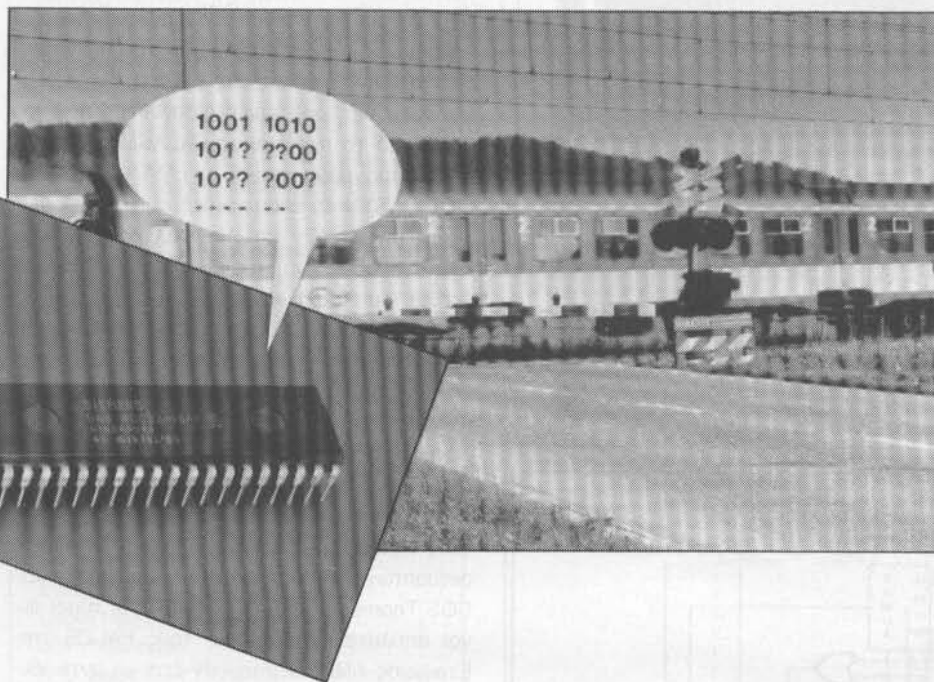


# Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα



## Οι κοινοτικές οδηγίες

**Η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (electromagnetic compatibility, EMC) είναι ένα θέμα που απασχολεί, όλο και συχνότερα, τη βιομηχανία ηλεκτρικών συσκευών. Στο παρακάτω άρθρο θα αναλύσουμε τη σημασία του όρου και θα σας προτείνουμε λύσεις για την κατασκευή ηλεκτρομαγνητικά συμβατών συσκευών.**

Όταν μία εταιρία διαθέτει ένα προϊόν στο εξωτερικό, πρέπει να εξασφαλίσει ότι το προϊόν εκπληρώνει τους κανονισμούς που ισχύουν στην ξένη χώρα. Το 1957 συστάθηκε η Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα (ΕΟΚ), με σκοπό την ελεύθερη διακίνηση αγαθών ανάμεσα στα κράτη - μέλη. Αυτό δεν σημαίνει, απλώς, κατάργηση των συνόρων και των λοιπών γραφειοκρατικών διαδικασιών, αλλά θέσπιση κοινών κανονισμών, όσον αφορά την ασφάλεια των συσκευών, την προστασία του καταναλωτή, του περιβάλλοντος, κλπ. Οι οδηγίες της ΕΟΚ περιέχουν τις βασικές απαιτήσεις (Essential Requirements) που πρέπει να πληρούν οι συσκευές. Οι οδηγίες δεν αναφέρονται σε τεχνικές λεπτομέρειες. Το ευρωπαϊκό συμβούλιο έχει εκδόσει οδηγίες για διά-

φορα αγαθά, όπως για τα παιχνίδια, τα εργαλεία, τα ιατρικά μοσχεύματα, τις πατάτες και φυσικά, για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (89/336/EEC). Για να γνωρίζει ο καταναλωτής, ότι το προϊόν πληρεί τις αυστηρές κοινοτικές προδιαγραφές, σχεδιάστηκε ένα ειδικό σήμα. Η μορφή του σήματος CE (Conformite' Europeenne) φαίνεται στο σχήμα 1. Το σήμα CE δείχνει ότι το προϊόν πληρεί τις κοινοτικές οδηγίες, αλλά δεν εξασφαλίζει τη σωστή λειτουργία του. Ετσι, μία καφετιέρα με το σήμα CE μπορεί να μην είναι ικανή να παρασκευάζει καφέ, αλλά πληρεί πλήρως τις κοινοτικές προδιαγραφές. Η καφετιέρα μ' αυτό το σήμα μπορεί να πουληθεί ελεύθερα σ' όλες τις χώρες - μέλη της ΕΟΚ.

## Οδηγίες και προδιαγραφές EMC

Οι κοινοτικές οδηγίες δημιουργήθηκαν για να βοηθήσουν την προσπάθεια δημιουργίας μίας ανοιχτής ευρωπαϊκής αγοράς. Η κοινοτική οδηγία για την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) αφορά όλες τις συσκευές που δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά παράσιτα ή επηρεάζονται από αυτά. Από την 1 Ιανουαρίου 1996, οι κατασκευάστριες εταιρίες πρέπει να αποδεικνύουν ότι τα προϊόντα τους συμφωνούν με την κοινοτική οδηγία, όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Από την ίδια ημερομηνία, όποιο προϊόν δεν τηρεί τους απαιτούμενους όρους (για EMC και τα συναφή), θα απαγορεύεται να διατίθεται στις χώρες της ΕΟΚ. Οι εταιρίες μπορούν από σήμερα να επωφεληθούν από αυτήν την κατάσταση. Όταν το προϊόν πληροί τις προδιαγραφές EMC, μπορεί να διατεθεί σε όλες τις χώρες της ΕΟΚ, αδιαφορώντας για τους νόμους που επικρατούν σε κάθε κράτος. Αυτό εξηγεί το ενδιαφέρον που δείχνει η βιομηχανία ηλεκτρικών συσκευών, όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα. Το ευρωπαϊκό ινστιτούτο τυποποίησης CELENEC, καθορίζει τις προδιαγραφές, που πρέπει να έχει ένα προϊόν, για να πληρεί τους όρους EMC. Το ινστιτούτο τυποποίησης, σε αντίθεση με το ευρωπαϊκό συμβούλιο, ορίζει αναλυτικά τις τεχνικές μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν, για να διαπιστωθεί ότι το προϊόν πληροί τις προδιαγραφές. Ο κατασκευαστής δεν είναι υποχρεωμένος να ακολουθήσει τη διαδικασία σχεδίασης και κατασκευής, που ορίζεται από το ινστιτούτο τυποποίησης. Για τις μεγάλες εταιρίες, η τήρηση των κανονισμών της ΕΟΚ είναι, συνήθως, η φτηνότερη μέθοδος, για να αποδείξουν ότι τα προϊόντα τους εκπληρούν τις προϋποθέσεις. Όταν μία εταιρία κατασκευάζει τα προϊόντα της ακολουθώντας όλους τους κανονισμούς τυποποίησης, μπορεί να υποβάλει υπεύθυνη δήλωση, όπου θα αναφέρεται, ότι τα είδη που παράγει πληρούν τις προδιαγραφές της ΕΟΚ. Από αυτή τη δήλωση, οι υπεύθυνες υπηρεσίες των κρατών - μελών συμπεραίνουν ότι το προϊόν πληρεί τους κανονισμούς EMC. Στην περίπτωση που η σχεδίαση και η κατασκευή του προϊόντος δεν ακολουθεί τους κανονισμούς τυποποίησης της ΕΟΚ, ο κατασκευαστής ή η εισαγωγική εταιρία πρέπει να δώσουν το προϊόν προς εξέταση. Ο έλεγχος γίνεται από κάποιο αναγνωρισμένο ινστιτούτο (Competent body). Για παράδειγμα, στη Γερμανία είναι το TÜV. Υπάρχει, όμως και η ενδιάμεση λύση: ο κατασκευαστής ακολουθεί, εν μέρει, τους κανονισμούς της ΕΟΚ και το ανεξάρτητο ινστιτούτο αναλαμβάνει τον έλεγχο των υπολοίπων προδιαγραφών. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται, στην περίπτωση που

γιά τον έλεγχο του προϊόντος απαιτούνται ειδικές (ακριβές) συσκευές. Οι κανόνες τυποποίησης χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες. Βασικοί κανόνες τυποποίησης (Basic Standards), γενικοί κανόνες τυποποίησης (Generic Standards), κανόνες τυποποίησης κατά κατηγορία προϊόντων (Product Family Standards) και κανόνες τυποποίησης κατά προϊόν (Dedicated Products Standards). Όπως είναι φυσικό, οι βασικοί κανόνες τυποποίησης καλύπτουν μεγάλο πλήθος προϊόντων, ενώ οι κανόνες τυποποίησης κατά προϊόν απευθύνονται σε περιορισμένο αριθμό προϊόντων. Στους γενικούς κανόνες τυποποίησης συναντάμε τους κανονισμούς EMC, που δεν μπορούν να ενταχθούν (ακόμα) σε κάποια συγκεκριμένη κατηγορία προϊόντων. Γιά παράδειγμα, ο κανονισμός EN50081-1 καθορίζει τα όρια εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, των συσκευών που λειτουργούν στα σπίτια και τροφοδοτούνται από το δίκτυο 230 V. Μεταξύ των άλλων, αναφέρεται ότι κάθε ηλεκτρονική συσκευή ελέγχου, που λειτουργεί με συχνότητα χρονισμού μεγαλύτερη από 9 KHz (δηλ. όλα τα κυκλώματα με μικροεπεξεργαστές), πρέπει να υποβληθεί σε έλεγχο. Η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου, όπως έχει καθοριστεί από την ΕΟΚ, είναι: 30 dB  $\mu\text{V}/\text{m}$ , στην περιοχή συχνοτήτων 30...230 MHz και 37 dB  $\mu\text{V}/\text{m}$  στην περιοχή 230...1000 MHz. Η μέτρηση γίνεται από απόσταση 10 μέτρων. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι τα ραδιόφωνα και οι τηλεοράσεις, που λειτουργούν κοντά σ' αυτές τις συσκευές, δεν θα παρενοχλούνται (πολύ) από παράσιτα. Στο σχήμα 2 φαίνεται μία τυπική διάταξη γιά τη μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Από τον παραπάνω κανονισμό εξαιρούνται οι οικιακές συσκευές, οι λαμπτήρες φθορισμού και οι συσκευές ενδοσυννεύσης, που επικοινωνούν μέσω των καλωδίων του δικτύου 230 V. Οι οικιακές συσκευές υπακούουν στον κανονισμό EN55014, ενώ οι λαμπτήρες φθορισμού ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία προϊόντων. Γιά τις συσκευές ενδοσυννεύσης ισχύει ο κανονισμός EN50065. Σ' αυτόν καθορίζονται τα όρια EMC και οι προδιαγραφές επικοινωνίας (συχνότητες και ισχύς). Στην κατηγορία τυποποίησης κατά προϊόν, εκτός από τις προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, καθορίζονται οι συνθήκες, κάτω από τις οποίες θα λειτουργεί η συσκευή. Οι κανονισμοί τυποποίησης κατά προϊόν, έχουν προβάδισμα από τους γενικούς κανονισμούς. Στην περίπτωση των ορίων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αυτό δεν παίζει σημαντικό ρόλο. Καινοτομία αποτελεί ο κανονισμός EN60555-2, που ασχολείται με την ποιότητα της τάσης του δικτύου 230 V. Ο κανονισμός θέτει όρια στην παραγωγή αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο. Η δημιουργία αρμονικών προκαλείται κατά τη

