

Ρεύμα και ένταση ρεύματος – μέρος Β΄

Συνάδελφοι, πριν προχωρήσω στα σχόλια σχετικά με το θέμα, θα ήθελα κατ' αρχήν να αναφερθώ κι εγώ σε ένα λεπτό σημείο που έχει σχέση με τη συμμετοχή μας στο δίκτυο και με την μεταξύ μας επικοινωνία:

Είναι πιθανό και συμβαίνει συχνά, να υπάρχουν διαφορετικές απόψεις μεταξύ συναδέλφων για διάφορα θέματα. Πιστεύω ότι κάτι τέτοιο, όχι μόνο δεν είναι αρνητικό, αλλά απεναντίας είναι χρήσιμο και επιθυμητό, διότι λειτουργεί σαν έναυσμα γόνιμων συζητήσεων, μέσα από τις οποίες μόνο θετικά αποτελέσματα για όλους μας μπορούν να προκύψουν.

Με τις τοποθετήσεις του, καθένας μας μεταφέρει χρόνια πολύτιμης εμπειρίας, γιγαντώνοντας έτσι τη συλλογική εμπειρία όλων μας.

Γι' αυτό, δεν υπάρχει καμία πρόθεση αντιπαράθεσης στα σχόλιά μου, αλλά μόνο προσπάθεια να συμβάλλω, στο βαθμό που μπορώ, στην εξέλιξη της συζήτησης.

Μακάρι να έχω δίκιο σε κάποια διαφορά, διότι θα έχω την ηθική ευχαρίστηση ότι κάτι προσέφερα. Αλλά μακάρι να έχω και άδικο διότι τότε θα έχω το κέρδος ότι κάτι έμαθα!

Από ότι φαίνεται λοιπόν από τις τοποθετήσεις μας, έχουν προκύψει τα πιο κάτω ερωτήματα ή σημεία που πιθανώς χρειάζονται μια πιο εκτεταμένη συζήτηση:

1. Το **ηλεκτρικό ρεύμα** είναι μέγεθος ή φαινόμενο;
2. Όταν λέμε ή γράφουμε σε μια περιγραφή «**να βρεθεί το ρεύμα ...κλπ.**» μήπως εννοούμε την **ένταση** του ρεύματος και απλά λέμε «ρεύμα» για συντομία;
3. Αν το ηλεκτρικό ρεύμα είναι φυσικό μέγεθος, τότε είναι **διανυσματικό** ή **βαθμωτό**;
4. Μήπως το **ηλεκτρικό ρεύμα είναι διανυσματικό** φυσικό μέγεθος και η **ένταση I** είναι το μέτρο του; Είναι δηλαδή η ένταση ένα θετικό μέγεθος (ρυθμός διέλευσης φορτίου ...) που δεν νοείται να έχει αρνητική τιμή; Ισχύει $i = |\vec{i}|$;

Μήπως στην περίπτωση αυτή όταν π.χ. λέμε ότι «**το ρεύμα είναι $-5A$** » εννοούμε ότι η **αλγεβρική τιμή του διανυσματικού μεγέθους «ηλεκτρικό ρεύμα» είναι $-5A$** , ενώ η ένταση του ρεύματος αυτού είναι **$5A$** ;

Το σύμβολο **i** χρησιμοποιείται εν προκειμένω για την αλγεβρική τιμή του διανυσματικού μεγέθους «ρεύμα», ή για το μέτρο του μεγέθους αυτού;

Τα σημεία στα οποία θα προσπαθήσω να εστιάσω αναλυτικότερα την επόμενη φορά είναι τα ακόλουθα:

- Νομίζω ότι ο όρος «**ρεύμα (current)**» χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία κατ' αρχήν για να περιγράψει το φαινόμενο, αλλά και ως συνώνυμο της «**έντασης του ρεύματος**»

(**current intensity**)». Σε μερικά βιβλία για παράδειγμα (π.χ. Fundamentals of Physics, by Jearl Walker) δεν μπόρεσα πουθενά να βρω τη λέξη «intensity».

Μερικές φορές συναντάμε στη βιβλιογραφία την περιγραφή:

«Ηλεκτρικό ρεύμα είναι η κίνηση φορτίων κλπ. ... **και το μέτρο του είναι η ένταση του ρεύματος** που ορίζεται ως ο ρυθμός ...».

Πιστεύω ότι η περιγραφή αυτή είναι ζευγάρι «**φαινόμενο – φυσικό μέγεθος**» και όχι ζευγάρι «**διανυσματικό φυσικό μέγεθος – μέτρο του μεγέθους**». (Όπως λέμε για παράδειγμα ότι η αδράνεια είναι ιδιότητα των σωμάτων και **το μέτρο της** είναι η μάζα).

