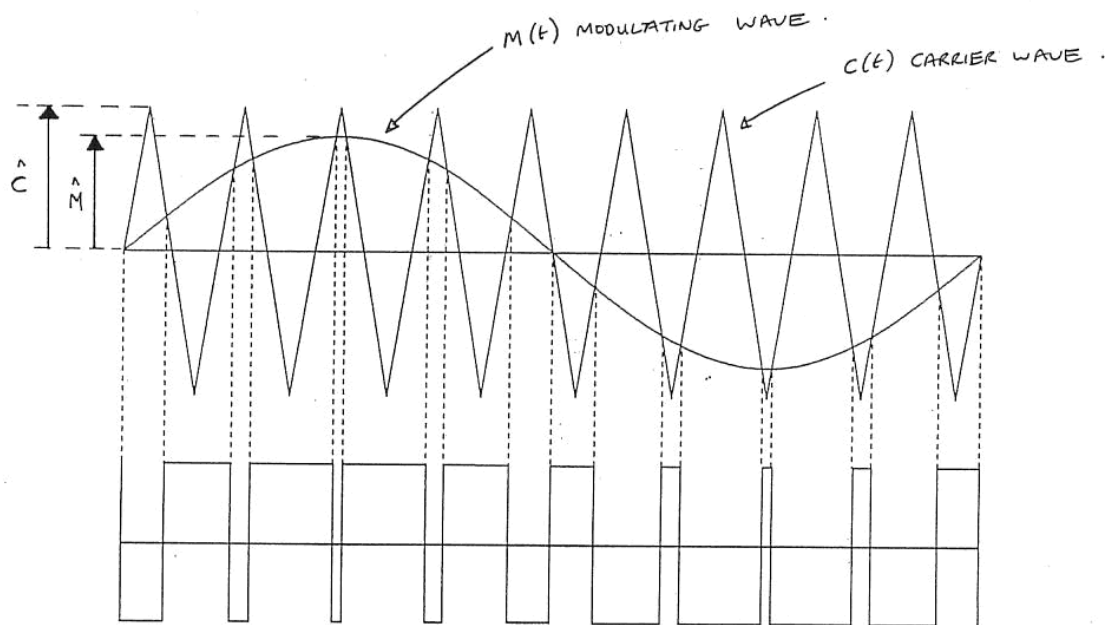


# PWM και SWITCHING τεχνολογίες

Βεζέρης Δημήτριος

Λευκίπου 6, 67100 Ξάνθη, Τηλ.-Fax 2541-084-084, e-mail: [leader@cosmos4u.com](mailto:leader@cosmos4u.com)

[www.vezeris.gr](http://www.vezeris.gr)



Generation of Pulse Width Modulation using natural sampling  
Frequency ratio = 9, Modulation depth = 0.8 ( $M/C$ )

Προσέγγιση θέματος υπό το πλαίσιο εργασίας με θέμα τεχνολογίες PWM & Switching.  
Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Πολυτεχνική Σχολή Ξάνθης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών.

Καθηγητής : Λυγούρας Ιωάννης, Τομέας Ηλεκτρονικής και Τεχνολογίας Συστημάτων  
Πληροφορικής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

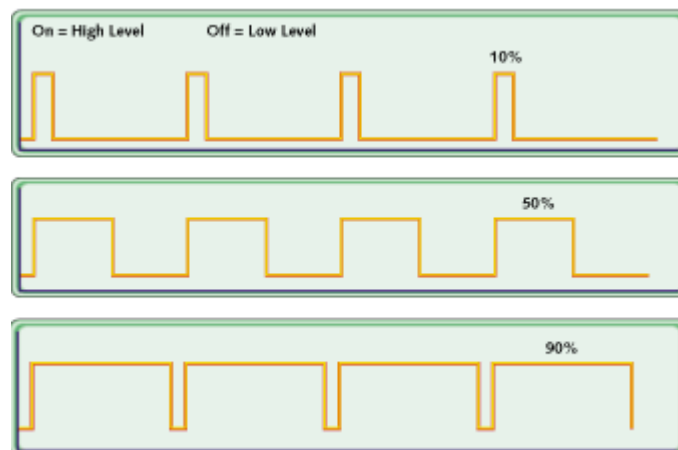
1. PWM .....	3
1.1. PWM – Ο ψηφιακός έλεγχος.....	3
1.2. PWM ελεγκτές .....	4
1.3. Επικοινωνία και έλεγχος.....	4
1.4. Αποτελεσματικός τρόπος διαμόρφωσης.....	5
1.9. Αρχή.....	6
1.10. Δέλτα (Delta) .....	7
1.11. Δέλτα-σίγμα (Delta-sigma) .....	8
1.12. Ψηφιακά.....	8
1.13. Είδη PWM διαμόρφωσης.....	9
1.14. Φάσμα.....	9
1.15. Εφαρμογές.....	9
1.15.1. Τηλεπικοινωνίες.....	9
1.15.2. Παροχή ισχύος.....	10
2. SWITCHING .....	11
2.1. Παλμοτροφοδοτικό .....	11
2.2. Τεχνικό υπόβαθρο.....	11
2.3. Χρήσεις και ιδιότητες .....	11
2.4. Δομή - Λειτουργία .....	12
2.4.1. Στάδιο ανόρθωσης (input rectifier).....	13
2.4.2. Στάδιο αντιστροφής (inverter “chopper”) .....	14
2.4.3. Στάδιο μετατροπής τάσης και ανόρθωσης εξόδου .....	15
2.4.4. Ρυθμίσεις .....	15
2.5. Τεχνικές ελέγχου παλμοτροφοδοτικών.....	15
2.5.1. Έλεγχος βάση τάσης ή ρεύματος.....	16
2.5.1.1. Πλεονεκτήματα .....	16
2.5.1.2. Μειονεκτήματα.....	16
2.5.2. Έλεγχος P.I.D.....	17
2.5.3. Τεχνική προώθησης ανάδρασης.....	17
2.5.4. Οφέλη από ψηφιακές τεχνικές ελέγχου SMPS .....	18
2.5.5. Μεθοδολογία μεταγωγής .....	18
2.5.6. Βρόγχος ελέγχου - Ευστάθεια .....	19
2.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι κοινών τροφοδοτικών .....	21
2.6.1. Πλεονεκτήματα .....	21
2.6.2. Μειονεκτήματα.....	21
2.7. Εφαρμογές.....	21
3. Αναφορές. ....	24

# 1. PWM

## 1.1. PWM – Ο ψηφιακός έλεγχος

Με το να ελέγχουμε ψηφιακά τα αναλογικά κυκλώματα το κόστος του συστήματος και η κατανάλωση ενέργειας μειώνονται δραστικά. Επιπλέον, πολλοί μικροελεγκτές και DSPs περιλαμβάνουν ήδη on-chip ελεγκτές PWM, καθιστώντας εύκολη την εφαρμογή.

Με λίγα λόγια, PWM είναι ένας τρόπος ψηφιακής κωδικοποίησης στάθμεων αναλογικών σημάτων. Μέσω της χρήσης μετρητών υψηλής ανάλυσης, ο κύκλος λειτουργίας ενός τετραγωνικού παλμού διαμορφώνεται για να κωδικοποιεί μία συγκεκριμένη στάθμη αναλογικού σήματος. Το σήμα PWM είναι ακόμα ψηφιακό διότι σε κάθε χρονική στιγμή η πλήρης παροχή DC είναι είτε ολοσχερώς on είτε off. Η τάση ή η πηγή ρεύματος, παρέχεται στο αναλογικό φορτίο με την έννοια των επαναλαμβανομένων σειρών on και off παλμών. Ο ενεργός χρόνος on-time είναι ο χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου η DC παροχή εφαρμόζεται στο φορτίο και ο ανενεργός χρόνος off-time είναι ο χρόνος όπου η παροχή έχει κλείσει. Δεδομένου επαρκούς εύρους ζώνης, κάθε αναλογική τιμή μπορεί να κωδικοποιηθεί με PWM. Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζουμε τρία διαφορετικά PWM σήματα. Το πρώτο έχει 10% της περιόδου κύκλου λειτουργίας on, η δεύτερη έχει το 50% και η Τρίτη το 90%.



