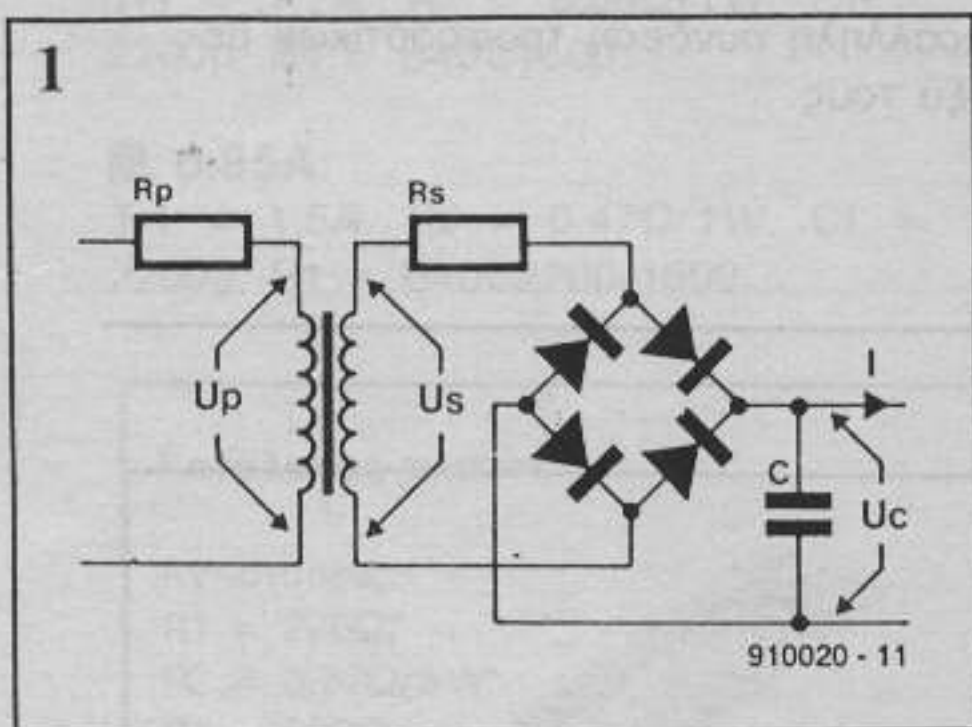


Υπολογισμός δικτύων ανόρθωσης

Ο υπολογισμός της τάσης κυμάτωσης του πυκνωτή εξομάλυνσης, η τιμή του ρεύματος κορυφής που διαρρέει τις διόδους ανόρθωσης, καθώς και μερικά ακόμη μεγέθη, υπολογίζονται συνήθως με τη βοήθεια απλών εμπειρικών κανόνων, τη βάση των οποίων στοχεύει να αναλύσει το παρόν άρθρο.

Ένα τυπικό, βασικής σχεδίασης τροφοδοτικό, έχει συνήθως τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 1. Στο σχήμα αυτό η ένδειξη U_p υποδηλώνει την τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, η R_p αντιπροσωπεύει την συνολική αντίσταση απωλειών του πρωτεύοντος, η U_s είναι



η τάση στο δευτερεύον R_s είναι η συνολική αντίσταση απωλειών δευτερεύοντος ενώ U_c είναι η τάση εξόδου του κυκλώματος χωρίς την εφαρμογή φορτίου (τάση ανοικτού βρόχου).

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι καλό κατά τους υπολογισμούς να συνδυάζεται η δράση των αντιστάσεων απωλειών R_p και R_s σε μια και μόνη παράμετρο απωλειών, η οποία θα αποκαλεσθεί R και η τιμή της (σε Ohm) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$R = (U_s/U_p)^2 R_p + R_s \quad [1]$$

$$R = (U_s/U_p)^2 R_p + R_s \quad [1]$$

Στην πραγματικότητα, σύμπτυξη αυτή σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής δεν πρόκειται να εμπλακεί πλέον στους υπολογισμούς. Αντ' αυτού θα θεωρηθεί ότι τη θέση του καταλαμβάνει μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης, με ηλεκτρεγερτική δύναμη U_s , εσωτερική αντίσταση R και αμελητέα αυτεπαγωγή εφόσον φορτίζεται με το ονομαστικό φορτίο του μετασχηματιστή ή κοντά σ' αυτό.