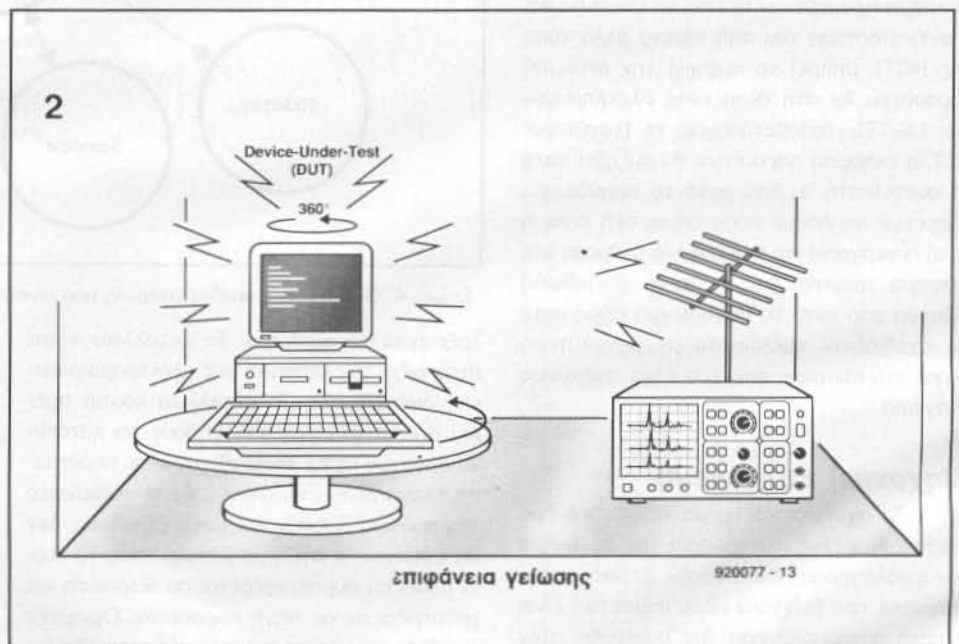
διέλευση της τάσης από μη γραμμικά κυκλώματα. Αυτό αφορά όλα τα κυκλώματα ανορθωτών. Σε αντίθεση με το πλήθος των κανονισμών που ασχολούνται με τη δημιουργία παρασίτων, δεν υπάρχουν πολλοί κανονισμοί τυποποίησης προϊόντων, που να καθορίζουν την ευαισθησία των συσκευών στα παράσιτα. Στα θέματα θωράκισης των συσκευών από εξωτερικές παρεμβολές, αναφέρεται ο γενικός κανονισμός τυποποίησης EN50082-1.

## Νομική και τεχνοοικονομική σκοπιά

Οι προδιαγραφές γιά την EMC δεν αφορούν μόνο τους σχεδιαστές και τους τεχνικούς, αλλά και τα νομικά / τεχνοοικονομικά κλιμάκια της εταιρίας. Την ευθύνη γιά την τήρηση των κανονισμών EMC φέρνει η εταιρία που διαθέτει το προϊόν στην αγορά και ο χρήστης του προϊόντος. Η οδηγία της ΕΟΚ έχει αντίκτυπο στον κατασκευαστή και στο χρήστη του προϊόντος. Η συνυπευθυνότητα του χρήστη περιορίζεται στην τήρηση των οδηγιών λειτουργίας, που θέτει ο κατασκευαστής. Όταν διαπιστωθεί (μετά από επανεξέταση ή δικαστική απόφαση) ότι ένα προϊόν φέρνει εσφαλμένα το σήμα EC, ο κατασκευαστής θα κληθεί να δώσει εξηγήσεις. Το προϊόν πρέπει να αποσυρθεί από την αγορά και πιθανόν, να καταβληθούν αποζημιώσεις. Οι προδιαγραφές EMC αφορούν μία ολόκληρη ομάδα ειδικοτήτων. Γιά να βρεθεί μία ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της μείωσης των παρασίτων, πρέπει να συνεργαστούν πολλά άτομα στην εταιρία. Στο σχήμα 3 φαίνεται η κατανομή χρόνου και εξόδων στις διάφορες φάσεις εξέλιξης ενός προϊόντος, γιά την επί-



Σχήμα 1. Αυτό το παιχνίδι έχει το σήμα CE. Αυτό σημαίνει, ότι μπορεί να πουληθεί ελεύθερα σ' όλες τις χώρες της ΕΟΚ.



Σχήμα 2. Στο σχήμα φαίνεται μία τυπική διάταξη γιά τη μέτρηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

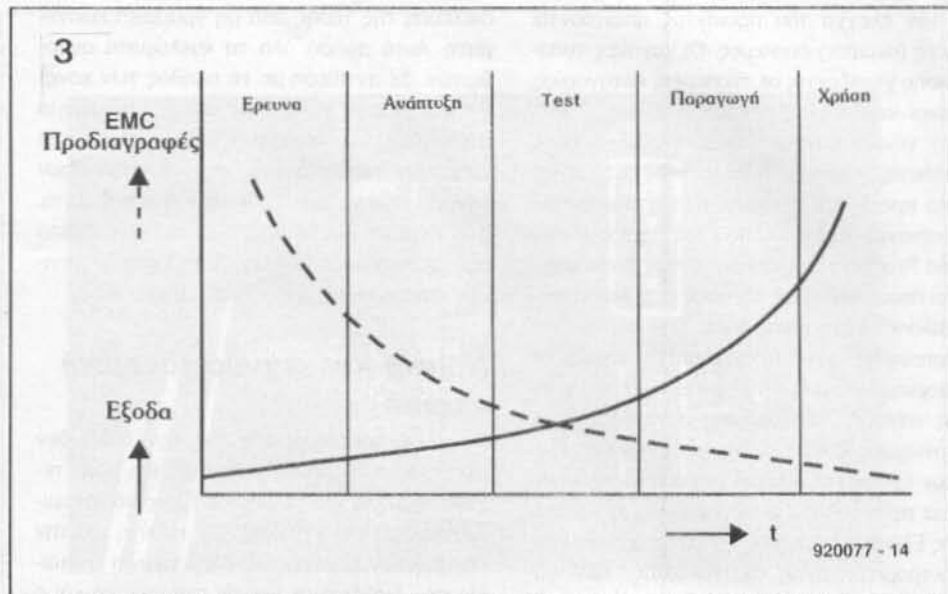
τευξη των στόχων της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Αρχικά, η επίτευξη των στόχων EMC αφορά αποκλειστικά τις διοικητικές υπηρεσίες της εταιρίας. Μία έρευνα αγοράς μπορεί να δώσει απάντηση στο ερώτημα, ποιές είναι οι προδιαγραφές EMC που αφορούν τα προϊόντα που παράγει (ή προτίθεται να παράγει) η εταιρία. Ετσι, θα είναι δυνατόν να υιοθετηθεί η καλύτερη οικονομική πολιτική, για την παραγωγή προϊόντων που θα πληρούν τις προδιαγραφές EMC. Σε κάθε μεγάλη εταιρία πρέπει να υπάρχει ένας υπεύθυνος για θέματα EMC, που θα απασχολείται με την τήρηση των προδιαγραφών ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Ο ίδιος θα αναλαμβάνει την οργάνωση σεμιναρίων, για την μετεκπαίδευση των υπαλλήλων στα θέματα EMC. Η αυστηρή τήρηση των προδιαγραφών EMC, μπορεί να βοηθήσει στις πωλήσεις των αγαθών. Μία εταιρία που διαφημίζει ότι τα προϊόντα της παράγουν λιγότερα παράσιτα από όσα καθορίζει η κοινοτική οδηγία, πλεονεκτεί έναντι του ανταγωνισμού. Στο σχήμα 4 φαίνονται οι ομάδες που λαμβάνουν μέρος στο θέμα EMC. Στη συνέχεια του άρθρου θα αναφερθούμε στις ομάδες που είναι σημειωμένες με αστερίσκο.

### Επιλογή εξαρτημάτων

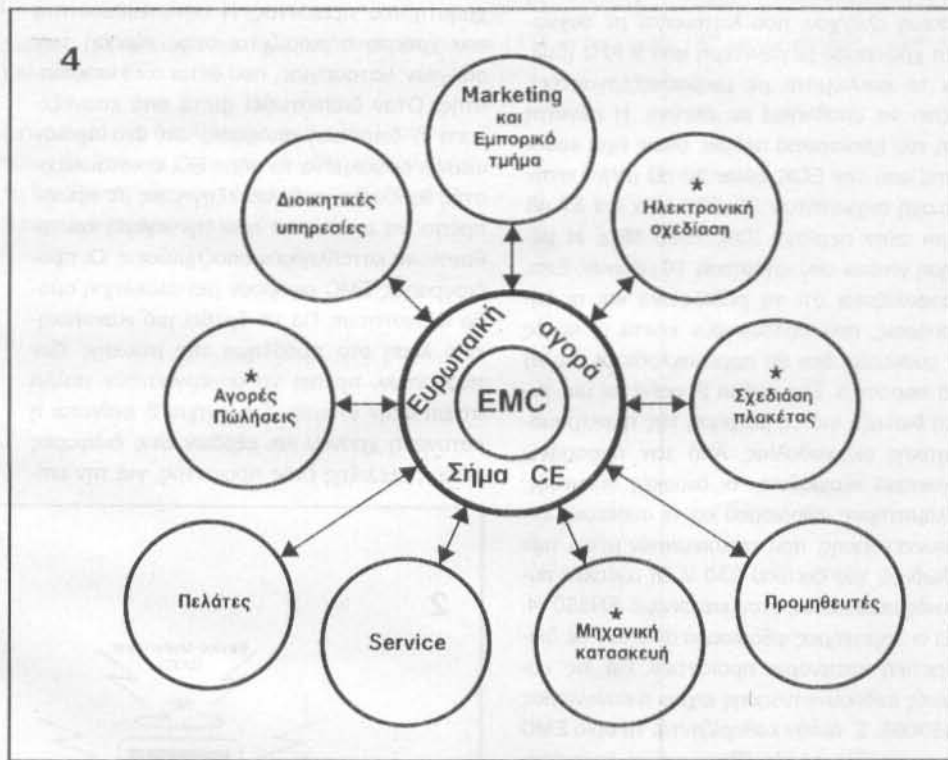
Η επιλογή και αγορά των εξαρτημάτων έχει επίδραση στις προδιαγραφές EMC. Το τμήμα προμηθειών της εταιρίας πρέπει να είναι ενήμερο για το θέμα EMC, όταν έρχεται σε επαφή με τους προμηθευτές. Αν ο σχεδιαστής του προϊόντος αποφασίσει, (λαμβάνοντας υπόψιν τις προδιαγραφές EMC), να χρησιμοποιήσει ένα ολοκληρωμένο LS-TTL, το τμήμα προμηθειών πρέπει να γνωρίζει ότι η αντικατάστασή του από κάποιο άλλο τύπο (πχ. HCT), μπορεί να αυξήσει την εκπομπή παρασίτων. Αν στη θέση ενός ολοκληρωμένου LS-TTL τοποθετήσουμε το (ταχύτερο) HCT, η εκπομπή παρασίτων θα αυξηθεί κατά το συντελεστή 3. Από αυτό το παράδειγμα μπορούμε να δούμε πόσο σημαντική είναι η καλή συνεργασία και επικοινωνία ανάμεσα στα διάφορα τμήματα της εταιρίας. Το (ηθικό!) δίδαγμα από αυτό το παράδειγμα είναι: ποτέ μη σχεδιάζετε κυκλώματα με μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, από όσο είναι απολύτως αναγκαίο.