Στην παρακάτω εικόνα έχουμε ένα απλό κύκλωμα το οποίο θα μπορούσε να οδηγηθεί χρησιμοποιώντας PWM. Στην εικόνα τροφοδοτούμε μία λάμπα πυρακτώσεως. Εδώ για παράδειγμα αν κλείναμε το διακόπτη για 50ms η λάμπα θα λάμβανε 9V και αν τον ανοίγαμε για 50ms η λάμπα θα λάμβανε 0V. Αν αυτό το κάνουμε 10 φορές σε ένα δευτερόλεπτο η λάμπα θα φαινόταν ως συνδεδεμένη με πηγή 4,5V (50% X 9V). Το παραπάνω ονομάζεται ως κύκλος λειτουργίας 50% με συχνότητα διαμόρφωσης 10Hz.



Οι περισσότερες εφαρμογές βέβαια χρειάζονται υψηλότερες συχνότητες. Πρέπει να υπολογίζουμε και το χρόνο απόκρισης της συσκευής (στις αλλαγές). Φανταστείτε

για παράδειγμα να δίνουμε on για 5'' και off για 5''. Τότε ο κύκλος λειτουργίας θα ήταν 50% αλλά η τάση δε θα ήταν 4,5V. Η λάμπα θα ήταν αναμμένη για 5'' και σβηστεί για άλλα 5''. Οι συχνότητες που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι συνήθως από 1KHz έως 200KHz.

## 1.2. PWM ελεγκτές

Πολλοί μικρό-ελεγκτές εμπεριέχουν μέσα τους PWM ελεγκτές. Για παράδειγμα ο μικρό-ελεγκτής microchip PIC16C67 περιέχει δύο, οι οποίοι έχουν επιλογή on-time και period. Η κύκλος λειτουργίας είναι ο λόγος του on-time/period. Η συχνότητα διαμόρφωσης είναι το αντίστροφο της περιόδου. Για να θέσουμε την PWM λειτουργία συνήθως ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

- A) Θέτουμε την περίοδο στον timer/counter του chip που παρέχει τον διαμορφωμένο τετραγωνικό παλμό,
- B) Θέτουμε το on-time στον καταχωρητή ελέγχου του PWM,
- Γ) Θέτουμε τη διεύθυνση της PWM εξόδου, το οποίο είναι ένα από τα γενικού σκοπού I/O pins,
- Δ) Ξεκινούμε τον χρονιστή,
- E) Ενεργοποιούμε τον PWM ελεγκτή.

Αν και ο κάθε ελεγκτής PWM έχει το δικό του τρόπο προγραμματισμού και ελέγχου, η βασική ιδέα είναι γενικά σχεδόν η ίδια.

## 1.3. Επικοινωνία και έλεγχος

Ένα από τα πλεονεκτήματα των PWM είναι ότι το σήμα παραμένει ψηφιακό σε όλο το κύκλωμα από τον επεξεργαστή στο ελεγχόμενο σύστημα, χωρίς να είναι απαραίτητη καμία μετατροπή από ψηφιακό σε αναλογικό. Κρατώντας το σήμα ψηφιακό, φαινόμενα θορύβου ελαχιστοποιούνται. Ο θόρυβος μπορεί να επιδράσει σε ένα ψηφιακό σήμα μόνο αν είναι τόσο ισχυρός ώστε να μπορεί να αλλάξει το λογικό 1 σε 0 και το αντίστροφο.

Η επίδραση του θορύβου είναι ένας λόγος για το οποίο επιλέγουμε PWM για αναλογικό έλεγχο και είναι ο βασικός λόγος επιλογή PWM στις επικοινωνίες. Εναλλάσσοντας ένα αναλογικό σήμα σε PWM μπορεί να αυξήσει το εύρος ενός επικοινωνιακού καναλιού δραματικά. Στο άκρο λήψης ένα ικανό RC (αντίσταση - πυκνωτής) ή LC (αντίσταση - πηνίο) κύκλωμα μπορεί να αφαιρέσει το διαμορφωμένο τετραγωνικό παλμό υψηλής συχνότητας και να επιστρέψει σήμα σε αναλογική μορφή.

Η εφαρμογή PWM είναι πολύ μεγάλη. Ως συγκεκριμένο παράδειγμα, σκεφτείτε ένα PWM ελεγχόμενο φρένο. Για να το θέσουμε απλά, ένα φρένο είναι μια συσκευή που προβλέπονται σφικτήρες που εφαρμόζονται σε επιφάνεια. Σε πολλά φρένα, το ποσοστό της σύσφιξης - πίεσης (ή διακοπή ρεύματος) ελέγχεται με ένα αναλογικό σήμα εισόδου. Το μέγεθος της τάσης ή του ρεύματος που στάλθηκε προς το φρένο, είναι ανάλογο του μεγέθους της πίεσης που θα ασκηθεί στο φρένο.

Η έξοδος ενός PWM ελεγκτή θα μπορούσε να είναι συνδεδεμένη σε ένα διακόπτη μεταξύ της παροχής και του φρένου. Για να παράγουμε περισσότερη ισχύς παύσης, θα πρέπει να αυξήσουμε τον κύκλο λειτουργίας της PWM εξόδου. Αν ένα ορισμένο ποσό πίεσης στο φρένο απαιτηθεί, πρέπει να παρθούν μετρήσεις για να καθοριστεί η μαθηματική σχέση μεταξύ του κύκλου λειτουργίας και της πίεσης.

Για να θέσουμε την πίεση στο φρένο, ας πούμε στα 100psi, θα πρέπει να υπολογίσουμε αντίστροφα τον κύκλο λειτουργίας ο οποίος θα μπορούσε να

παράγει αυτό το μέγεθος της πίεσης. Τότε θα θέταμε τον κύκλο στη νέα τιμή και θα είχαμε την επιθυμητή ανταπόκριση στην πίεση του φρένου. Εάν είχαμε έναν αισθητήρα τότε θα μπορούσαμε να ρυθμίζουμε συνεχώς τον κύκλο λειτουργίας μέχρι να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Το PWM είναι οικονομικό, μικρό σε μέγεθος και ανεξάρτητο θορύβου. Είναι πλέον ευρέως διαθέσιμο και ευκόλως χρησιμοποιούμενο.

#### 1.4. Αποτελεσματικός τρόπος διαμόρφωσης

Η διαμόρφωση πλάτους παλμού, (PWM) είναι ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος παροχής ενδιάμεσων ποσών ηλεκτρικής ισχύος μεταξύ πλήρης τάσης και άνευ τάσης. Ένας απλός διακόπτης ισχύος με μία τυπική πηγή ισχύος παρέχει πλήρη ισχύ μόνο όταν ο διακόπτης είναι κλειστός. Είναι μία σχετικά πρόσφατη τεχνική που υλοποιείτε από σύγχρονους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος.

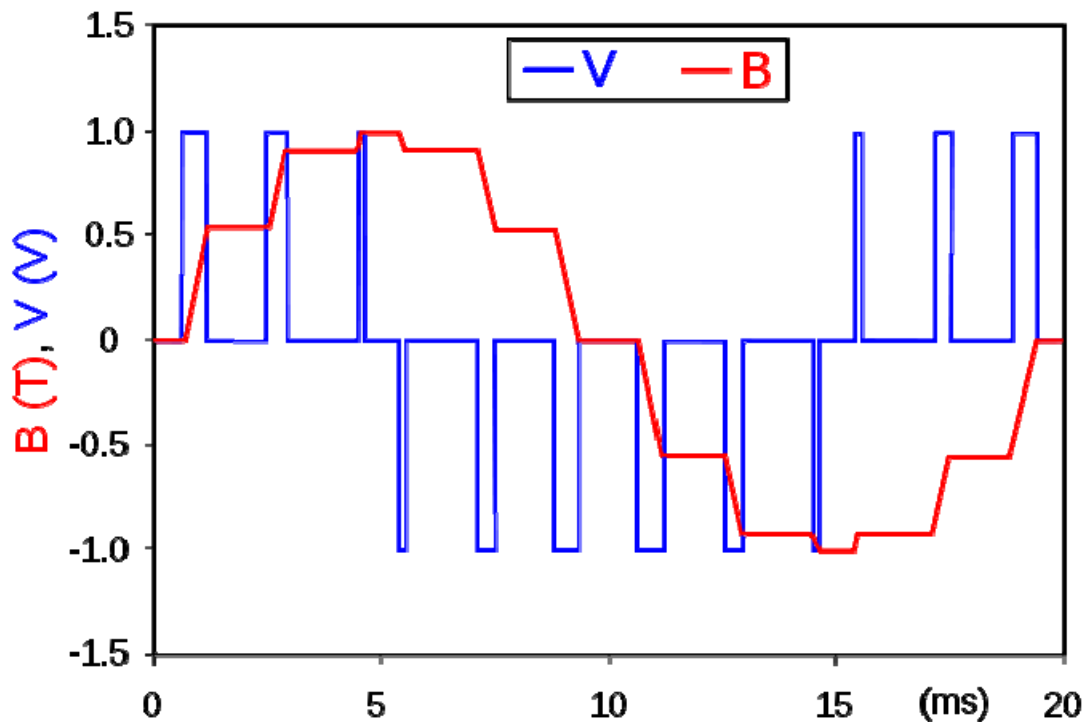
Παλιότερα, όταν μερική ισχύς χρειαζόταν (για παράδειγμα στις ραπτικές μηχανές), ένας ροοστάτης (ο οποίος υπήρχε στη ραπτική μηχανή ως πετάλι στο πόδι), συνδεδεμένο σε σειρά με τον κινητήρα, ρυθμίζοντας το μέγεθος του ρεύματος που θα περνούσε από τον κινητήρα, επίσης θα έχανε ισχύ με τη μορφή θερμότητας στο στοιχείο αντίστασης.