Ατυχώς όμως, στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων ο υπολογισμός της ολικής αντίστασης απωλειών R είναι αδύνατος λόγω έλλειψης κατασκευαστικών δεδομένων του μετασχηματιστή, ενώ ταυτόχρονα δεν είναι δυνατή και η απ' ευθείας μέτρησή της. Πράγματι, δεν θα κατάφερνε κανείς τίποτε με τη χρήση ενός μετρητή αντιστάσεων, γιατί μια παρόμοια μέτρηση δεν θα λάμβανε υπόψη της, τις απώλειες λόγω μαγνητικής διαρροής και φυσικά θα ήταν αδύνατο να λάβει υπόψη την αντίσταση που εισάγεται από τις διόδους ανόρθωσης.

Για να γίνει μια επιτυχής μέτρηση της συνολικής αντίστασης απωλειών του συστήματος «μετασχηματιστής-γέφυρα ανόρθωσης» είναι απαραίτητη η χρήση ενός μεταβλητού αυτομετασχηματιστή σαν πηγή εισόδου (πρωτεύοντος) και ένα αμπερόμετρο, το οποίο θα συνδεθεί στη θέση του φορτίου, βραχυκυκλώνοντας, ουσιαστικά, τον πυκνωτή εξομάλυνσης C . Με μηδενική τάση εκκίνησης, ο δρομέας του αυτομετασχηματιστή (vari-

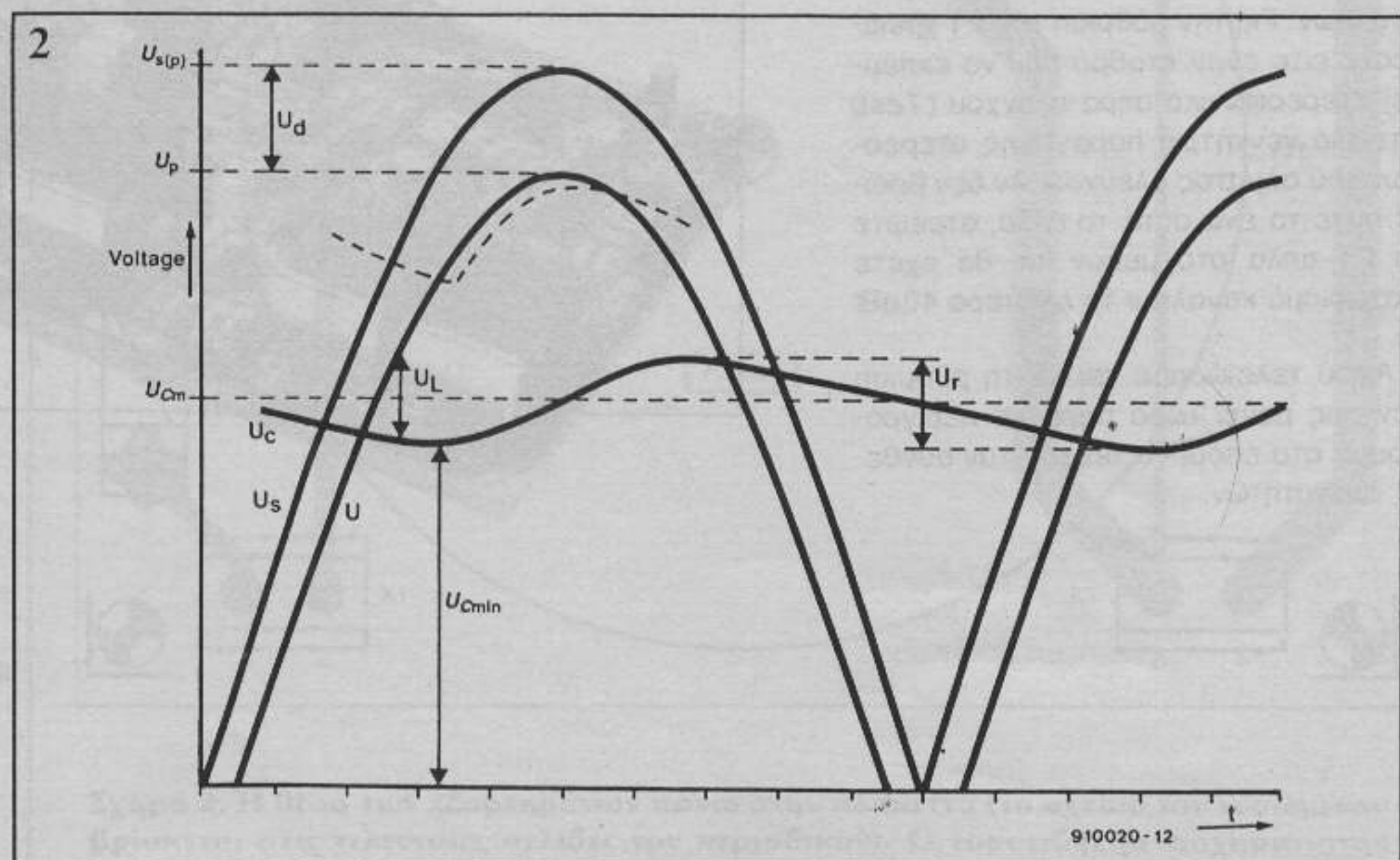
ac) στρέφεται με προσοχή μέχρις ότου η ένδειξη του αμπερομέτρου γίνει ίση με την πρόδιαγραφόμενη από τον κατασκευαστή ένταση του δευτερεύοντος. Η απαιτούμενη τάση εισόδου, στην οποία επιτευχθεί το ρεύμα αυτό, εξαρτάται τόσο από το μετασχηματιστή, όσο και από το variac, τις διόδους ανόρθωσης και το ίδιο το αμπερόμετρο. Εφόσον όμως η ένδειξη του αμπερομέτρου εκφράζει την r.m.s. τιμή του ρεύματος εξόδου, η συνολική αντίσταση απωλειών μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$R = U_s / I_{sc} \quad [2]$$