### Μηχανική κατασκευή

Το σχεδιαστικό τμήμα πρέπει να βρίσκεται σε στενή συνεργασία με το τμήμα συναρμολόγησης. Ακολουθούν μερικά παραδείγματα, που δείχνουν πόσο σημαντική είναι η καλή συναρμολόγηση της συσκευής, στον περιορισμό της εκπομπής και λήψης παρασίτων. Ας ξεκινήσουμε με το κουτί, που θα φι-



Σχήμα 3. Η τήρηση των προδιαγραφών EMC και το κόστος, σε συνάρτηση με τον χρόνο (κατά τη διαδικασία παραγωγής)



Σχήμα 4. Οι διάφορες ομάδες ατόμων, που είναι υπεύθυνες για την τήρηση των κανονισμών EMC.

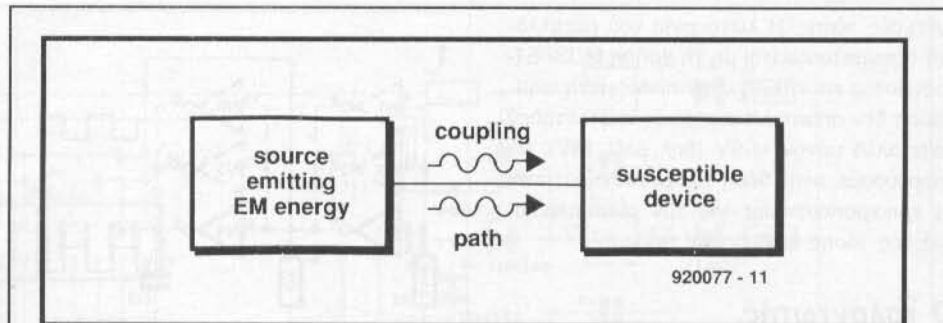
λοξενήσει το κύκλωμα. Το μεταλλικό κουτί περιορίζει την εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής αντινοβολίας. Τα μεταλλικά κουτιά πρέπει πρώτα να συναρμολογηθούν και κατόπιν να βαφτούν (ή να ανοδιωθούν, στην περίπτωση αλουμινένιων κουτιών). Αν οι επιφάνειες του κουτιού βαφούν και μετά βιδωθούν, δεν θα εφάπτονται αγωγίμα μεταξύ τους. Το κουτί παύει να συμπεριφέρεται σα θωράκιση και μετατρέπεται σε πηγή παρασίτων. Ορισμένα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας οφείλονται στη θέση που τοποθετείται το φίλτρο της τάσης του δικτύου. Μία τυχαία

ελεύθερη θέση στο κουτί είναι, συνήθως, η χειρότερη θέση για την τοποθέτηση του φίλτρου. Ένα λάθος εγκατεστημένο φίλτρο δεν θα αποφέρει ποτέ τα αποτελέσματα που περιμένουμε. Η ανεύρεση χώρου για την τοποθέτηση των καλωδιασταινιών, μέσα στο κουτί της συσκευής, πρέπει να γίνει από κάποιον μηχανικό που έχει γνώσεις γύρω από τις προδιαγραφές EMC. Το ίδιο ισχύει για τη διέλευση καλωδίων τροφοδοσίας και ελέγχου, από μη θωρακισμένα τμήματα του κουτιού. Τέτοια καλώδια πρέπει να θωρακιστούν.



## Το ηλεκτρονικό κύκλωμα

Η τήρηση των προδιαγραφών EMC απαιτεί τη συντονισμένη προσπάθεια πολλών ανθρώπων. Την κυρίως, όμως, ευθύνη έχει το τμήμα σχεδίασης. Το προϊόν πρέπει να λειτουργεί σωστά και να πληροί τις προδιαγραφές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Οι σχεδιαστές πρέπει να ενημερωθούν για τις προδιαγραφές EMC και να αποφασίσουν πως θα τις υλοποιήσουν στην πράξη. Στη συνέχεια, πρέπει να συντάξουν ένα τεχνικό εγχειρίδιο, που θα συμβουλευόμαστε κάθε φορά που θα ξεκινούν τη σχεδίαση ενός κυκλώματος. Τα εκπαιδευτικά ιδρύματα διδάσκουν ελάχιστα πράγματα γύρω από τους τρόπους περιορισμού της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί, που ασχολούνται με τη σχεδίαση κυκλωμάτων, έχουν καλές θεωρητικές γνώσεις, αλλά δεν γνωρίζουν πως να τις εφαρμόσουν στην πράξη. Με αυτό το θέμα θα ασχοληθούμε στο δεύτερο μέρος του άρθρου. Ο σχεδιαστής δεν αρκεί να γνωρίζει πως θα σχεδιάσει το κύκλωμα για να λειτουργήσει με την "πρώτη". Εκτός από τις βασικές αρχές σχεδίασης, που είναι πλέον γνωστές σ' όλους, πρέπει να δώσει προσοχή σε (φαινομενικά) δευτερεύοντα προβλήματα. Σ' αυτά συγκαταλέγονται η υψηλή εκπομπή παρασίτων και η ευαισθησία του κυκλώματος στην εξωτερική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Για να περιοριστούν οι τροποποιήσεις στο τελικό κύκλωμα (και μαζί μ' αυτές το κόστος κατασκευής), ο σχεδιαστής πρέπει να προβλέψει τα τυχόν προβλήματα από παράσιτα και να τα εξαλείψει, πριν ακόμα το κύκλωμα συναρμολογηθεί για έλεγχο. Όταν ψάχνουμε για πηγές παρασίτων, πρέ-



### EMC και EMI

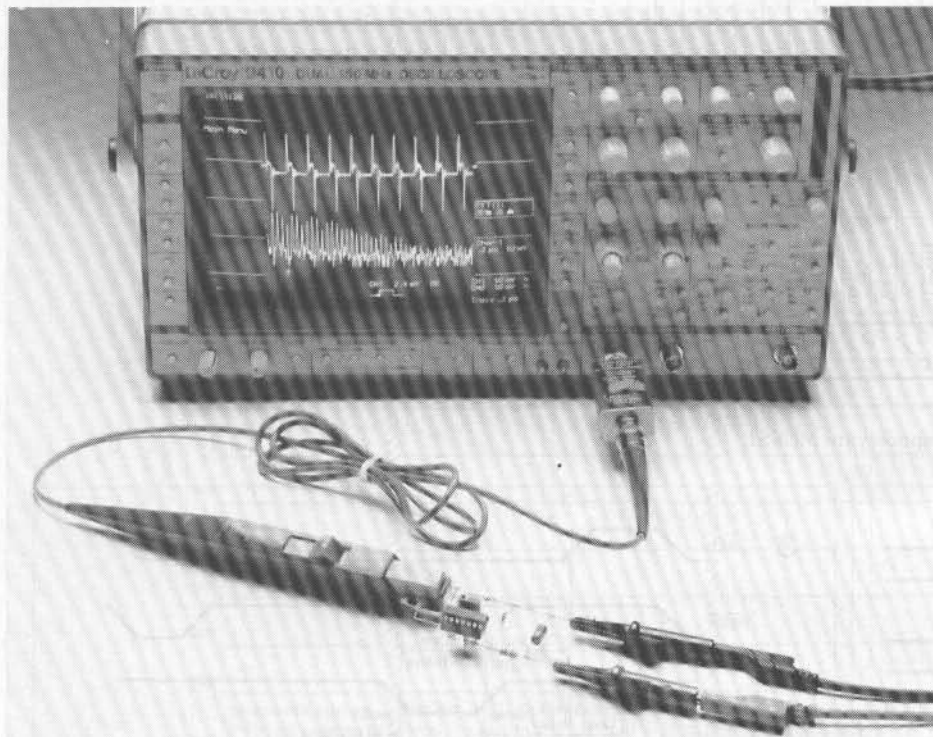
EMC είναι το χαρακτηριστικό μιάς συσκευής να λειτουργεί ικανοποιητικά σε έναν ηλεκτρομαγνητικό χώρο, χωρίς να εκπέμπει υπερβολικές ποσότητες ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Με απλά λόγια, οι ηλεκτρονικές συσκευές δεν πρέπει να δημιουργούν ισχυρά παράσιτα, ούτε να επηρεάζονται από αυτά. Στο σχήμα φαίνεται πως δημιουργείται το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (EMI). Η EMI δεν είναι το παρασιτικό σήμα (αγγλικά disturbance). Στην πράξη, η λειτουργία μιάς συσκευής μπορεί να παρενοχληθεί από πολλές πηγές παρασίτων, ή μία πηγή παρασίτων μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα σε πολλές συσκευές. Οι τρεις παράγοντες του σχήματος (πηγή παρασίτων, μέσο διάδοσης και συσκευή που παρενοχλείται) συναντάται σ' όλες τις περιπτώσεις. Αν εξαλειφθεί ένας από τους τρεις παράγοντες, λύνεται το πρόβλημα των παρασίτων. Το μέσο διάδοσης μπορεί να είναι ένας αγωγός, ένα διηλεκτρικό, ο αέρας ή το κενό. Στην πράξη, η σύζευξη γίνεται με αγωγιμότητα και με ακτινοβολία.