Ήταν ένα όχι και τόσο έξυπνο σχήμα αλλά ανεκτό λόγω μικρής κατανάλωσης ισχύος. Αυτή ήταν μία από τις πολλές μεθόδους ελέγχου ισχύος. Υπάρχουν και άλλες, μερικές χρησιμοποιούνται ακόμα, όπως οι μεταβλητοί αυτό-μετασχηματιστές, συμπεριλαμβανομένου τις μπράντας Autrasta για θεατρικό φωτισμό, και το Variac, για γενική ρύθμιση ισχύος AC. Είναι αρκετά ευέλικτα αλλά αρκετά ακριβά.

Για περίπου ένα αιώνα, μερικοί ηλεκτρικοί κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας, είχαν αξιοπρεπή απόδοση, αλλά ήταν λίγο πολύπλοκοι από ότι οι κινητήρες σταθερής ταχύτητας και μερικές φορές απαιτούνται εξωτερικές ηλεκτρικές συσκευές, σαν μία τράπεζα μεταβλητών αντιστάσεων.

Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για την εφαρμογή μερικής ισχύος σε άλλες συσκευές, όπως ηλεκτρικές θερμάστρες, ροοστάτες φωτός και ρομποτικούς σερβοκινητήρες. Βασικά, ένα μεταβλητό PWM σύστημα ισχύος, διακόπτει την ισχύ γρήγορα μεταξύ πλήρως on και πλήρως off - π.χ. αρκετές φορές το λεπτό σε έναν ηλεκτρικό φούρνο, 120 Hz σε ένα ροοστάτη λαμπτήρα, καθώς και σε δεκάδες ή εκατοντάδες kHz σε ένα τροφοδοτικό υπολογιστή (το οποίο έχει ρυθμιστή εξόδου). Εν πάση περιπτώσει, το ποσοστό εναλλαγών είναι πολύ πιο γρήγορα από ό, τι θα μπορούσε να επηρεάσει το φορτίο, δηλαδή η συσκευή που καταναλώνει την ισχύ. Στην πράξη, εφαρμόζοντας πλήρως την ισχύ για ένα μέρος του χρόνου δεν θα προκαλέσει κανένα πρόβλημα. Η PWM είναι πολύ πρακτική.

Ο όρος κύκλος λειτουργίας περιγράφει την αναλογία του χρόνου on ανά τακτό διάστημα ή την περίοδο του χρόνου, ένας χαμηλός κύκλος λειτουργίας αντιστοιχεί σε χαμηλή ισχύ, διότι η ισχύς είναι off για μεγαλύτερο διάστημα. Ο κύκλος λειτουργίας περιγράφεται με ποσοστό επί της 100 που η ισχύς είναι on. Η PWM λειτουργεί καλά με ψηφιακούς ελεγκτές, διότι λόγω της λογικής on/off, μπορούν εύκολα να θέσουν τον κύκλο λειτουργίας. Η PWM ενός σήματος ή πηγής ισχύος εμπεριέχει τη διαμόρφωση του κύκλου λειτουργίας της, είτε για να μεταφέρουν πληροφορίες σε ένα κανάλι επικοινωνίας ή τον έλεγχο του ποσού της ισχύος που αποστέλλονται σε φορτίο.

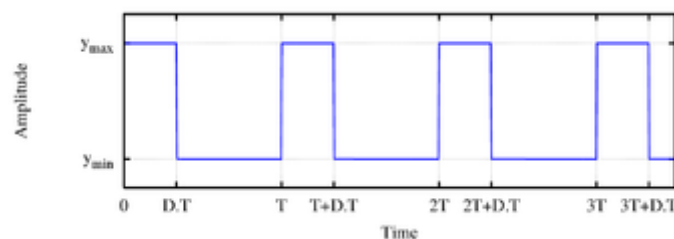


Ένα παράδειγμα PWM: η τάση τροφοδοσίας (μπλε) διαμορφούμενη ως μια σειρά παλμών δίνει ως αποτελέσματα σε μια κυματομορφή πυκνότητας ροής (κόκκινο) σε ένα μαγνητικό κύκλωμα, ηλεκτρομαγνητικών ενεργοποιητών. Η ομαλότητα της προκύπτουσας κυματομορφής, μπορεί να ελέγχεται από το πλάτος και τον αριθμό των τετραγωνικών παλμών που διαμορφώνονται (ανά συγκεκριμένο κύκλο).

### 1.9. Αρχή

Η διαμόρφωση πλάτους παλμού, (PWM) χρησιμοποιεί ένα κύμα τετραγωνικού παλμού, του οποίου το πλάτος, διαμορφώνεται ως συνέπεια της μεταβολής της μέσης τιμής της κυματομορφής. Αν θεωρήσουμε μία κυματομορφή παλμού  $F(t)$  με ελάχιστη  $Y_{min}$  και μέγιστη  $Y_{max}$  και με κύκλο λειτουργίας  $D$  (βλέπε παρακάτω εικόνα), η μέση τιμή της κυματομορφής δίνεται από :

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (1)$$



Εφόσον η  $F(t)$  είναι κύμα παλμών, η τιμή της είναι  $Y_{max}$  όταν  $0 < t < D \cdot T$  και  $Y_{min}$  όταν  $D \cdot T < t < T$

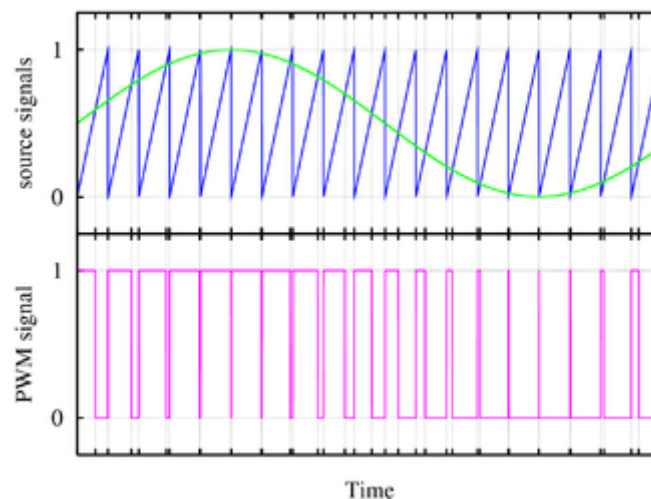
Τότε η (1) γίνεται :

$$\begin{aligned}
 \bar{y} &= \frac{1}{T} \left( \int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \\
 &= \frac{D \cdot T \cdot y_{max} + T(1 - D) y_{min}}{T} \\
 &= D \cdot y_{max} + (1 - D) y_{min} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Η (2) μπορεί να απλοποιηθεί όταν  $y_{min}=0$  τότε  $\bar{y} = D \cdot y_{max}$ .