όπου U_s είναι η τάση στα άκρα του δευτερεύοντος και I_{sc} η ένδειξη του αμπερομέτρου.

Γραφικές παραστάσεις:

Στο σχήμα 2 φαίνονται μερικές από τις κυματομορφές των τάσεων που εμπλέκονται σε μια διαδικασία ανόρθωσης. Αν οι διόδους ανόρθωσης ήσαν ιδανικά



στοιχεία, η κυματομορφή της τάσεως μετά τη γέφυρα ανόρθωσης (χωρίς τον πυκνωτή εξομάλυνσης) θα ήταν σαν την U_s του σχήματος. Επειδή, ωστόσο, δεν υπάρχουν ιδανικά εξαρτήματα, η τάση που πρόκειται να φορτίσει τον πυκνωτή είναι μικρότερη της U_s κατά την τάση «γονάτου» που παρουσιάζουν οι πραγματικές διόδους (U_d). Η τιμή της τάσης αυτής εξαρτάται, στην παρούσα εφαρμογή, από τον αριθμό των εμπλεκόμενων στο κύκλωμα διόδων, και από την χαρακτηριστική τιμή τάσης «γονάτου» καθεμιάς απ' αυτές. Μια γέφυρα ανόρθωσης όπως αυτή του σχήματος 1, θα προκαλέσει μείωση της τάσης U_s κατά 2V περίπου. Έτσι, η τάση μετά τη γέφυρα θα είναι:

$$U = U_s - U_d \quad [2]$$

και θα έχει μορφή παρόμοια με την καμπύλη U του σχήματος 2. Τα πράγματα αρχίζουν να γίνονται κάπως πιο δύσκολα με την τοποθέτηση του πυκνωτή εξομάλυνσης και του φορτίου. Η μορφή της τάσης που προκύπτει τότε, παρουσιάζεται σε μερικά βιβλία, παρόμοια με την διακεκομμένη καμπύλη (αμέσως κάτω από την κορυφή της U), πράγμα που αντιπροσωπεύει μια εξιδανικευμένη κατάσταση και μόνο.