πει να σκεφτόμαστε "αναλογικά". Τελείως αμιγή ψηφιακά κυκλώματα δεν υπάρχουν. Για παράδειγμα, κάθε κόλληση σε χαλκό (συμπεριλαμβανομένων των διαδρόμων στις πλακέτες) εμφανίζει επαγωγή 1 nH/mm. Για τον περιορισμό των παρασίτων και τη μείωση της ευαισθησίας του κυκλώματος σε εξωτερικά αίτια, μεταχειριζόμαστε πρόσθετα εξαρτήματα. Αυτά δεν εξυπηρετούν τις λειτουργικές ανάγκες του κυκλώματος, παρά μόνο βοηθούν στην τήρηση των κανονισμών

EMC. Η σχεδίαση της πλακέτας και η θέση των εξαρτημάτων στο κουτί μπορεί να επηρεάσουν την εκπομπή παρασίτων. Μερικές φορές, μπορεί να είναι οικονομικά συμφέρουσα η χρήση πλακέτας διπλής όψης (με θωρακισμένη την κάτω πλευρά), από την αγορά των εξαρτημάτων, που απαιτούνται για τον περιορισμό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

# Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα

## Μέρος 2. Από τη θεωρία στην πράξη



**Στο πρώτο μέρος ασχοληθήκαμε με τους κανονισμούς και τις οδηγίες της ΕΟΚ, που σχετίζονται με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC). Στο άρθρο που ακολουθεί, θα δούμε τις επιπτώσεις των παραπάνω στην πράξη.**

Η κατασκευή μιάς συσκευής, που θα πληρεί τις προδιαγραφές EMC, ξεκινά από τη σχεδίαση του ηλεκτρονικού μέρους. Πιθανές πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και τυχόν ευαισθησίες του κυκλώματος στα παράσιτα, πρέπει να εξαλειφθούν στα πρώτα στάδια της κατασκευής. Όσο αργότερα ανακαλύψουμε το λάθος, τόσο περισσότερο χρόνο και χρήμα θα χρειαστούμε για να το διορθώσουμε. Η πληθώρα των κυκλωμάτων, οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και οι ιδιαίτερες απαιτήσεις που έχουμε από κάθε κύκλωμα, απαιτούν τέλεια γνώση των θεωρητικών και πρακτικών μεθόδων για την επίτευξη των στόχων EMC. Ακολουθούν, εν συντομία, οι βασικότεροι κανόνες σχεδίασης κυκλωμάτων.

### EMC και κανόνες σχεδίασης

**1. Η σχεδίαση πρέπει να βασίζεται σε ακριβή μοντέλα.**

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο στάδιο της σχεδίασης, πρέπει να αποτελούν

ακριβή αντίγραφα της πραγματικότητας. Όταν περιγράφουμε ένα εξάρτημα (με μιά εξίσωση, ή σ' ένα πρόγραμμα προσομοίωσης), πρέπει να είμαστε ακριβείς και να λαμβάνουμε υπόψη όλες τις πιθανές παραμέτρους (πχ. επαγωγική και χωρητική συμπεριφορά). Κυκλώματα, που φαίνεται να λειτουργούν σωστά στο χαρτί (ή στην οθόνη του υπολογιστή), παρουσιάζουν προβλήματα στην πράξη. Αν διαπιστώσουμε ότι οι μέθοδοι που ακολουθήσαμε για την επίτευξη της EMC, δεν έφεραν τα επιθυμητά αποτελέσματα, πρέπει να επανεξετάσουμε την αξιοπιστία των μοντέλων μας.

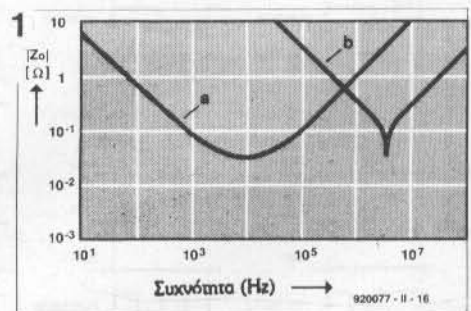
**2. Η συμπεριφορά των εξαρτημάτων πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με τη συχνότητα.**

Στην πράξη, αυτός ο κανόνας ισχύει για την περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 0 Hz και 12 GHz. Για παράδειγμα, ένας οπτοζεύκτης μετατρέπει τα εναλλασσόμενα σήματα σε διαφορικά. Η συμπεριφορά αυτή εξαρτάται από τη συχνότητα και μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα EMC. Ένα άλλο παράδειγμα εί-

ναι η επαγωγική συμπεριφορά (1 mH/m) που παρουσιάζει ο αγωγός γείωσης του δικτύου. Αυτό σημαίνει, ότι δεν αρκεί να γειώσουμε το μεταλλικό κουτί της συσκευής, για να θωρακίσουμε πλήρως το κύκλωμα από τα παράσιτα. Στη συχνότητα των 10 MHz, το σημείο που συνδέεται η γείωση με τη συσκευή, παρουσιάζει σύνθετη αντίσταση 63 Ω. Στο σχήμα 1, φαίνεται η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης στους ηλεκτρολυτικούς και κεραμικούς πυκνωτές, ανάλογα με τη συχνότητα. Στα 10 KHz, η συμπεριφορά του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή θυμίζει περισσότερο επαγωγικό, παρά χωρητικό φορτίο. Αυτή η συμπεριφορά πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την αποσύνδεση της τάσης τροφοδοσίας από τις υψηλές συχνότητες. Τα παραπάνω ισχύουν τόσο για τα αναλογικά, όσο και για τα ψηφιακά εξαρτήματα.

**3. Να υπολογίζετε πάντοτε τα ρεύματα**

Ένας κλειστός βρόγχος μπορεί να διαρρέεται από ρεύμα, ακόμα κι όταν δεν είναι (φαινομενικά, τουλάχιστον) συνδεδεμένος με μιά πηγή τάσης. Ένας βρόγχος, που βρίσκεται μέσα σε ένα μεταβλητό μαγνητικό πεδίο, διαρρέεται από ρεύμα τιμής  $I = -1/R \times d\Phi/dt$ . Αν παρεμβάλουμε στο βρόγχο ένα βολτόμετρο, θα δούμε τη βελόνα του οργάνου να κινείται. Στην τιμή που δείχνει το βολτόμετρο συμπεριλαμβάνεται η τάση, που δημιουργείται εξ' επαγωγής, από τα καλώδια μέτρησης του οργάνου. Τα παραπάνω εξηγούν την αδυναμία μας, να θρούμε χειροπιαστές, τυποποιημένες λύσεις, για τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI). Για να αναλύσουμε βαθύτερα τον όρο "διαφορά δυναμικού", πρέπει να δούμε τι συμβαίνει με τα διάφορα ρεύματα που διαρρέουν το κύκλωμα. Ο δεύτερος νόμος του Maxwell ισχύει για όλες τις συχνότητες που είναι διάφορες του μηδενός και αναφέρει, ότι το ηλεκτρικό δυναμικό ανάμεσα σε δυο σημεία εξαρτάται από το μήκος του μέσου (πχ. του καλωδίου), στο οποίο εφαρμόζεται το ηλεκτρικό πεδίο. Ο γνωστός δεύτερος κανόνας του Kirchhoff (το άθροισμα των τάσεων, ως προς τη γείωση, είναι ίσο με μηδέν), είναι μιά υποπερίπτωση του γενικότερου νόμου του Maxwell (το άθροισμα των τάσεων, ως προς τη γείωση, ισούται

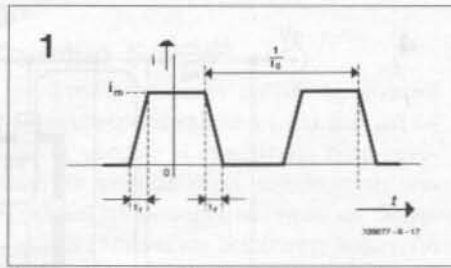


Σχήμα 1. Η σύνθετη αντίσταση δύο πυκνωτών, σε συνάρτηση με τη συχνότητα. Η καμπύλη (a) αντιστοιχεί σ' έναν ηλεκτρολυτικό 2200 μF, ενώ η (b) σ' έναν κεραμικό πυκνωτή 470 nF.

με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής σε συνάρτηση με το χρόνο). Πολές φορές, όταν σχεδιάζουμε ένα κύκλωμα, σκεφτόμαστε μόνο τον κανόνα του Kirchhoff, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα στην επίτευξη της EMC. Ο πρώτος κανόνας του Kirchhoff (το άθροισμα των ρευμάτων, που συνδέονται σ' έναν κόμβο, είναι ίσο με το μηδέν), ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις.

## Το ηλεκτρικό ρεύμα

Αφού δείξαμε ότι τα ρεύματα παίζουν σημαντικό ρόλο στην τήρηση των κανονισμών EMC, κρίνουμε σκόπιμο να δούμε αναλυτικότερα μερικές ιδιότητες του ηλεκτρικού ρεύματος. Καταρχήν, ισχύει ότι τα ρεύματα κινούνται πάντα μέσα σε κλειστούς βρόγχους. Αυτός είναι καθοριστικός παράγοντας, καθώς οι βρόγχοι ρεύματος καθορίζουν την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και την ευαισθησία του κυκλώματος στα παράσιτα. Ετσι εξηγείται, γιατί η γείωση του κυκλώματος δεν φέρνει πάντα τα προσδοκώμενα αποτελέσματα στον τομέα της EMC. Το ρεύμα μπορεί να οδηγηθεί στη γείωση και από κεί να επιστρέψει ξανά σ' ένα άλλο σημείο του κυκλώματος, κλείνοντας βρόγχο. Η γείωση δεν είναι μία μαύρη τρύπα, στην οποία μπορούμε να στείλουμε όλα τα παρασιτικά σήματα χωρίς επιστροφή. Το δεύτερο χαρακτηριστικό του ρεύματος είναι γνωστό από τον ηλεκτρομαγνητισμό. Η ροή του ρεύματος δημιουργεί γύρω της μαγνητικό πεδίο. Ένας αγωγός, που διαρρέεται από ρεύμα, περιβάλλεται από το μαγνητικό πεδίο H. Η φόρτιση του αγωγού δημιουργεί το ηλεκτρικό πεδίο E, ανάμεσα στον αγωγό και το γύρω χώρο. Η σύνθετη αντίσταση (πραγματικό + φανταστικό μέρος) των αγωγών οφείλεται στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Όσο μεγαλώνει η συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, τόσο αυξάνεται η φανταστική αντίσταση. Ο αγωγός γίνεται ευπαθής στα παράσιτα, καθώς αποκτά επαγωγική ή χωρητική σύζευξη με το περιβάλλον. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο προκαλεί σύζευξη σε μικρή απόσταση (γιά τα ηλεκτρικά δεδομένα) γύρω από τον αγωγό. Η σύζευξη αυτή είναι γνωστή με τον όρο διαφωνία. Γιά να εξετάσουμε ένα κύκλωμα, με τη βοήθεια ενός στατικού ή χαμηλής συχνότητας μοντέλου, πρέπει να συμπεριλάβουμε στους τύπους τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Στην περιγραφή των εξαρτημάτων και των πηγών τάσης - ρεύματος, πρέπει να συνυπολογιστεί η παρασιτική τους συμπεριφορά. Οι συζεύξεις των ηλεκτρικών πεδίων αντικαθίστανται, στην περιγραφή του εξαρτήματος, με παρασιτικούς πυκνωτές. Οι μαγνητικές συζεύξεις αντικαθιστούνται με M ή L, ανάλογα με το αν η διαφωνία εμφανίζεται στην άλλη πλευρά ή στην ίδια πλευρά της αυτεπαγωγής. Οι παραπάνω γνώσεις βοηθούν στο σχεδιασμό των πλακετών. Τα περισσότερα αυτόματα προγράμματα σχεδίασης (CAD)



Σχήμα 2. Στην πράξη δεν υπάρχουν τάσεις και ρεύματα με ιδανική ορθογωνική μορφή. Γιαυτό, στην εξίσωση Em κάνουμε λόγο γιά ρεύμα τραπεζοειδούς μορφής.

