.ch/record/1159150/files/CERNOPEN2009002.pdf>
- [13] M. Gasior, "An Inductive Pick-Up for Beam Position and Current Measurements," CERN, Geneva, Switzerland, 2003.
- [14] P. Odier, "A new Wide Band Wall Current Monitor," CERN, Geneva, Switzerland, 2003.