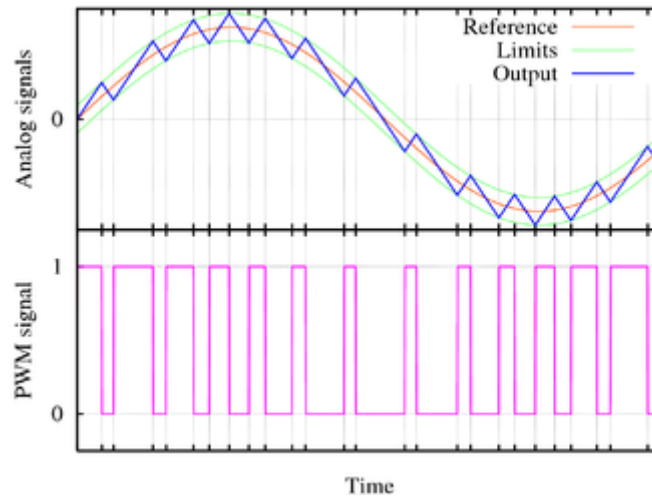
Είναι λοιπόν εμφανές ότι η μέση τιμή του σήματος ( $\bar{y}$ ) εξαρτάτε από τον κύκλο λειτουργίας  $D$ .

Ο πιο απλός τρόπος να παράγουμε ένα PWM σήμα, είναι η μέθοδος της συμβολής, η οποία απαιτεί μόνο μία πριονωτή ή τριγωνική κυματομορφή (εύκολα παραγόμενη χρησιμοποιώντας έναν απλό ταλαντωτή (oscillator)) και ένα συγκριτή (comparator). Όταν η τιμή του σήματος αναφοράς (στο παρακάτω σχήμα η πράσινη συνάρτηση), έχει μεγαλύτερη τιμή από την διαμορφούμενη κυματομορφή (μπλέ συνάρτηση), το σήμα PWM (ρόζ) είναι μέγιστο ( $y_{max} = \text{High}$ ), αλλιώς είναι ελάχιστο ( $y_{min} = \text{Low}$ ).



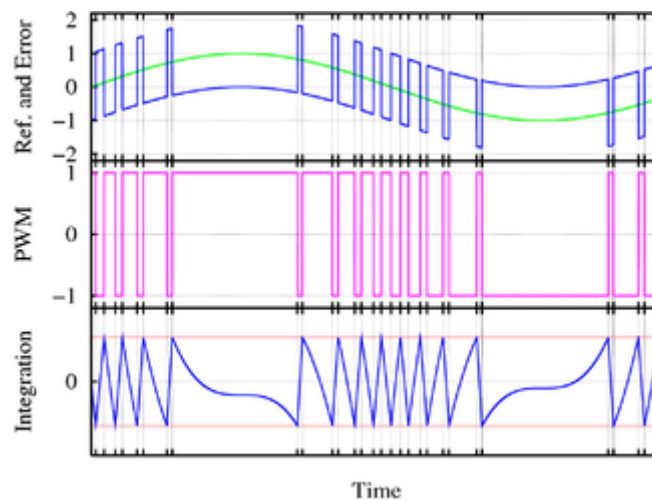
### 1.10. Δέλτα (Delta)

Στη χρήση της διαμόρφωσης Δέλτα (Delta) για έλεγχο PWM, το σήμα εξόδου (μπλέ) ολοκληρώνεται και το αποτέλεσμα συγκρίνεται με τα όρια (πράσινο), τα οποία αντιστοιχούν σε ένα σήμα αναφοράς (πορτοκαλί) μετατοπισμένο σύμφωνα με μία σταθερά. Κάθε φορά που το σήμα εξόδου φτάνει ένα όριο (πράσινο), το σήμα PWM αλλάζει κατάσταση (ροζ παλμοί).



### 1.11. Δέλτα-σίγμα (Delta-sigma)

Στη διαμόρφωση Δέλτα-Σίγμα ως μία PWM μέθοδος ελέγχου, το σήμα εξόδου (το ρόζ PWM) αφαιρείτε από ένα σήμα αναφοράς (πράσινο) για να σχηματίσουν ένα σήμα λάθους (το μπλέ στο πρώτο σχέδιο). Αυτό το λάθος ολοκληρώνεται (το μπλε στο τρίτο σχέδιο) και όταν το ολοκλήρωμα ξεπεράσει τα όρια (κόκκινες γραμμές), τότε η έξοδος αλλάζει κατάσταση.



### 1.12. Ψηφιακά

Πολλά ψηφιακά κυκλώματα μπορούν να παράγουν PWM σήματα (π.χ. πολλοί μικροελεγκτές έχουν PWM εξόδους). Συνήθως χρησιμοποιούν μετρητές οι οποίοι αυξάνουν περιοδικά (είναι συνδεδεμένα άμεσα ή έμμεσα με το ρολόι του συστήματος) και επανατίθεται στο τέλος κάθε περιόδου της PWM. Όταν η τιμή του μετρητή είναι πάνω από την τιμή αναφοράς, η έξοδος PWM αλλάζει κατάσταση από υψηλή σε χαμηλή (ή από χαμηλή σε υψηλή).

Η αύξηση και η περιοδική επαναθέτηση του μετρητή, είναι η διακριτή εκδοχή της προινοτής μεθόδου συμβολής. Ο αναλογικός συγκριτής της μεθόδου συμβολής, γίνεται ένας απλός συγκριτής ακέραιων τιμών ανάμεσα στην τιμή υπάρχον μετρητή και την ψηφιακή τιμή αναφοράς. Ο κύκλος λειτουργίας μπορεί μόνο να

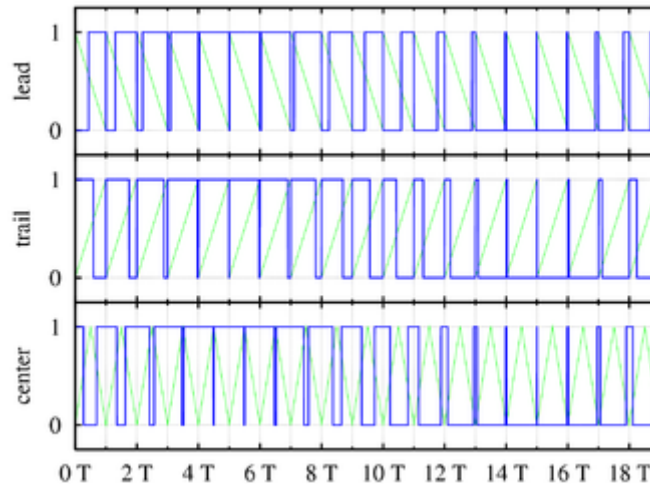


κυμαίνεται σε διακριτές τιμές, ως αποτέλεσμα της διακριτότητας του μετρητή. Όμως ένας πολύ υψηλής διακριτότητας μετρητής μπορεί να παρέχει αρκετά ικανοποιητική απόδοση.

### 1.13. Είδη PWM διαμόρφωσης

Τέσσερα είδη PWM διαμόρφωσης είναι πιθανοί:

1. Το κέντρο του παλμού ρυθμίζεται να είναι στο κέντρο του διαστήματος του χρόνου, και τα δύο άκρα του παλμού μετακινούνται ώστε να συρρικνώνεται ή να αυξάνει το πλάτος του παλμού.
2. Η οδηγούμενη ακμή (άκρο), μπορεί να διατηρηθεί στο οδηγούμενο άκρο του διαστήματος και στο διαμορφωμένο άκρο της ουράς.
3. Το άκρο της ουράς μπορεί να διατηρηθεί και να διαμορφώνεται το οδηγούμενο άκρο.
4. Η συχνότητα επανάληψης των παλμών μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με το σήμα και να είναι σταθερά τα πλάτη των παλμών. Ωστόσο αυτή η μέθοδος έχει ένα πιο περιορισμένο φάσμα μέσης στάθμης εξόδου από ότι οι άλλες τρεις.



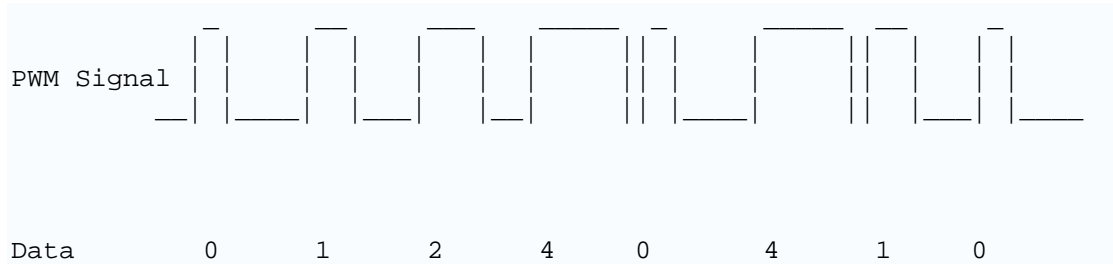
### 1.14. Φάσμα

Τα φάσματα (και στις τρεις περιπτώσεις), είναι παρόμοια και καθένα περιέχει μια dc συνιστώσα, μία βασική πλευρική ζώνη η οποία περιέχει το διαμορφούμενο σήμα και τα φέροντα της διαμορφούμενης φάσης, σε κάθε αρμονική της συχνότητας του παλμού. Τα πλάτη των αρμονικών περιορίζονται από την  $\sin(x)/x$  (ημιτονοειδής συνάρτηση) και εκτείνονται στο άπειρο.