Στην πραγματικότητα, η τάση πάνω στο φορτίο θα έχει μια μορφή, η οποία θα βρίσκεται κάπου μεταξύ της διακεκομμένης καμπύλης και της συνεχούς καμπύλης U_c . Η ακριβής θέση και μορφή της τάσης αυτής εξαρτάται από το λόγο μεταξύ των ρευμάτων φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή εξομάλυνσης.

Η καμπύλη U_c εκφράζει μια ακραία συνθήκη φόρτισης, δηλαδή, την τάση πλήρους ονομαστικού φορτίου και το σχήμα της εξηγείται ως εξής: Από τη στιγμή που η τάση U γίνεται μεγαλύτερη από την U_c , οι διόδους επιτρέπουν τη διέλευση ρεύματος προς τον πυκνωτή εξομάλυνσης μέσω φυσικά και της αντίστασης απωλειών R . Η τιμή του ρεύματος αυτού καθορίζεται κυρίως από τη διαφορά (U_L) μεταξύ των τάσεων U και U_c καθώς και από την τιμή της αντίστασης απωλειών. Στην αρχή του κύκλου φόρτισης η τάση U_L είναι μικρή και έτσι το ρεύμα φόρτισης (I_{ch}) είναι μικρότερο από το ρεύμα εκφόρτισης (I_{dis}). Έτσι, η τάση U_c ελαττώνεται βαθμιαία μέχρι μια ελάχιστη τιμή (U_{cmin}) οπότε εξισώνονται τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης. Ακολούθως, η τάση U_c αυξάνεται και πάλι, λαμβάνοντας το μέγιστο ρυθμό αύξησης τη στιγμή που η τάση U έχει λάβει τη μέγιστη τιμή της (U_p), και συνεχίζει να αυξάνεται ακόμα και όταν η τάση U αρχίζει να ελαττώνεται, διότι το ρεύμα φόρτισης εξακολουθεί να είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα εκφόρτισης. Ωστόσο, μετά από κάποια χρονική στιγμή η τάση U γίνεται αρκετά μικρή ώστε ο πυκνωτής να αρχίσει να εκφορτίζεται οπότε ελαττώνεται και η U_c . Το ποσό αυτής της ελάττωσης εξαρτάται από το ρεύμα I_L το οποίο καλείται να αποδώ-

σει ο πυκνωτής στο φορτίο και από το χρόνο t_{dis} που διαρκεί αυτή η φάση.

Η τιμή του ρεύματος εκφόρτισης είναι γνωστή από την εκάστοτε συγκεκριμένη απαίτηση χρήσης του τροφοδοτικού ενώ η διάρκεια της φάσης εκφόρτισης, ισούται με τη διαφορά μεταξύ της περιόδου της ανορθωμένης τάσης και του χρόνου φόρτισης. Φυσικά ο χρόνος φόρτισης είναι μέχρι στιγμής άγνωστος αλλά γενικά, μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρός συγκριτικά με το χρόνο εκφόρτισης οπότε, πρακτικά η περίοδος εκφόρτισης ισούται με την περίοδο (T_r) της ανορθωμένης τάσης. Πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι η περίοδος (T_r) εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα f της τάσης εισόδου όσο και από τη μέθοδο της ανόρθωσης. Για παράδειγμα όταν γίνεται ανόρθωση πλήρους κύματος, ο πυκνωτής φορτίζεται δύο φορές πιο συχνά απ' ό,τι στην περίπτωση ημιανόρθωσης. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση ημιανόρθωσης η περίοδος είναι $T_r = 1/f$ ενώ στην περίπτωση πλήρους ανόρθωσης είναι αντίστοιχα $T_r = 1/2f$.

Το φορτίο που μπορεί να αποδώσει ο πυκνωτής σ' αυτό το χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$Q = IT_r \quad [4]$$

όπου I_L είναι το ρεύμα που απάγεται από το φορτίο. Έτσι μπορεί να υπολογιστεί και η τάση κυμάτωσης U_r που εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου, από τη σχέση:

$$U_r = Q/C = I/2fC \quad [5]$$

για την περίπτωση πλήρους ανόρθωσης.