δεν λαμβάνουν υπόψη τις προδιαγραφές EMC. Ετσι, ο σχεδιαστής της πλακέτας υποχρεώνεται να χαράξει τους κρίσιμους χαλκοδιαδρόμους με το χέρι (περ. το 50% των χαλκοδιαδρόμων).

## Χαμηλή και υψηλή συχνότητα

Γιά να απλοποιήσουμε τα ηλεκτρονικά μοντέλα, μπορούμε να κάνουμε ορισμένες παραδοχές, όσον αφορά την απόσταση της μέτρησης, συχνότητες λειτουργίας κλπ. Ετσι, καταλήγουμε σε μοντέλα χαμηλών συχνοτήτων, που είναι ευκολότερο να υπολογιστούν. Αυτό είναι επιτρεπτό, εφόσον οι διαστάσεις του ηλεκτρικού βρόγχου είναι μικρότερες από το μήκος κύματος  $\lambda$  ( $3 \times 10^8/f$ ) του σήματος. Σαν γενικό κανόνα μπορούμε να δεχτούμε, ότι η απλοποίηση αυτή ισχύει μόνο σε μικρά ηλεκτρικά συστήματα, που το μήκος του βρόγχου τους είναι  $l < \lambda/10$ . Όσες περισσότερες παραδοχές κάνουμε γιά να απλοποιήσουμε το μοντέλο, τόσο μειώνεται η αξιοπιστία του στις υψηλές συχνότητες. Στα μοντέλα χαμηλής συχνότητας, δεν περιγράφονται πλέον αναλυτικά οι αλληλεπιδράσεις των πεδίων, με αποτέλεσμα να βγάζουμε εσφαλμένα συμπεράσματα. Όταν έχουμε να υπολογίσουμε ένα ηλεκτρικό σύστημα με μεγάλο

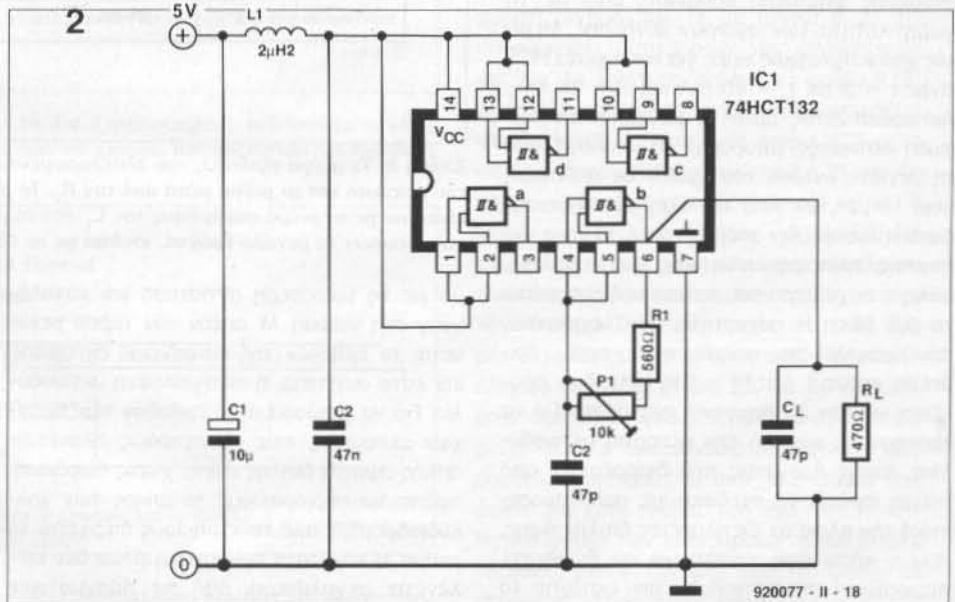
μεγέθος, ( $l > \lambda/10$ , συνηθισμένο φαινόμενο στα κυκλώματα υψηλών συχνοτήτων), χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις των γραμμών μεταφοράς. Τότε, εμπλέκονται χαρακτηριστικές αντιστάσεις, ανακλάσεις, στάσιμα κύματα και διάφορες άλλες παράμετροι.

## Βρόγχοι που διαρρέονται από ρεύμα

Η ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου, που εκπέμπει ένας βρόγχος που διαρρέεται από ρεύμα, εξαρτάται γραμμικά από το εμβαδόν του βρόγχου. Ο βρόγχος μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα μικρό δίπολο. Από τα παραπάνω, φαίνεται καθαρά, ότι το ηλεκτρικό πεδίο εξαρτάται, κυρίως, από την κυματομορφή του ρεύματος, που διαρρέει το βρόγχο. Η μέγιστη ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου, που εκπέμπει ένας μικρός βρόγχος καθώς διαρρέεται από ρεύμα τραπεζοειδούς μορφής (σχήμα 1), μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$E_m = (2 Z_0 S) / (\pi r c^2) f_0 i_m / t_r \quad [V/m]$$

Με r συμβολίζεται η απόσταση από την επιφάνεια του βρόγχου. Αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο σε μεγάλη απόσταση από την πηγή εκπομπής ( $r > \lambda/(2\pi)$ ). Το μήκος κύματος  $\lambda$  ( $= 3 \cdot 10^8/f$ ) δείχνει, αν η παραπάνω απλοποιημένη εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί γιά τον υπολογισμό του πεδίου. Το μήκος κύματος  $\lambda$  δεν αντιστοιχεί στη βασική συχνότητα, αλλά στην αρμονική  $1(\pi t_r)$  Hz. Ο λόγος είναι απλός: το ηλεκτρικό πεδίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή στη μεγαλύτερη συχνότητα του σήματος (στο παράδειγμά μας, η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στα μέτωπα ανόδου και πτώσης των παλμών). Στην εξίσωση εκπομπής, το S συμβολίζει το εμβαδό του βρόγχου που διαρρέεται από ρεύμα, το  $Z_0$  την κυματική αντίσταση του αέρα (377 Ω), το c την ταχύτητα του φωτός (που είναι ίδια με την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων = 3

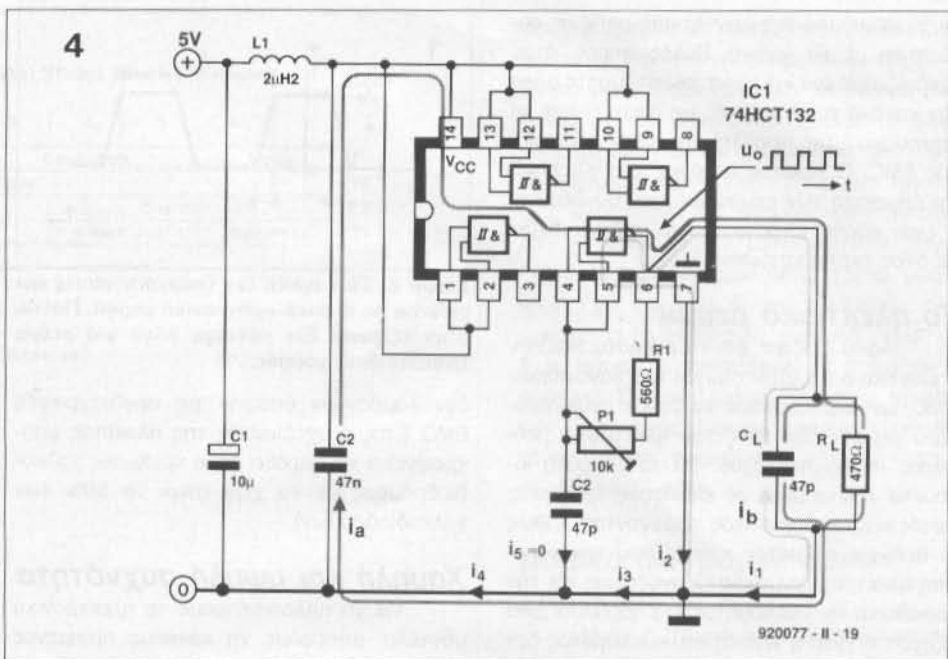


Σχήμα 3. Το κύκλωμα του ψηφιακού ταλαντωτή διαρρέεται από διάφορα ρεύματα. Η μετρική διάταξη φαίνεται στη φωτογραφία, στην αρχή του άρθρου