### 1.15. Εφαρμογές

#### 1.15.1. Τηλεπικοινωνίες

Στις τηλεπικοινωνίες, τα πλάτη των παλμών αντιστοιχούν σε κωδικοποιημένες τιμές δεδομένων στο ένα άκρο και αποκωδικοποιημένες στο άλλο. Παλμοί διαφόρων μεγεθών (οι οποίοι είναι και η πληροφορία), αποστέλλονται ανά τακτά διαστήματα (η φέρουσα συχνότητα της διαμόρφωσης).



Η συμπερίληψη ενός σήματος ρολογιού δεν είναι απαραίτητη καθώς το οδηγούμενο άκρο του σήματος δεδομένων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρολόι, εάν μία μικρή μετατόπιση προστεθεί στην τιμή δεδομένου για να αποφευχθεί ένας παλμός μηδενικού πλάτους.

### 1.15.2. Παροχή ισχύος

Η διαμόρφωση PWM χρησιμοποιείται για τη μείωση κατανάλωσης ισχύος σε φορτίο χωρίς απώλειες, όπως θα είχαμε σε πηγές οι οποίες φέρουν αντιστάσεις. Αυτό είναι συνέπεια του ότι η μέση ισχύς που παρέχεται είναι ανάλογη του κύκλου λειτουργίας της διαμόρφωσης. Με ένα αρκετά υψηλό ρυθμό διαμόρφωσης, ηλεκτρονικά παθητικά φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξομάλυνση του συρμού του παλμού και ανάκτηση μιας μέσης αναλογικής κυματομορφής.

Συστήματα ελέγχου ισχύος υψηλής συχνότητας PWM είναι εύκολα υλοποιήσιμα με ημιαγωγούς-διακόπτες (semiconductors switches). Η διακριτές on/off καταστάσεις της διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κατάστασης των διακοπών που ελέγχουν αντίστοιχα την τάση που εφαρμόζεται ή το ρεύμα που διαπερνά το φορτίο.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι οι διακόπτες είναι είτε off και όχι σε επαφή με το ρεύμα είτε on και έχουν (ιδανικά) καμία πτώση τάσης πάνω τους. Το παραγόμενο ρεύμα και τάση σε κάθε χρονική στιγμή καθορίζει την ισχύ που παρέχεται από το διακόπτη χωρίς (θεωρητικά) να γίνεται καμία κατανάλωση στο διακόπτη. Πραγματικοί διακόπτες ημιαγωγών όπως MOSFET & BJTs δεν είναι ιδανικοί διακόπτες αλλά υψηλής απόδοσης ελεγκτές μπορούν να παραχθούν.

Ωστόσο κατά τις μεταβάσεις μεταξύ των on / off καταστάσεων αναφορικά η ισχύς διαχέεται και στους διακόπτες., αλλά η αλλαγή της κατάστασης μεταξύ πλήρης on και πλήρης off είναι αρκετά γρήγορη σε σχέση με την τυπικές on/off καταστάσεις, ώστε ο μέσος όρος διάχυσης ισχύος να είναι πολύ χαμηλός συγκρινόμενος με την ισχύς που καταναλώνεται.

Επίσης η PWM χρησιμοποιείται στον έλεγχο παροχής ηλεκτρικής ισχύος, σε μία άλλη συσκευή όπως ταχύτητας ελέγχου ηλεκτροκινητήρων, στη θεμελιώδη λειτουργία ενισχυτών ήχου μεταγωγής τάξης D, ελέγχου φωτεινότητας πηγών φωτός και πολλές άλλες εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος. Για παράδειγμα, ροοστάτες φωτεινότητας για οικιακή χρήση απασχολούν ένα ειδικό τύπο PWM ελέγχου. Ροοστάτες φωτός οικιακής χρήσης τυπικά περιέχουν ηλεκτρονικά κυκλώματα τα οποία καταστέλλουν την τρέχουσα ροή κατά τη διάρκεια καθορισμένων διαστημάτων του κύκλου λειτουργίας της AC υπό τάση γραμμής. Η ρύθμιση της φωτεινότητας του φωτός που εκπέμπεται από μία πηγή φωτός.

## 2. SWITCHING

### 2.1. Παλμοτροφοδοτικό

Ένα παλμοτροφοδοτικό (Switched-mode power supply) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία μετατρέπει μια ασταθή εισερχόμενη τάση (συνεχής ή εναλλασσόμενη) σε μια συνεχή τάση άλλου επιπέδου. Σε αντίθεση με τον ανορθωτή τάσης, το παλμοτροφοδοτικό έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης.

Σε αντίθεση με τα κοινά τροφοδοτικά με μετασχηματιστές 50- ή 60-Hz, τα παλμοτροφοδοτικά μετατρέπουν πρωτίστως την τάση σε συνεχή, για το μετασχηματισμό τη μετατρέπουν σε εναλλασσόμενη υψηλότερης συχνότητας και μετά το μετασχηματισμό την επαναφέρουν σε συνεχή.

### 2.2. Τεχνικό υπόβαθρο

Τα κοινά τροφοδοτικά περιέχουν έναν μετασχηματιστή απομόνωσης για το μετασχηματισμό της τάσης. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς με μετασχηματιστές αυξάνεται χωρίς απώλειες αναλογικά με τη συχνότητα. Όταν λειτουργεί ο μετασχηματιστής με υψηλότερη συχνότητα, μπορεί να μεταφέρει περισσότερη ισχύς. Ισχύει και το αντίστροφο: Το βάρος του πυρήνα του ΜΣ μπορεί για την ίδια ισχύ να μειωθεί αισθητά και το τροφοδοτικό να γίνει ελαφρύτερο.

Οι πυρήνες των Μ/Σ των παλμοτροφοδοτικών κατασκευάζονται από φερρίτη (φερομαγνητική κεραμική) ή από ρινίσματα σιδήρου για τη μείωση των απωλειών των ρευμάτων υστέρησης και δινορεύματα. Ακόμη και τα τυλίγματα του Μ/Σ, σε υψηλή συχνότητα, κατασκευάζονται σαν επίπεδο τυλίγμα χαλκού, για την αποφυγή του επιδερμικού φαινομένου. Για παράδειγμα ένας Μ/Σ για τη μεταφορά 4000W ζυγίζει:

Στα 50 Hz περίπου 25 κιλά

Ενώ στα 125 kHz μόνο 0,47 κιλά.

Οι γρήγορες αλλαγές στην τάση και την ένταση σε ένα παλμοτροφοδοτικό οδηγεί σε θόρυβο υψηλής συχνότητας, ο οποίος θα πρέπει να μειωθεί με τη χρήση φίλτρων.

### 2.3. Χρήσεις και ιδιότητες

Τα παλμοτροφοδοτικά λόγω της υψηλής ορισμένης ισχύος που μπορούν να φτάσουν, χρησιμοποιούνται για την εξοικονόμηση σε χώρο και υλικά. Σε αντίθεση με τα κοινά τροφοδοτικά χαμηλής ισχύος, τα παλμοτροφοδοτικά χαμηλής ισχύος παρέχουν υψηλό βαθμό απόδοσης.

Τα παλμοτροφοδοτικά λόγω των πολύ μικρών απωλειών χαλκού, παρέχουν σε μια περιοχή λειτουργίας περίπου στα 300 W, υψηλό βαθμό απόδοσης (σε πολλές περιπτώσεις πάνω από 90%) από ότι τα κοινά τροφοδοτικά και μπορούν να κατασκευαστούν σε πολύ μικρότερες διαστάσεις και πολύ ελαφρύτερα από τα κοινά τροφοδοτικά, τα οποία περιέχουν έναν βαρύ Μ/Σ με σιδηροπυρήνα και προκαλούν μεγαλύτερες απώλειες.