Εκτός όμως από την τάση κυμάτωσης, είναι σημαντικό να γνωρίζεις και δύο ακόμη μεγέθη της τάσης εξόδου: Πρώτον τη μέση τιμή της (U_{cm}) για τον υπολογισμό της αποδιδόμενης στο φορτίο ισχύος και δεύτερον την ελάχιστη τιμή (u_{cmin}) που είναι απαραίτητη αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ολοκληρωμένος σταθεροποιητής τάσης. Ο ακριβής υπολογισμός των δύο αυτών μεγεθών είναι διαδικασία αρκετά επίπονη και γι' αυτό στο παρόν άρθρο θα παρατεθούν μόνο προσεγγιστικοί υπολογισμοί, με βάση τα όσα εκτέθηκαν πιο πάνω.

Η επιλογή μεταξύ των δύο προσεγγιστικών μεθόδων που θα δοθούν, για τον υπολογισμό της μέσης τιμής της τάσης στον πυκνωτή εξομάλυνσης, εξαρτάται κυρίως από τη σχέση μεταξύ της αντίστασης απωλειών (R) και της αντίστασης φορτίου R_L .

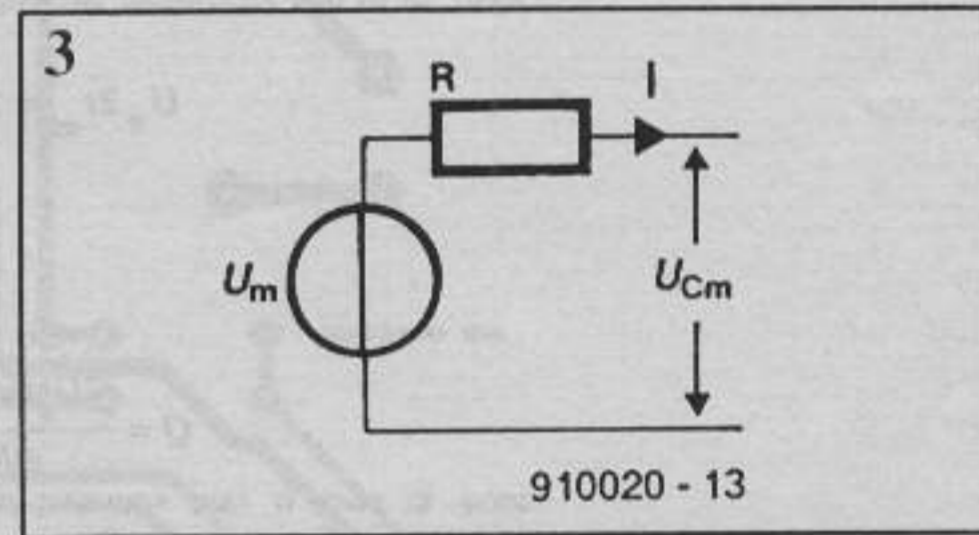
Αν η R_L είναι πολύ μεγαλύτερη από την R , τότε το ρεύμα I_L δια του φορτίου είναι μικρό σχετικά με το ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή. Αυτό σημαίνει ότι ο πυκνωτής προλαβαίνει να φορτισθεί μέχρι την ανώτατη τιμή U_p της διαθέσιμης τάσης U που εμφανίζεται στην έξοδο της γέφυρας. Έτσι η μέση τιμή της τάσης στα άκρα του πυκνωτή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$U_{Cm} = U_p - 1/2U_r \quad [6]$$

ενώ η ελάχιστη τιμή της τάσης στον πυκνωτή είναι:

$$U_{Cmin} = U_p - U_r \quad [7]$$

Αν η αντίσταση φορτίου R_L δεν είναι αρκετά μεγαλύτερη από την συνολική αντίσταση απωλειών (R), ο πυκνωτής της εξομάλυνσης δεν θα προλάβει να φορτισθεί στη μέγιστη τιμή της τάσης και έτσι οι δύο πιο πάνω σχέσεις [6] και [7] δεν μπορούν να εφαρμοστούν πλέον. Ωστόσο η μέση τάση εξόδου μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια του σχήματος 3.