- Έχω την εντύπωση ότι **δεν μπορούμε να θεωρούμε στα κυκλώματα έναν αγωγό ως μονοδιάστατο χώρο και δεν υπάρχει κανένας λόγος εξάλλου να μιλάμε για μονοδιάστατο ρεύμα μέσα σ' αυτόν**. Κάθε αγωγός έχει ορισμένη διατομή, όσο μικρή κι αν είναι αυτή, μέσα από την οποία διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ένταση επομένως του ρεύματος στον αγωγό (ή το ρεύμα, όπως συνηθίζεται για συντομία) είναι η **ροή πυκνότητας ρεύματος μέσα από μία διατομή του αγωγού**:

$$i = \vec{j} \cdot \vec{S}$$

ή αν η πυκνότητα ρεύματος δεν είναι σταθερή:

$$di = \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad \text{και} \quad i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Φαίνεται ότι σαν **εσωτερικό γινόμενο των δύο διανυσμάτων** η ένταση ρεύματος μπορεί να έχει θετική ή αρνητική τιμή, που σχετίζεται τις φορές των $\vec{j}$ και $\vec{S}$.

- Η πυκνότητα του ρεύματος τώρα σε κάθε σημείο ορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v}$$

όπου ρ η **χωρική πυκνότητα φορτίου** στο σημείο αυτό, και το μέτρο της $\vec{j} = \frac{di}{dS_{\text{καθ}}}$ εκφράζει την ανά μονάδα επιφάνειας ένταση ρεύματος σε κάθε σημείο του αγωγού.

Όταν τώρα θέλουμε να μελετήσουμε τις αλληλεπιδράσεις ρεύματος – μαγνητικού πεδίου, εκτός από το «κανονικό» ρεύμα στο χώρο, είναι χρήσιμες οι έννοιες του **ρεύματος επιφάνειας (surface current)** και του **ρεύματος σε μία διάσταση (filamentary current)**.

Στην περίπτωση ρευμάτων μεγάλης συχνότητας για παράδειγμα εμφανίζεται το **επιδερμικό φαινόμενο**, όπου έχουμε μια σχεδόν επιφανειακή κατανομή των κινουμένων φορτίων στον αγωγό.

Αλλά και στις περιπτώσεις που χρειαζόμαστε μια **στοιχειώδη πηγή δημιουργίας μαγνητικού πεδίου** για να προχωρήσουμε σε ολοκλήρωση είναι χρήσιμη η έννοια του μονοδιάστατου ρεύματος (π.χ. Biot – Savart).

Σε αναλογία λοιπόν προς τη σχέση $\vec{j} = \rho \cdot \vec{v}$ μπορούμε να ορίσουμε και την επιφανειακή ή τη γραμμική πυκνότητα ρεύματος:

$$\vec{j}_s = \rho_s \cdot \vec{v} \quad \text{και} \quad \vec{j}_\ell = \rho_\ell \cdot \vec{v}$$

Όπου ρ_s και ρ_ℓ η επιφανειακή και η γραμμική πυκνότητα φορτίου αντίστοιχα.

Η τελευταία έχει όπως φαίνεται διαστάσεις έντασης ρεύματος και το μέτρο της συμπίπτει με την ένταση του (γραμμικού) ρεύματος:

$$\vec{j}_\ell = \rho_\ell \cdot \vec{v} = \frac{dq}{d\ell} \frac{d\vec{\ell}}{dt} = \frac{dq}{dt} \frac{d\vec{\ell}}{d\ell} = \vec{i} \cdot \frac{d\vec{\ell}}{d\ell}$$

Επειδή η γραμμική πυκνότητα του ρεύματος και η ένταση του ρεύματος έχουν ίδιες διαστάσεις, είναι πολύ συνηθισμένο στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρει και ο συνάδελφος Θρασύβουλος Μαχαίρας, να περιγράφεται το γραμμικό ρεύμα (filamental current) ξεκινώντας από τη σχέση:

$$\vec{i} = \rho_\ell \cdot \vec{v}$$

να αποδίδεται δηλαδή ειδικά στο μονοδιάστατο ρεύμα διανυσματικός χαρακτήρας, γεγονός που έχει βέβαια και τη λογική του, δεδομένου ότι ουσιαστικά μιλάμε στην περίπτωση αυτή για **κινούμενο φορτίο**.