Η απόδοση της τάσης λαμβάνει χώρα μέσω Μ/Σ με πυρήνα φερρίτη, ο οποίος είτε λειτουργεί σαν αποθηκευτής ενέργειας με αυτεπαγωγή, είτε έχει κάποιο πηνίο για την αποθήκευση ενέργειας. Περιοδικά αποθηκεύεται τόση ενέργεια στην αυτεπαγωγή όση απαιτείται για το φορτίο. Η τάση εξόδου μετά την εξομάλυνση φιλτράρεται με πυκνωτές, ώστε να πάρουμε στην έξοδο μια συνεχή τάση.

Συνήθως πρέπει η παλμική συχνότητα να απομακρυνθεί τελείως από την τάση εξόδου(Ηλεκτρομηχανολογική συμβατότητα) . Η παλμική συχνότητα μεταφέρεται σε μια περιοχή συχνότητας με μικρότερο θόρυβο. Συχνότητες με θόρυβο υπάρχουν μόνο πάνω από την παλμική συχνότητα. Η μείωση των θορύβων αυτών επιτυγχάνεται με τη χρήση πηνίων (φίλτρα).

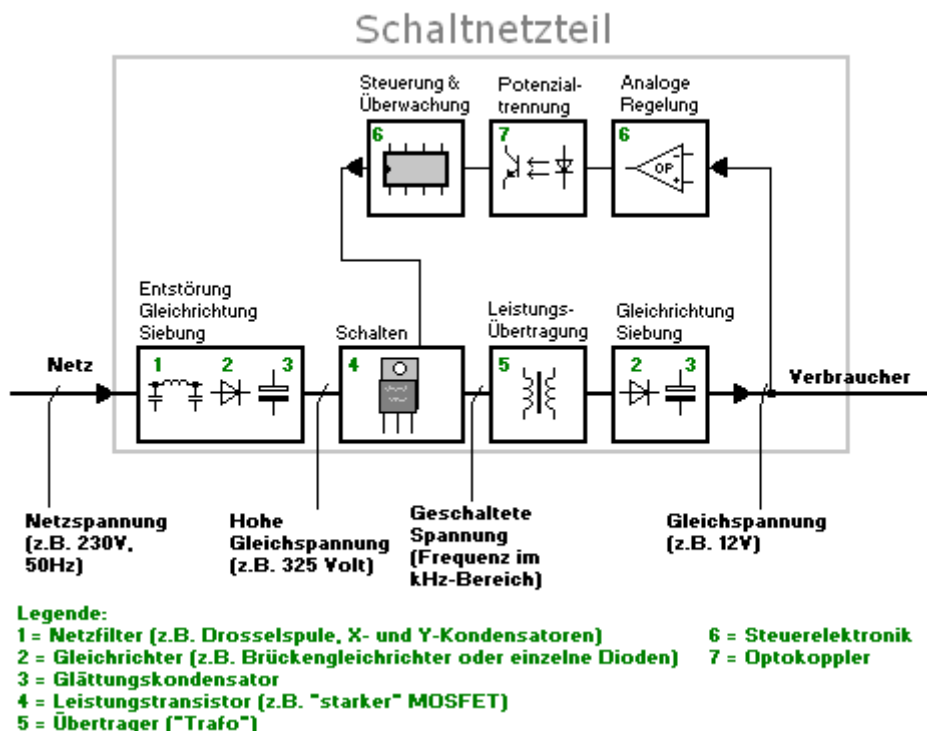
Συχνά τοποθετείται ένας πυρήνας φερρίτη πάνω από τις καλωδιώσεις , ο οποίος επιδρά όμως μόνο σε πολύ υψηλές συχνότητες (περιοχή FM) .

Τα παλμοτροφοδοτικά προκαλούν λόγω του ανορθωτή στην είσοδο, υψηλές αρμονικές, οι οποίες θα πρέπει να εξαλειφθούν, για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες.

Η αυξανόμενη χρήση παλμοτροφοδοτικών προκαλεί όλο και μεγαλύτερα επίπεδα θορύβου τα οποία επηρεάζουν το δίκτυο.

Για τον παραπάνω λόγο τα παλμοτροφοδοτικά (ρεύμα εισόδου κάτω των 16 A ) με ισχύ εισόδου πάνω από 50 με 75 W (εξαρτάται από τον τύπο της συσκευής) υποχρεούνται από τις 01.01.01 να φέρουν διόρθωση συντελεστή ισχύος (Power Factor Correction), „PFC“.

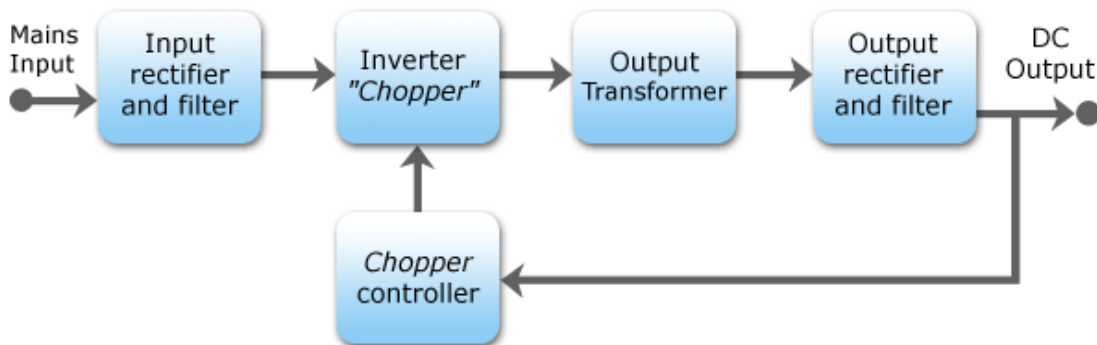
## 2.4. Δομή - Λειτουργία



Τα παλμοτροφοδοτικά αποδίδουν σταθερά ρεύματα ή τάσεις εξόδου. Η σταθερότητα του μεγέθους της εξόδου επιτυγχάνεται με την καθοδήγηση της ροής ενέργειας στη συσκευή και τους συνδεδεμένους καταναλωτές.

Οι παρακάτω διαδικασίες λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του παλμοτροφοδοτικού:

- Ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου
- Εξομάλυνση της παρεχόμενης συνεχούς τάσης
- Μετασχηματισμός της συνεχούς τάσης
- Μετασχηματισμός της παρεχόμενης εναλλασσόμενης τάσης
- Ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης
- Βρόγχος ελέγχου - Ευστάθεια



Με τη βοήθεια του κυκλώματος ελέγχου (με εξαίρεση τις απώλειες του τροφοδοτικού) φροντίζουμε να εισέρθει στο παλμοτροφοδοτικό μόνο η ποσότητα της ενέργειας η οποία θα προωθηθεί προς τον καταναλωτή. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ενός διαμορφωτή πλάτους παλμού (PWM) ή διαμορφωτή φάσης παλμού (PPM).

Τα παλμοτροφοδοτικά διαθέτουν Μ/Σ με πυρήνα φερρίτη, μέσω του οποίου επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός τάσης και η γαλβανική αποκοπή στην πλευρά της εισόδου και την εξόδου.

Στην εικόνα βλέπουμε ένα τρανζίστορ μεταγωγής στο πρωτεύον κύκλωμα του Μ/Σ, για το λόγο αυτό ονομάζουμε το παλμοτροφοδοτικό αυτό διαμόρφωσης πρωτεύον.