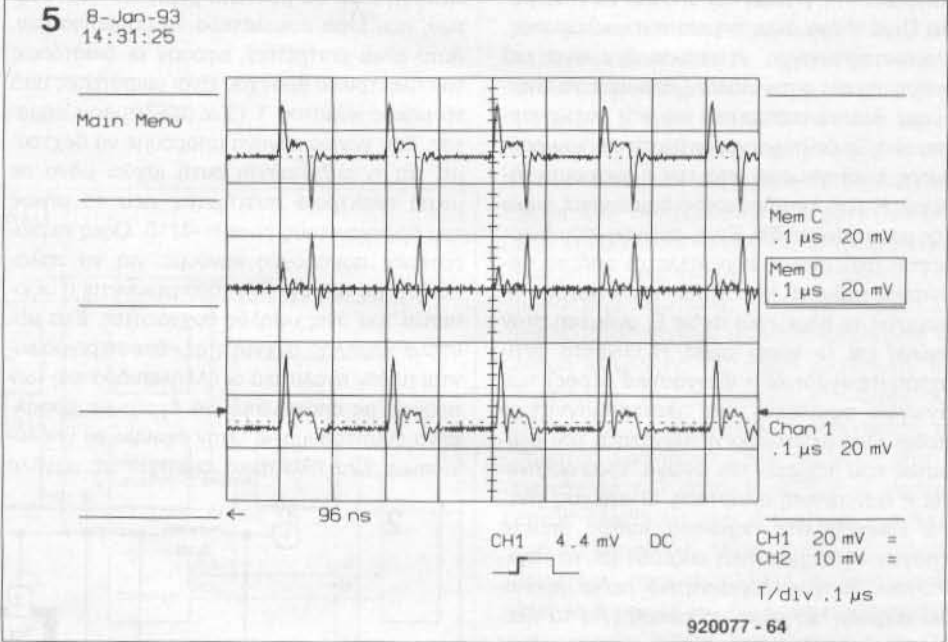


$10^6$  m/s), η  $f_0$  τη βασική συχνότητα του πεζοειδούς ρεύματος, το  $i_m$  τη στάθμη του ρεύματος και ο  $t_r$  τον χρόνο ανόδου (καθόδου) των μετώπων των παλμών. Γιά να υπολογίσουμε το εμβαδόν του βρόγχου, που διαρρέεται από ρεύμα, πρέπει να λάβουμε υπόψην ολόκληρο το κύκλωμα. Ένα πρακτικό παράδειγμα φαίνεται στο κύκλωμα του σχήματος 3. Πρόκειται γιά έναν ταλαντωτή Schmitt Trigger, που είναι κατασκευασμένος με πύλες NAND (74HCT132). Η συχνότητα ταλάντωσης ρυθμίζεται με το P1, μεταξύ 1 MHz και 10 MHz. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής C1 λειτουργεί σαν πηγή τάσης γιά τις ανάγκες του κυκλώματος. Ο πυκνωτής, μαζί με το φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων L1/C1, σχηματίζουν τον βρόγχο εκπομπής προς την πλευρά του τροφοδοτικού. Οι πυκνωτές και το πηνίο αποκόπτουν τις υψηλές συχνότητες. Έτσι, η συχνότητα του ρεύματος, που διαρρέει το βρόγχο, είναι χαμηλή και δεν παρατηρείται εκπομπή παρασίτων. Η πύλη NAND "βλέπει" το σύνθετο φορτίο εξόδου (που συμβολίζεται με το δικτύωμα  $R_L C_L$ ). Έτσι, δημιουργούνται δύο ρεύματα, που συμβάλλουν στην εκπομπή παρασίτων. Το πρώτο ρεύμα σημειώνεται στο σχήμα 4 με  $i_a$ . Αυτό, διέρχεται μέσα από την αντίσταση του φορτίου, φορτίζει τον παρασιτικό πυκνωτή και τροφοδοτεί το ολοκληρωμένο. Το δεύτερο ρεύμα  $i_b$  δημιουργείται όταν η έξοδος της πύλης NAND (IC1b) γίνει λογικό "0". Τότε, εκφορτίζεται ο πυκνωτής  $C_L$  και εμφανίζεται το ρεύμα. Στο σχήμα 5 φαίνονται οι καμπύλες των ρευμάτων  $i_1 \dots i_5$ . Το ρεύμα  $i_5$  είναι ιδιαίτερα μικρό, οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι  $i_4 = i_3$ . Η στάθμη του ρεύματος (και μαζί η ισχύς της ακτινοβολίας που εκπέμπεται) εξαρτάται από τον πυκνωτή  $C_L$  και όχι από τη, σχετικά, μικρή αντίσταση φορτίου  $R_L$ . Ο πυκνωτής εκφράζει τη χωρητικότητα της εισόδου της επόμενης ψηφιακής βαθμίδας, μαζί με τη χωρητικότητα των αγωγών σύνδεσης. Μερικές χαρακτηριστικές τιμές γιά κυκλώματα HCT είναι:  $t_r = 3$  ns,  $i_m = 40$  mA και  $S = 25$  cm<sup>2</sup>.

Αντικαθιστώντας αυτά τα μεγέθη στην εξίσωση εκπομπής, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη ένταση του πεδίου σε απόσταση περ. 10 μέτρων. Από τη λύση της εξίσωσης διαπιστώνουμε ότι υπερβαίνομε το όριο εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μόλις η συχνότητα του ταλαντωτή ξεπεράσει τα 3,3 MHz. Η συχνότητα των αρμονικών, που προκαλεί την υπέρβαση του ορίου, βρίσκεται στους  $1 / (\pi t_r f_0) = 106$  MHz, δηλ. πρόκειται γιά την 33 αρμονική συχνότητα. Γιά να κρατήσουμε χαμηλή την εκπομπή ακτινοβολίας, στους βρόγχους που διαρρέονται από ρεύμα, πρέπει να σχεδιάσουμε πολύ προσεκτικά την πλακέτα. Οι πλακέτες διπλής όψης, που η κάτω όψη χρησιμεύει σα θωράκιση, περιορίζουν την ακτινοβολία που εκπέμπει το κύκλωμα στο περιβάλλον. Τα παρασιτικά σήματα υψηλής συχνότητας ακολουθούν το δρό-



Σχίμα 4. Η εκπομπή ακτινοβολίας του κυκλώματος εξαρτάται από το εμβαδόν των βρόγχων (ως προς τη γείωση) και από το ρεύμα που τους διαρρέει ( $i_a$  και  $i_b$ ).



Σχίμα 5. Το ρεύμα εξόδου  $i_2$  του ολοκληρωμένου καθορίζεται από το ρεύμα φόρτισης / εκφόρτισης του πυκνωτή και το ρεύμα μέσα από την  $R_L$ . Το ρεύμα  $i_2$ , του αγωγού που συνδέεται στη γείωση ( $i_2$ ), είναι ίσο με το ρεύμα εκφόρτισης του  $C_L$  συν το ρεύμα λειτουργίας του ολοκληρωμένου. Το ρεύμα  $i_3$ , που διαρρέει το μεγάλο βρόγχο, ισούται με το άθροισμα των  $i_1$  και  $i_2$ .

μο με τη μικρότερη αντίσταση και καταλήγουν στη γείωση. Μ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται το εμβαδόν της επιφάνειας εκπομπής και κατα συνέπεια, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Γιά να μειώσουμε το εμβαδόν των βρόγχων εκπομπής, στις περιπτώσεις πλακετών απλής όψης ή διπλής όψης, χωρίς θωράκιση, πρέπει να περιορίσουμε το μήκος των χαλκοδιαδρόμων, από τους οποίους διέρχεται το ρεύμα. Η ταχύτητα των κυκλωμάτων δεν επιλέγεται μεγαλύτερη, από τις πραγματικές ανάγκες του κυκλώματος. Από την εξίσωση εκπομπής βλέπουμε ότι η  $E_m$  μειώνεται, όταν

μικραίνει η συχνότητα του σήματος. Όσο μεγαλώνει ο χρόνος  $t_r$ , τόσο μειώνεται η παρασιτική εκπομπή  $E_m$ . Η στάθμη των αρμονικών στη συχνότητα  $1/(\pi t_r)$  Hz εξαρτάται από την  $f_0$ .

### Ασύμμετρα ρεύματα

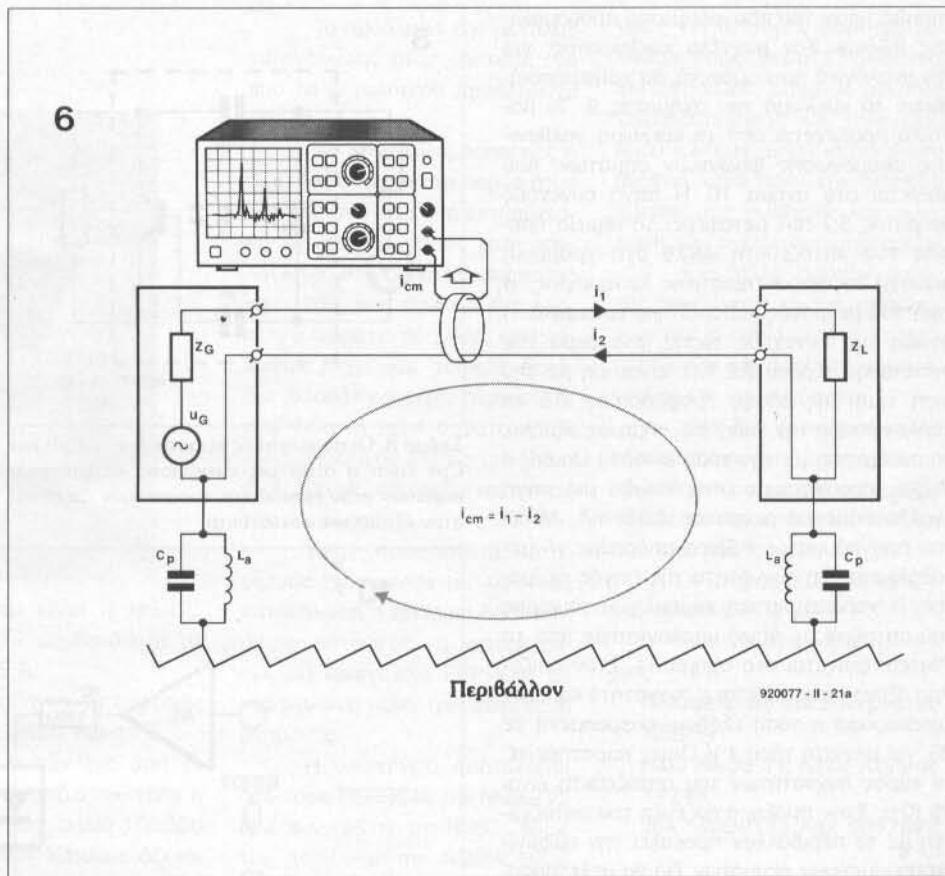
Οι βρόγχοι που διαρρέονται από ρεύμα, επικοινωνούν με το περιβάλλον μέσω αγωγών υλικών ή με τη βοήθεια ακτινοβολίας. Στην περίπτωση μας, το περιβάλλον μπορεί να είναι ένα μεταλλικό τραπέζι, ένα σώμα καλοριφέρ ή ο αγωγός γείωσης του

ρευματοδότη. Το είδος της σύζευξης εξαρτάται, κυρίως, από τη συχνότητα του παρασιτικού σήματος. Η σύζευξη με το περιβάλλον έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία παρασιτικών ασύμμετρων ρευμάτων. Η μορφή των ρευμάτων φαίνεται στην οθόνη του οργάνου, στο σχήμα 6. Το χειρότερο, ο' αυτήν την περίπτωση, είναι ότι, τα ρεύματα διαρρέουν τους αγωγούς σύνδεσης της συσκευής. Όταν το μήκος του αγωγού είναι ίσο με το μήκος κύματος, του ρεύματος που τον διαρρέει (πχ. στα 106 MHz είναι 2,8 m), ο αγωγός συμπεριφέρεται σαν κεραία. Ο αγωγός ακτινοβολεί παράσιτα στο περιβάλλον. Σ' ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα, που οι διαστάσεις του είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος του σήματος, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας οφείλεται στα καλώδια που συνδέονται στην πλακέτα, παρά στο ίδιο το κύκλωμα (τους χαλκοδιαδρόμους της πλακέτας). Η εκπομπή ακτινοβολίας, στα περισσότερα ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα, εξαρτάται από τη στάθμη των ασύμμετρων ρευμάτων υψηλής συχνότητας, που διαρρέουν τα καλώδια σύνδεσης της πλακέτας. Γιά να μετρήσουμε τα ασύμμετρα ρεύματα υψηλής συχνότητας, χρειαζόμαστε μία επαγωγική τσιμπίδα και έναν αναλυτή φάσματος. Κατά τη φάση της ανάπτυξης, μπορούμε να εξετάσουμε αν το έτοιμο κύκλωμα θα πληροί τις