Η πηγή τάσης, η οποία αναπαριστά το μετασχηματιστή μαζί με το κύκλωμα ανόρθωσης, παρέχει μια συνεχή τάση, με τιμή ίση με τη μέση τιμή, της μη εξομαλυσμένης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (U) που παρέχεται μετά την ανόρθωση. Στο σχήμα, η συνολική αντίσταση απωλειών αναπαριστάται από την αντίσταση R . Αν το φορτίο απάγει ρεύμα I_L , η τάση εξόδου θα είναι ελαττωμένη έναντι της U_m κατά ποσό ίσο με την πτώση τάσης στα άκρα της αντίστασης απωλειών, δηλαδή:

$$U_C = U - IR \quad [8]$$

Η τιμή της τάσης U εξαρτάται από τη μέθοδο της ανόρθωσης και είναι, για ανόρθωση πλήρους κύματος ίση με $2U_p/\pi$ ενώ για ανόρθωση ημικύματος είναι $U = U_p/\pi$.

Το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει τις διόδους ανόρθωσης είναι:

$$I_{d(p)} = U_p/R \quad [9]$$

Το ρεύμα αυτό διαρρέει τις διόδους μόνο για λίγους κύκλους της τάσεως εισόδου, αμέσως μετά από τη σύνδεση του τροφοδοτικού, επειδή ο πυκνωτής είναι ακόμη αφορτιστός. Μπορεί ωστόσο να προκύψει παρόμοια τιμή ρεύματος σε περιπτώσεις υπερφορτίσεως του τροφοδοτικού όταν η ελάχιστη τιμή της τάσης κυμάτωσης εγγίζει το μηδέν. Υπό κανονικές συνθήκες, η τάση του πυκνωτή δεν επιτρέπει την εμφάνιση υψηλών ρευμάτων στις διόδους ανόρθωσης καθώς η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης απωλειών είναι (περίπου) $U-U_c$ και έτσι το μέγιστο ρεύμα περιορίζεται στην τιμή:

$$I_d = (U - U_C)/R \quad [10]$$

Ο διόδοι ανόρθωσης πρέπει να είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να αντέχουν σε συνεχή λειτουργία με αυτό το ρεύμα, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να αντέχουν για σύντομο χρονικό διάστημα ρεύ-

ματα κορυφής I_{ch} όπως υπολογίστηκε πιο πάνω.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι, η πιο πάνω παρουσίαση επιτρέπει την πρακτική σχεδίαση και τον προσεγγιστικό μόνον υπολογισμό, του τμήματος ανόρθωσης ενός τροφοδοτικού. Οι τύποι που

δόθηκαν δεν έχουν την ίσως επιθυμητή ακρίβεια του 1% ώστε να καλυφθούν όλες τις εμφανιζόμενες εφαρμογές, αλλά αυτό έγινε σκόπιμα για να αποφευχθεί μια μακροσκελής και κουραστική παρουσίαση.

Πρόσθετες μαθηματικές σχέσεις

Ο πυκνωτής εξομάλυνσης φορτίζεται μέσω της συνολικής αντίστασης απωλειών (R) για τη χρονική περίοδο που βρίσκεται μεταξύ των στιγμών $-t_{ch}$ έως $+t_{ch}$. Το φορτίο (Q) που αποθηκεύεται στον πυκνωτή κατά την περίοδο αυτή, εξαρτάται τόσο από την τιμή του ρεύματος φόρτισης I_{ch} όσο και από τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης $t = 2t_{ch}$

$$Q = I_{ch} t \quad [11]$$

Η μεση τιμή του ρεύματος φόρτισης, εξαρτάται από την τιμή της αντίστασης απωλειών (R) και από τη μεση τιμή της τάσης που εμφανίζεται στα άκρα αυτής της αντίστασης (U_R)

$$Q = U_R 2t_{ch}/R \quad [12]$$

Αλλά, μετά από κατάλληλη ολοκλήρωση συνάγεται ότι:

$$\begin{aligned} U_R 2t_{ch} &= 2U_p \int_0^{t_{ch}} \cos(\omega t) dt = \\ &= 2U_p \sin(\omega t_{ch}) \quad [13] \end{aligned}$$

και συνεπώς

$$Q = \frac{2U_p \sin t_{ch}}{\omega R} = \frac{2I_p \sin t_{ch}}{\omega} \quad [14]$$

όπου I_p είναι η τιμή κορυφής του ρεύματος που μπορεί να παρέχει στιγμιαία ο μετασχηματιστής ($I_p = U_p/R$).