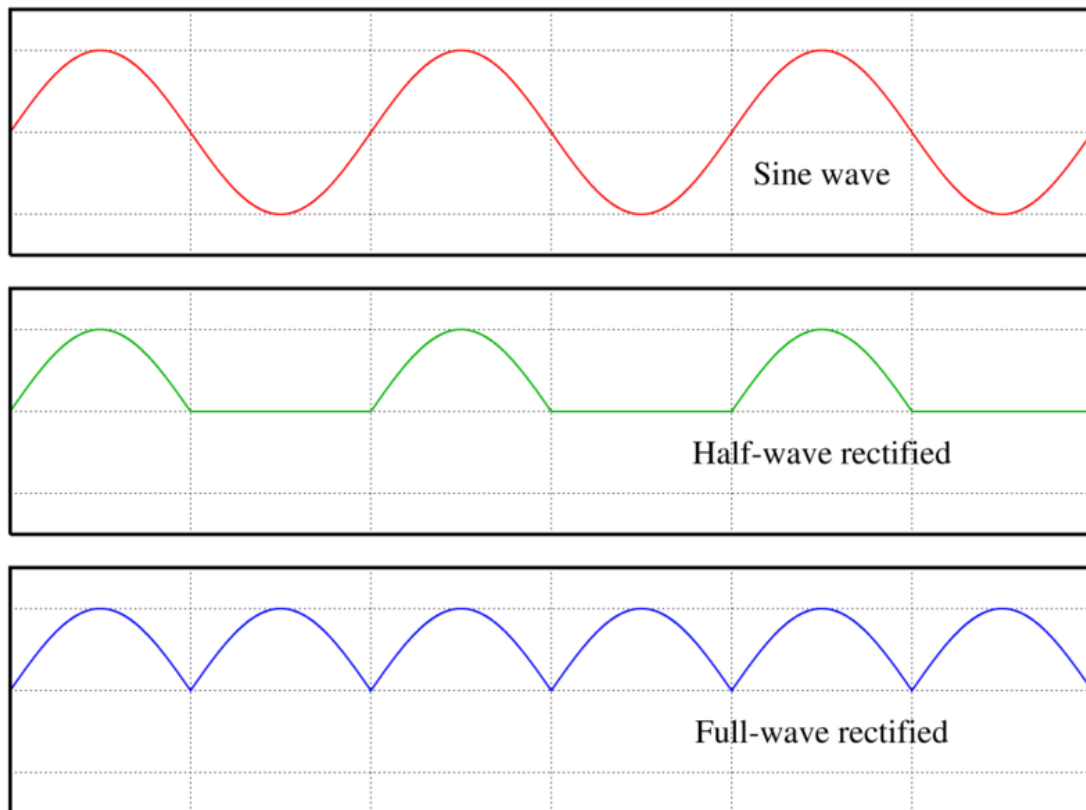
Αυτά τα παλμοτροφοδοτικά περιέχουν Μ/Σ με πυρήνα από φερρίτη τα οποία λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (15 ... 300 kHz) και είναι πολύ μικρά σε μέγεθος. Αν το τρανζίστορ μεταγωγής βρίσκεται στο δευτερεύον κύκλωμα του Μ/Σ έχουμε να κάνουμε με δευτερεύον διαμόρφωσης παλμοτροφοδοτικό. Αυτοί περιέχουν Μ/Σ ο οποίος λειτουργεί με τη συχνότητα του δικτύου και δεν παρουσιάζουν πλεονέκτημα ως προς τη μάζα έναντι των κοινών τροφοδοτικών.

Ως διακόπτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρανζίστορ (MOSFET, διπολικά, IGBT), έτσι ώστε να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη τάση προώσεως.

#### 2.4.1. Στάδιο ανόρθωσης (input rectifier)

Εάν το παλμο-τροφοδοτικό έχει εναλλασσόμενο ρεύμα ως είσοδο, τότε το πρώτο στάδιο είναι η μετατροπή του σε συνεχές το οποίο καλούμε ανόρθωση. Το κύκλωμα ανόρθωσης μπορεί να ρυθμιστεί ως διπλασιαστής τάσης με την προσθήκη ενός λειτουργικού διακόπτη είτε αυτόματου είτε όχι. Αυτό είναι ένα στοιχείο υψηλότερων παροχών στο να επιτρέπουν λειτουργία από ονομαστικές παροχές της τάξης των 120V ή 240V. Ο ανορθωτής παράγει ένα «αρρυθμιστο»

συνεχές ρεύμα το οποίο στη συνέχεια στέλνεται σε ένα φίλτρο μεγάλης χωρητικότητας. Το ρεύμα που διέρχεται από την κεντρική παροχή μέσω του κυκλώματος ανόρθωσης εμφανίζεται με σύντομους παλμούς γύρω από τα υψηλά του εναλλασσομένου.



Αυτοί οι παλμοί έχουν ενέργεια εξαιρετικά υψηλής συχνότητας η οποία μειώνει το συντελεστή ισχύος. Ειδικές τεχνικές ελέγχου, μπορούν να αναπτυχθούν από επόμενα SMPS ώστε να έχουμε τον μέσο όρο του ρεύματος εισόδου να ακολουθεί την ημιτονοειδή καμπύλη της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου ώστε να μπορεί ο σχεδιαστής να διορθώσει το συντελεστή ισχύος. Αν το SMPS είναι είσοδο συνεχούς ρεύματος δεν χρειάζεται αυτό το στάδιο. Αν χρησιμοποιούμε διακόπτες εύρους εισόδου, τότε η ανόρθωση μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να δουλεύει ως διπλασιαστής τάσης για π.χ. 120V AC, ή ως ένας ευθύς ανορθωτής όταν λειτουργεί στα 240V AC. Εάν δεν χρησιμοποιείτε ένας διακόπτης εύρους διακύμανσης, τότε χρησιμοποιείτε ένας ανορθωτής πλήρους κύματος και το επόμενο στάδιο αντιστροφής σχεδιάζεται ώστε να είναι ευέλικτο ώστε να δέχεται μεγάλο εύρους τάσης DC που παράγει το κύκλωμα ανόρθωσης.

#### 2.4.2. Στάδιο αντιστροφής (inverter “chopper”)

Το στάδιο αντιστροφής μετατρέπει το DC είτε δίδεται ως είσοδο είτε προέρχεται από το στάδιο ανόρθωσης, σε AC, διερχόμενο μέσα από ένα ταλαντωτή ισχύος, του οποίου ο μετασχηματιστής εξόδου είναι πολύ μικρός με λίγα τυλίγματα, συχνότητας δεκάδων ή εκατοντάδων kilohertz (KHz). Η συχνότητα συνήθως επιλέγεται να είναι υψηλότερη των 20KHz ώστε να είναι αθόρυβο για τους ανθρώπους. Η τάση εξόδου είναι συνδεδεμένη οπτικά με την είσοδο και αυστηρά ελεγχόμενη. Η αλλαγή αυτή εφαρμόζεται σε πολύ-σταδιακό (για να επιτευχθεί υψηλό κέρδος) ενισχυτή MOSFET. MOSFETs είναι ένα είδος τρανζίστορ με χαμηλή αντίσταση λειτουργίας και υψηλής χωρητικότητας χειρισμού ρεύματος.

### 2.4.3. Στάδιο μετατροπής τάσης και ανόρθωσης εξόδου

Εάν η έξοδος απαιτείτε να είναι απομονωμένη από την είσοδο, όπως συνηθίζεται, το αντιστραμμένο AC χρησιμοποιείτε για οδήγηση του πρωτεύοντος τυλίγματος ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας. Αυτό μετατρέπει την τάση πάνω ή κάτω στο απαιτούμενο επίπεδο εξόδου στο δευτερεύον τυλίγμα. Ο μετασχηματιστής εξόδου (output transformer) που φαίνεται στο διάγραμμα είναι για το λόγο αυτό.

Εάν απαιτείτε έξοδος DC, η AC έξοδος από το μετασχηματιστή ανορθώνεται. Για τάσεις εξόδου πάνω από 10V χρησιμοποιούνται συνηθισμένες διόδους πυριτίου. Για χαμηλότερες τάσεις, χρησιμοποιούνται ως στοιχεία ανόρθωσης διόδους Schottky. Έχουν το πλεονέκτημα μικρότερου χρόνου απόκρισης από ότι οι συνήθεις (επιτρέποντας λειτουργία μικρότερων απωλειών σε υψηλές συχνότητες) και μικρότερη πτώση τάσης. Για ακόμα χαμηλότερες τάσεις εξόδου, MOSFETs μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σύγχρονοι ανορθωτές, εν συγκρίσει με τις διόδους Schottky, έχουν ακόμα χαμηλότερη πτώση τάσης.

Η ανορθωμένη έξοδος εξομαλύνεται μέσω ενός φίλτρου από επαγωγικά πηνία και πυκνωτές. Για υψηλότερες συχνότητες μεταγωγής, είναι απαραίτητα στοιχεία με μικρότερη χωρητικότητα και επαγωγή.

Απλούστερα, μη απομονωμένα τροφοδοτικά περιέχουν ένα πηνίο αντί ενός μετασχηματιστή.

Άλλοι τύποι SMPSs χρησιμοποιούν πολλαπλασιαστή τάσης πυκνωτή – διόδου, αντί επαγωγικών πηνίων και μετασχηματιστών. Αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως για την παραγωγή υψηλών τάσεων με χαμηλή ένταση ρεύματος (Cockcroft – Walton generator).