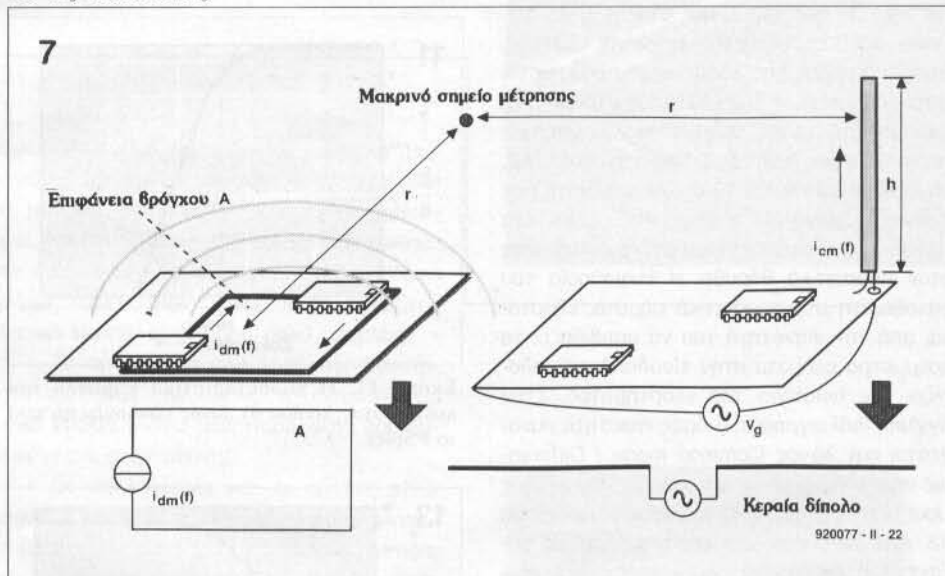
προδιαγραφές εκπομπής ακτινοβολίας της EOK (όριο 30  $\mu\text{V/m}$ ). Όταν το ασύμμετρο ρεύμα, μέσα από ένα καλώδιο (πχ. τροφοδοσίας, μεταφοράς σήματος, καλώδιο εκτυπωτή κλπ) του πρότυπου κυκλώματος, είναι μεγαλύτερο από 5 mA, θεωρείται σχεδόν σίγουρο ότι το έτοιμο κύκλωμα θα ξεπερνά το όριο εκπομπής ακτινοβολίας. Γιά να διορθωθεί η κατάσταση, πρέπει να λάβουμε ορισμένα μέτρα. Η εκπομπή μπορεί να μειωθεί, αν παρεμβάλλουμε μία υψηλή σύνθετη αντίσταση στη ροή του ρεύματος. Γιά παράδειγμα, σε μία καλωδιωταινία που μεταφέρει ψηφιακά σήματα, μπορούμε να τοποθετήσουμε ένα συνδετήρα από φερίτη (σχήμα 6, κάτω μέρος). Σ' αυτό το σημείο πρέπει να προσέξουμε, ώστε ο φερίτης να μην εμποδίζει τη διέλευση των ψηφιακών σημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται, οδηγώντας όλα τα σήματα (σήμα και επιστροφή) μέσα από το φερίτη. Τα πράγματα είναι ευκολότερα στα καλώδια τροφοδοσίας 220 V. Αρκεί να τυλίξουμε το καλώδιο μερικές φορές σε ένα πυρήνα φερίτη. Στο σχήμα 7 φαίνονται δύο περιπτώσεις, όπου η (παρασιτική) ενέργεια μετατρέπεται σε ακτινοβολία.

### Παράδειγμα σχεδίασης

Παρακάτω θα δούμε πως σχεδιάζουμε ένα κύκλωμα, ακολουθώντας τις προδιαγραφές EMC γιά χαμηλή παρασιτική ακτινοβολία. Θα μελετήσουμε ένα κύκλωμα με οπτοζεύκτη. Ο οπτοζεύκτης είναι ένα αναλογικό εξάρτημα που, συνήθως, χρησιμοποιείται σε ψηφιακά κυκλώματα. Σ' αυτές τις εφαρμογές,



Σχήμα 6. Τα ασύμμετρα ρεύματα δημιουργούνται από τη σύζευξη του κυκλώματος με το περιβάλλον. Γιά να τα μετρήσουμε χρειαζόμαστε μία επαγωγική τσιμπίδα κι έναν αναλυτή φάσματος. Οι συζεύξεις με το περιβάλλον δηλώνονται στο σχήμα με τις παρασιτικές χωρητικότητες  $C_p$  και την αυτεπαγωγή  $L_a$  με τη γείωση. Τα φερίτικά υλικά είναι κατάλληλα γιά τον περιορισμό των ασύμμετρων ρευμάτων και της ακτινοβολίας.



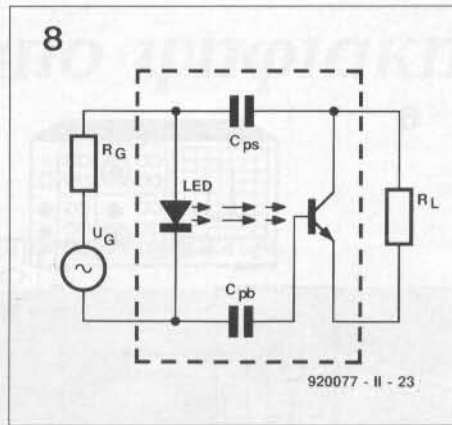
Σχήμα 7. Μετάδοση ενέργειας μέσω ακτινοβολίας. Διαφορική εκπομπή (αριστερά) από τη ροή ενός (επιθυμητού) ρεύματος μέσα από ένα μικρό ηλεκτρικό βρόγχο. Δεξιά φαίνεται η ασύμμετρη εκπομπή, εξαιτίας ενός (ανεπιθυμητού) ρεύματος μέσα από τα καλώδια σύνδεσης.

ο οπτοζεύκτης οδηγείται με ψηφιακή τάση και παράγει ψηφιακά σήματα. Ετσι, είναι δυνατόν να σκεφτεί κανείς, ότι ο οπτοζεύκτης μπορεί να προσομοιωθεί με ένα ψηφιακό μοντέλο. Αν θέλουμε να λάβουμε υπόψιν τις προδιαγραφές EMC, δεν αρκεί να δούμε τον οπτοζεύκτη σαν ένα ψηφιακό μαύρο κουτί (ψηφιακό σήμα εισόδου - ψηφιακό σήμα εξό-

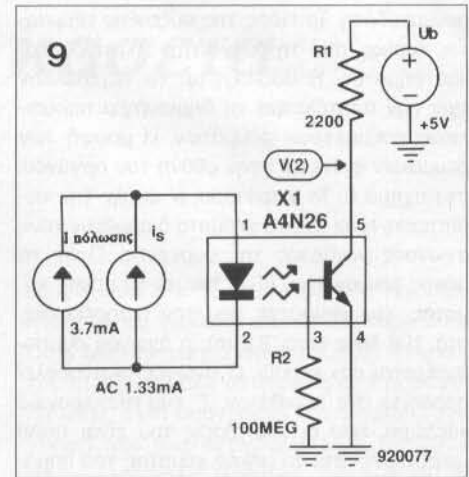
δου και άγνωστο περιεχόμενο). Το αναλογικό μοντέλο του οπτοζεύκτη φαίνεται στο σχήμα 8. Η μεταφορά του σήματος, από την αριστερή πλευρά του εξαρτήματος στη δεξιά, γίνεται οπτικά. Οι δύο πυκνωτές  $C_{ps}$  και  $C_{pb}$  δείχνουν τις παρασιτικές συζεύξεις, ανάμεσα στην είσοδο και στην έξοδο του οπτοζεύκτη. Η επίδραση των πυκνωτών μπορεί να παρα-



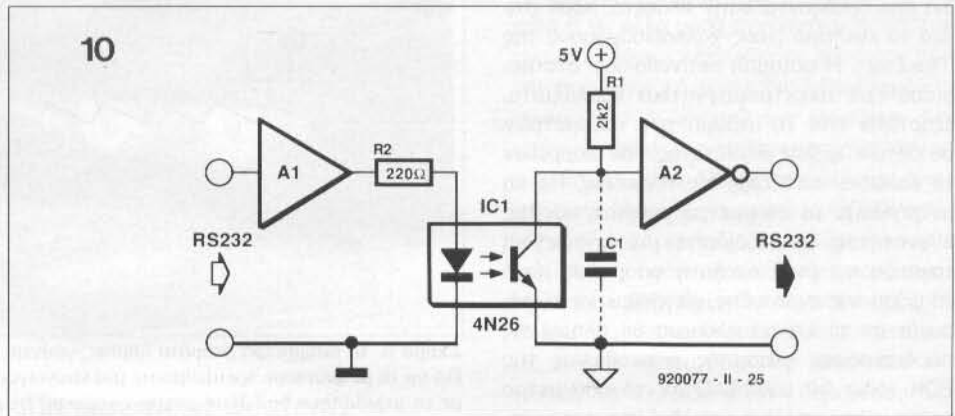
τηρηθεί μέσω του προγράμματος προσομοίωσης PSpice. Σαν μοντέλο κυκλώματος, για τον αναλογικό προσομοιωτή, θα χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 9. Το μοντέλο προέρχεται από το κύκλωμα γαλβανικής απομόνωσης ψηφιακών σημάτων, που φαίνεται στο σχήμα 10. Η πηγής συνεχούς ρεύματος 3,7 mA μεταφέρει το σημείο ηρεμίας του οπτοζεύκτη 4N26 στη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής λειτουργίας. Η τιμή του ρεύματος καθορίστηκε εμπειρικά. Η πτώση της συνεχούς τάσης, στα άκρα της αντίστασης εξόδου 2.2 KΩ, είναι ίση με την μισή τιμή της τάσης τροφοδοσίας. Για να υπολογίσουμε την τάση του σήματος εξόδου, σε συνάρτηση με την τάση εισόδου  $U_{out}/i_s = V(2)/i_s$ , προσθέτουμε στην είσοδο μιά πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος 1,33 mA. Μέσω του προγράμματος PSpice μπορούμε να μεταβάλλουμε τη συχνότητα της πηγής ρεύματος. Η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας του οπτοζεύκτη, όπως υπολογίστηκε από το PSpice, φαίνεται στο σχήμα 11. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζεται η συχνότητα και στον κατακόρυφο η τάση εξόδου, εκφρασμένη σε dB, για μέγιστη τάση 1 V. Όπως παρατηρείτε, το εύρος συχνοτήτων του οπτοζεύκτη είναι 25 KHz. Στην πράξη, η σύζευξη του οπτοζεύκτη με το περιβάλλον προκαλεί την εμφάνιση ασύμμετρων ρευμάτων. Για να μελετήσουμε την επίδραση αυτών των ρευμάτων, συνδέουμε στο μοντέλο του οπτοζεύκτη (σχήμα 9) μιά πηγή τάσης  $U_{cm}$  και δύο αντιστάσεις 50 Ω (μιά παράλληλα και μιά σε σειρά - σχήμα 12). Οι δύο πυκνωτές  $C_{ps}$  &  $C_{pb}$  δείχνουν ότι ο οπτοζεύκτης δεν είναι ιδανικός. Έτσι, ένα μέρος της τάσης  $U_{cm}$  προστίθεται στην τάση εξόδου  $V(2)$ . Όταν η στάθμη της παρασιτικής τάσης αυξηθεί πολύ, υπάρχει περίπτωση να θεωρηθεί, από την πύλη A2, σαν παλμός. Η πύλη A2 συμπεριφέρεται σαν ενισχυτής μεγάλου εύρους. Αυτό είναι ένα τυπικό παράδειγμα αυξημένης ευαισθησίας στον παρασιτικό θόρυβο. Η ευαισθησία του οπτοζεύκτη στα παρασιτικά σήματα, εξαρτάται από την ικανότητά του να υποβιβάζει τα ασύμμετρα ρεύματα στην είσοδο. Αυτό καθορίζει την ποιότητα του εξαρτήματος. Στην αγγλική βιβλιογραφία, ο όρος ποιότητα συναντάται σαν λόγος Common mode / Differential mode. Η γραφική απεικόνιση της σχέσης  $U_{out}/U_{cm} = V(2)/V(4)$  φαίνεται στο σχήμα 13. Από το διάγραμμα φαίνεται, ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα, τόσο μειώνεται η εξαθλίωση των ασύμμετρων ρευμάτων. Αυτό δημιουργεί προβλήματα, γιατί το μεγαλύτερο ποσοστό των ασύμμετρων ρευμάτων έχει υψηλή συχνότητα (> 1 MHz). Για να βελτιώσουμε τη χαρακτηριστική του σχήματος 13, αρκεί να περιορίσουμε το εύρος του οπτοζεύκτη. Στο σχήμα 14 έχουμε συνδέσει τον πυκνωτή C1 (4n7) παράλληλα στο φωτοτρανζίστορ - διακόπτη. Αυτή η συνδεσμολογία περιορίζει το εύρος συχνοτήτων του οπτο-