Για να διατηρηθεί η μεση τιμή της τάσης εξόδου σε σταθερά επίπεδα μέσα σε μεγάλο χρόνο, πρέπει, το φορτίο που απαγεται από τον πυκνωτή να είναι ίσο με αυτό που του προσφέρεται κατά τη διάρκεια της φόρτισης, δηλαδή:

$$I_{ch} 2t_{ch} = I_{dis} T_r \quad [15]$$

όπου I_{dis} είναι το ρεύμα εκφόρτισης και T_r περίοδος της ανορθωμένης τάσης. Όπως εξηγήθηκε στο κυρίως κείμενο $T_r = 1/f$ σε περίπτωση ημιανόρθωσης και $T_r = 1/2f$ σε περίπτωση ανόρθωσης πλήρους κυματος.

Εφόσον τα εισερχόμενα και εξερχόμενα φορτία στον πυκνωτή είναι ίσα μεταξύ τους μπορούμε από τις σχέσεις 14 και 15 να συμπερανούμε ότι:

$$\sin(\omega t_{ch}) = \omega I_{dis} T_r / 2I_p \quad [16]$$

από όπου εξαγεται ότι:

$$t_{ch} = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{\omega I_{dis} T_r}{2I_p}\right) \quad [17]$$

Αναλογα με τη μεθοδο της ανόρθωσης $\omega T_r = \pi$ (πλήρης ανόρθωση) ή $\omega T_r = 2\pi$ (ημιανόρθωση). Αν υποθεθεί ότι το I_p είναι κατά πολύ μεγαλύτερο (ή εστω αρκετά μεγαλύτερο) από το I_{dis} , τότε μπορούν να γίνουν μερικές απλουστευσεις στους πιο πάνω τύπους:

$$t_{ch} = \frac{\pi I_{dis}}{2 \omega I_p} = \frac{I_{dis}}{4 f I_p} \quad [18]$$

η αντιστοιχα για την περίπτωση ημιανόρθωσης:

$$t_{ch} = \frac{2 \pi I_{dis}}{2 \omega I_p} = \frac{I_{dis}}{2 f I_p} \quad [19]$$

στις πιο πάνω απλουστευσεις υποθεσαμε ότι η εκφραση $\arcsin(x)$ ισούται κατά προσέγγιση με x αν η τιμή του x είναι μικρότερη από 0.5

Το μεγεθος της τάσης κυμάτωσης U_r καθορίζεται από το ποσό του φορτίου που απαγεται από τον πυκνωτή κατά το διάστημα που δεν φορτίζεται. Η διάρκεια αυτού του διαστήματος είναι $T_r - 2t_{ch}$ και έτσι ισχυει ότι:

$$U_r = Q/C = I_{dis} (T_r - 2t_{ch})/C \quad [20]$$

Σε ένα καλοσχεδιασμένο τροφοδοτικό, ο πυκνωτής φορτίζεται ταχύτατα και έτσι ο χρόνος φόρτισης t_{ch} είναι αμελητέος σε σύγκριση με την περίοδο T_r της ανορθωμένης τάσης.

Το γεγονός αυτο, επιτρέπει μια ακόμη απλουστευση:

$$U_r = I_{dis} T_r / C \quad [21]$$

Η σχέση αυτ, μπορεί να λάβει δύο μορφες:

$$U_r = I_{dis} / 2fC \quad [22]$$

που ισχύει για περίπτωση ανόρθωσης πλήρους κυματος, και

$$U_r = I_{dis} / fC \quad [23]$$

που ισχύει στις περιπτώσεις ημιανόρθωσης.