Αυτό δεν βρίσκεται όμως σε συνέπεια με τον γενικότερο ορισμό του ρεύματος ως ροής ηλεκτρικού φορτίου μέσα από μια επιφάνεια ή ακριβέστερα ροής πυκνότητας ρεύματος. Για αυτούς ακριβώς τους λόγους συνέπειας χρησιμοποιείται στη συνέχεια ο μετασχηματισμός $\vec{i} \cdot d\vec{\ell} \rightarrow \vec{i} \cdot \frac{d\vec{\ell}}{d\ell}$ για τα γραμμικά **στοιχεία ρεύματος (current elements)**.

Ο David Griffiths στο βιβλίο του Introduction to Electrodynamics χρησιμοποιεί πράγματι αυτό τον ορισμό για το **μονοδιάστατο ρεύμα**, αποδίδοντάς του διανυσματικό χαρακτήρα:

«Το **ρεύμα** σε ένα σύρμα είναι το φορτίο ανά μονάδα χρόνου που περνάει από ένα δεδομένο σημείο P. Εξ ορισμού, αρνητικά φορτία κινούμενα αριστερά είναι ισοδύναμα με θετικά κινούμενα δεξιά ... Το ρεύμα μετριέται σε Coulombs/sec ή Amperes ...», και καταλήγει στη σχέση $\vec{i} = \rho_\ell \cdot \vec{v}$.

Στη συνέχεια όμως, αναφερόμενος πιο κάτω στα **χωρικά ρεύματα**, γράφει:

«Όταν η ροή φορτίου κατανέμεται σε περιοχή τριών διαστάσεων, την περιγράφουμε με την χωρική πυκνότητα ρεύματος $\vec{j}$, που ορίζεται ως εξής: Θεωρήστε ένα «σωλήνα» απειροστής διατομής $d\vec{S}_{\text{KA}\theta}$ παράλληλο προς τη ροή. Αν το ρεύμα στο «σωλήνα» αυτό είναι $d\vec{i}$, τότε η χωρική πυκνότητα ρεύματος είναι: $\vec{j} = \frac{d\vec{i}}{d\vec{S}_{\text{KA}\theta}}$...».

Διατηρεί δηλαδή τον διανυσματικό χαρακτήρα του ρεύματος και στην περίπτωση του χωρικού ρεύματος.

Εδώ ακριβώς νομίζω υπάρχει ένα μαθηματικό ζήτημα:

Ενώ έχει ορίσει πιο πριν (και του έχει αποδώσει διανυσματικό χαρακτήρα), το ρεύμα σε μία διάσταση, στη συνέχεια, στον ορισμό της $\vec{j}$, θεωρεί ως διάνυσμα το ρεύμα $d\vec{i}$ που διέρχεται από την διατομή $dS_{\text{ΚΑΘ}}$. Νομίζω όμως ότι **δεν μπορούμε να θεωρήσουμε μονοδιάστατο το ρεύμα που διέρχεται από μια επιφάνεια**, έστω και αν αυτή είναι απειροστή.

Επιπλέον, παρόλο που στην προτεινόμενη σχέση ορισμού της $\vec{j}$ εισάγει τα μεγέθη ως διανύσματα, δεν λαμβάνει υπόψιν το γεγονός ότι και η επιφάνεια $d\vec{S}$ είναι διάνυσμα, αλλά χρησιμοποιεί αντί αυτού την κάθετη προς τη ροή τομή $dS_{\text{ΚΑΘ}}$.

Έχω λοιπόν την αίσθηση όπως έγραψα και στην αρχή, ότι φαίνεται πιο φυσιολογική η ακολουθία:

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v}, \quad d\vec{i} = \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad \text{και} \quad i = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

με το πηλίκο $\vec{j} = \frac{d\vec{i}}{dS_{\text{ΚΑΘ}}}$ να εκφράζει το μέτρο της πυκνότητας έντασης.

Ίσως τελικά το πρόβλημα να εστιάζεται στο ερώτημα «τι ονομάζουμε ρεύμα;»:

- ο Την ροή φορτίου μόνο σε μία διάσταση, την διέλευση φορτίου από ένα σημείο μόνο του χώρου;
- ο Ή την ροή φορτίου σε οποιαδήποτε περιοχή του χώρου, μέσα από οποιαδήποτε επιφανειακή κάθετη τομή (χωρικό ρεύμα), που εκφυλισμένα μπορεί να είναι και γραμμή (επιφανειακό ρεύμα) ή σημείο (μονοδιάστατο ρεύμα);

Ελπίζοντας να συνέβαλα λίγο στην εξέλιξη της συζήτησης πάνω στο θέμα αυτό, που παρουσιάζει πραγματικά μεγάλο ενδιαφέρον,

Διονύσης Μητρόπουλος

dmitro@sch.gr