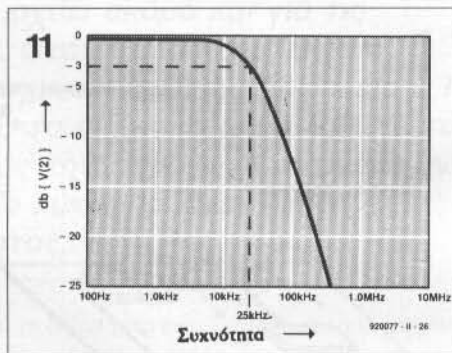
Σχήμα 8. Οι παρασιτικές χωρητικότητες  $C_{pb}$  και  $C_{ps}$  είναι η αιτία της εμφάνισης ασύμμετρων σημάτων στην είσοδο και παρασιτικών σημάτων στην έξοδο του οπτοζεύκτη.



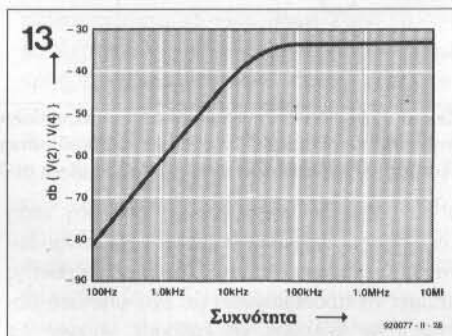
Σχήμα 9. Το μοντέλο του PSpice, που αντιστοιχεί στο γαλβανικό απομονωτή του σχήματος 10.



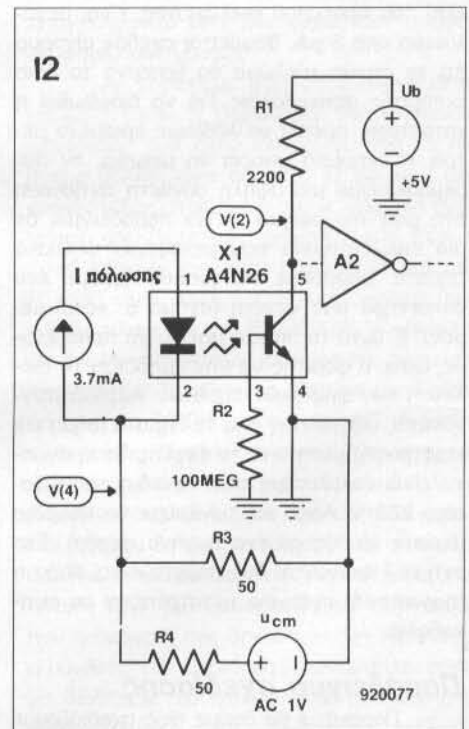
Σχήμα 10. Το κύκλωμα του γαλβανικού απομονωτή ψηφιακών δεδομένων.



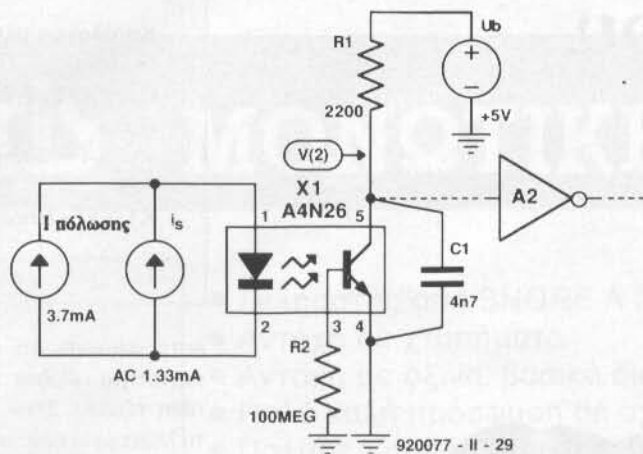
Σχήμα 11. Η χαρακτηριστική καμπύλη του κυκλώματος (σχήμα 9), όπως υπολογίζεται από το PSpice.



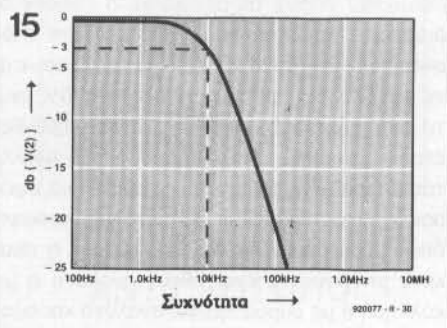
Σχήμα 13. Η επίδραση των ασύμμετρων σημάτων



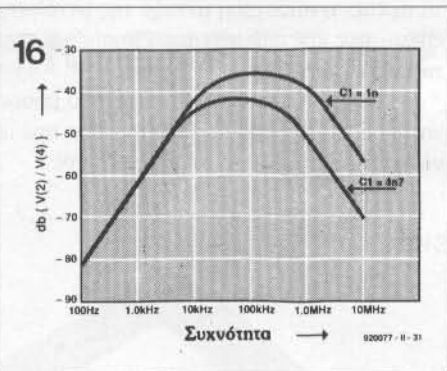
Σχήμα 12. Για να παρατηρήσουμε την επίδραση των ασύμμετρων σημάτων στο σήμα εξόδου του οπτοζεύκτη, προσθέτουμε στο μοντέλο του σχήματος 9 την πηγή τάσης  $U_{cm}$ .



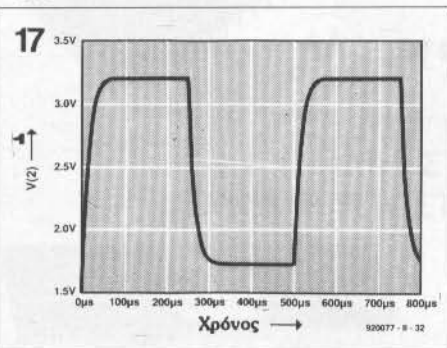
Σχήμα 14. Ο C1 μειώνει το εύρος συχνοτήτων του οπτοζεύκτη, αλλά συγχρόνως, περιορίζει τα ασύμμετρα σήματα, που έχουν μεγάλη συχνότητα.



Σχήμα 15. Στην καμπύλη φαίνεται η μείωση του εύρους συχνοτήτων στα 10 KHz.



Σχήμα 16. Συγκρίνοντας τα διάγραμμα, μ' αυτό του σχήματος 13, βλέπουμε μιά μείωση των παρεμβολών.

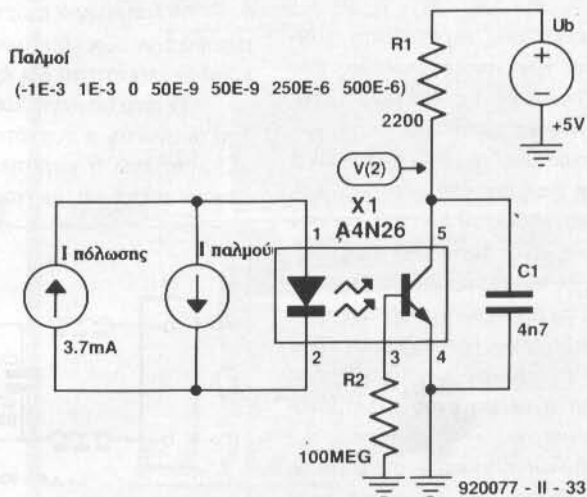


Σχήμα 17. Το σήμα εξόδου, όταν το εύρος του απομονωτή έχει περιοριστεί στα 10 KHz. Η συχνότητα του (θεωρητικά) ορθογωνικού σήματος εισόδου είναι 2 KHz.

ζεύκτη στα 10 KHz (σχήμα 15), αλλά αυξάνει την εξασθένηση των ασύμμετρων ρευμάτων (σχήμα 16). Η εξασθένηση εξαρτάται από την τιμή του πυκνωτή. Επιλέγοντας ένα μικρότερο πυκνωτή (1nF), μειώνεται λίγο η εξασθένηση, αλλά το εύρος συχνοτήτων γίνεται ξανά 25 MHz. Αν το εύρος του κυκλώματος γαλβανικής απομόνωσης καθοριστεί  $BW = 10 \text{ MHz}$ , ο χρόνος ανόδου των παλμών στην έξοδο του οπτοζεύκτη, γίνεται  $35 \mu\text{s}$  ( $t_s = 0,35/BW$ ). Η μέγιστη συχνότητα του σήματος εισόδου, για την οποία μπορούμε να μετρήσουμε ένα ικανοποιητικό σήμα στο συλλέκτη του

**Χρυσοί κανόνες EMC**

- # Όταν σχεδιάζετε κυκλώματα, δεν αρκεί να σκέπτεστε πως θα το κάνετε να λειτουργεί.
- # Οι προδιαγραφές EMC πρέπει να τηρούνται από το στάδιο ανάπτυξης του κυκλώματος.
- # Η αξιολόγηση των χαρακτηριστικών των εξαρτημάτων πρέπει να γίνεται σε συνάρτηση με τη συχνότητα.
- # Το μέγεθος των βρόγχων, που διαρρέονται από ρεύμα, καθώς και ο περιβάλλον χώρος, καθορίζουν το ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- # Ποτέ μη σχεδιάζετε κυκλώματα με μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων, από όσο χρειάζονται.
- # Τα μοντέλα, για την ανάπτυξη των κυκλωμάτων, πρέπει να είναι αντίγραφα της πραγματικότητας.



Σχήμα 18. Το μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε στο PSpice, για τον υπολογισμό του σήματος εξόδου (σχήμα 17).

φωτοτρανζίστορ, υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:  $1/5 BW = 2 \text{ KHz}$ . Το σήμα στην έξοδο του κυκλώματος, όπως το υπολόγισε το πρόγραμμα προσομοίωσης PSpice, φαίνεται στο σχήμα 17. Το τελικό υπολογιστικό μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 18. Το κύκλωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απομόνωση σειριακών ψηφιακών δεδομένων (σε μία θύρα RS232). Η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 4000 Baud (αντιστοιχεί σε 2 KHz). Στο τεύχος 2/93 του ΕΛΕΚΤΟΡ δημοσιεύσαμε το κύκλωμα ενός γαλβανικού απομονωτή για θύρες RS232, που λειτουργεί με ταχύτητα ως 19,2 Kbd. Το κύκλωμα πληρεί όλες τις προδιαγραφές EMC.