### 2.4.4. Ρυθμίσεις

Ένα κύκλωμα ανάδρασης παρακολουθεί την τάση εξόδου, την οποία και συγκρίνει με μία τάση αναφοράς. Αναλόγως τις απαιτήσεις σχεδιασμού και ασφάλειας, ο ελεγκτής μπορεί να περιέχει ή να μην περιέχει έναν μηχανισμό απομόνωσης (όπως οπτικό-ζεύκτες opto-couplers) για την απομόνωση από την έξοδο DC. Παλμοτροφοδοτικά σε υπολογιστές, τηλεοράσεις και βίντεο έχουν οπτικό-ζεύκτες για να ελέγχουν αυστηρά την τάση εξόδου.

Οι ρυθμιστές ανοιχτού βρόγχου δεν έχουν κύκλωμα ανάδρασης. Αντί για αυτό βασίζονται στη τροφοδοσία σταθερής τάσης στην είσοδο του μετασχηματιστή ή του μεταγωγικού πηνίου και υποθέτουμε ότι η έξοδος είναι σωστή.

Σχέδια ρύθμισης αντισταθμίζουν την παρασιτική χωρητικότητα του μετασχηματιστή ή πηνίου. Μονοπολικά σχέδια επίσης αντισταθμίζουν την μαγνητική υστέρηση του πυρήνα.

Το κύκλωμα ανάδρασης χρειάζεται ισχύ για να λειτουργήσει πριν παράξει ενέργεια, έτσι ένα πρόσθετο τροφοδοτικό ισχύος άνευ μεταγωγής συνδέεται.

## 2.5. Τεχνικές ελέγχου παλμοτροφοδοτικών.

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις για τεχνικές ελέγχου τάσης ή ρεύματος εξόδου ενός παλμοτροφοδοτικού. Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα αναλύσουμε έξι θέματα:

- Έλεγχος βάση τάσης ή ρεύματος,
- PID έλεγχος,

- Τεχνικές προώθησης ανάδρασης,
- Οφέλη από ψηφιακές τεχνικές ελέγχου SMPS
- Μεθοδολογία μεταγωγής,
- Ευστάθεια ελέγχου βρόγχου.

### 2.5.1. Έλεγχος βάσης τάσης ή ρεύματος

Η πρώτη προσέγγιση που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο της εφαρμογής SMPS ονομαζόταν «Έλεγχος τάσης». Ο έλεγχος τάσης λειτουργεί με πρόβλεψη, όπου η πραγματική τάση εξόδου, συγκρίνεται με την επιθυμητή και η διαφορά τους (error), χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση του κύκλου λειτουργίας του PWM για τον έλεγχο της τάσης διαμέσου του πηνίου.

Αργότερα, αναπτύχθηκε μηχανισμός ελέγχου ρεύματος, για την διόρθωση θεμάτων που ανέκυψαν από την τεχνική ελέγχου τάσης. Η τεχνική ελέγχου ρεύματος χρησιμοποιεί το error μεταξύ τάσης εξόδου και επιθυμητής και ελέγχει το υψηλό (peak) του ρεύματος στο πηνίο.

#### 2.5.1.1. Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου ελέγχου τάσης, είναι ότι μπορεί να γίνει ευκόλως κατανοητή η μέτρηση της εξόδου (τάση εξόδου) του κυκλώματος. Είναι πολύ εύκολη η εγκατάσταση ενός αισθητήρα για να μετρήσει της τάση εξόδου. Τυπικά μία αντίσταση μπορεί να διαιρέσει την τάση εξόδου σε μία άλλη η οποία οδηγείτε σε ένα ψηφιακό μετατροπέα αναλογικού σήματος, ή δίδεται σε ένα αναλογικό μετατροπέα. Τα επίπεδα μέτρησης της τάσης συνήθως δίνουν διαφορά από 1V έως 5V, έτσι ο λόγος του σήματος ως προς το θόρυβο δεν δημιουργεί πρόβλημα. Η μέθοδος αυτή παρακολουθεί μόνο την έξοδο, οπότε μόνο μία επιστροφή (ανάδραση) απαιτείτε το οποίο απλοποιεί το σχεδιασμό του μετατροπέα.

Η μέθοδος ρεύματος (ιστορικά) έχει καλύτερη και ταχύτερη απόκριση από ότι η μέθοδος με την τάση διότι ελέγχετε το ρεύμα στο πηνίο αντί της τάσης εξόδου η οποία μετράτε στον πυκνωτή εξόδου. Η μέθοδος τάσης είναι μία διπολική ανάδραση βρόγχου ενώ η μέθοδος ρεύματος είναι μονοπολικός βρόγχος ανάδρασης. Το μονοπολικό του βρόγχου ελέγχου απαιτεί λιγότερο υψηλής συχνότητας παρακολούθησης για τη σταθερότητα της κατάστασης.

Το ρεύμα πηνίου ανταποκρίνεται άμεσα σε μεταβολές τάσης εισόδου και εξόδου. Ο έλεγχος βάσης ρεύματος παρέχει καλύτερη απόκριση στις μεταβολές της τάσης εισόδου / εξόδου διότι οι μεταβολές του ρεύματος μετρούνται άμεσα.

Ο έλεγχος βάσης ρεύματος παρέχει εγγενή οριοθέτηση ρεύματος σε μία βάση από κύκλο σε κύκλο. Η οριοθέτηση του ρεύματος βελτιώνει την αξιοπιστία του συστήματος σε ανταπόκριση με τη τρέχουσα μετάβαση.

#### 2.5.1.2. Μειονεκτήματα

Η τύπος ελέγχου βάσης τάσης, δεν παρέχει έλεγχο από κύκλο σε κύκλο του ρεύματος διαμέσου των τρανζίστορ, ενώ αυτή η έλλειψη κάνει την εξισορρόπηση στο μετασχηματιστή ροής πιο δύσκολη (συχνά απαιτούνται επιπρόσθετα στοιχεία).



Η τάση εξόδου μετριέται στον πυκνωτή εξόδου όπου αλλαγές στην τάση εισόδου ή του φορτίου εξόδου μετριούνται δύσκολα άμεσα. Επιπλέον το διπολικό φίλτρο στην ανάδραση καθυστερεί την απόκριση του συστήματος.

Κύκλοι λειτουργίας μεγαλύτεροι του 50%, στη μέθοδο ρεύματος, έχουν θέματα με τις ταλαντώσεις μισού-κύκλου. Για να σταματήσουν αυτές οι ταλαντώσεις, απαιτείτε η προσθήκη «slope διόρθωσης». Η διόρθωση slope μειώνει το υψηλό όριο της τιμής ρεύματος, όσο αυξάνει ο κύκλος λειτουργίας. Η μείωση των υψηλών του ρεύματος, σχεδιάζεται ώστε να φέρνει το ίδιο μέσο όρο ακόμα και με τις αυξήσεις των κύκλων λειτουργίας.

### 2.5.2. Έλεγχος P.I.D.

P.I.D. (Proportional Integral Derivative), Ο λόγος, το ολοκλήρωμα και η παράγωγος.

Η PID μέθοδος, αναπτύχθηκε το 942 από τους John G. Ziegler και Nathaniel B. Nichols. Η βρόγχος PID είναι η κύρια μέθοδος ελέγχου για κινητήρες, βιομηχανικών διεργασιών και εγκαταστάσεων. PID ελεγκτές ενσωματώνονται σε μηχανολογικά, πνευματικά και υδραυλικά συστήματα όπως βέβαια και σε ηλεκτρονικά. Ενώ η ψηφιακή ενσωμάτωση ελεγκτών PID έχει χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες σε ελεγκτές κινητήρων, η ενσωμάτωση σε SMPS είναι σχετικά νέο φαινόμενο.

Τον αλγόριθμο PID είναι εύκολο να τον κατανοήσει κανείς.

Ο όρος «**λόγος**» είναι το λάθος (error) μεταξύ της τάσης εξόδου προς την επιθυμητή. Το λάθος που απορρέει από το λόγο μας δείχνει το «Μέγεθος-Χονδρικά» της εξόδου του βρόγχου ελέγχου.

Ο όρος «**Παράγωγος**», είναι η διαφορά τιμών (αλλαγή) του **λόγου**. Εάν η παράγωγος δεν είναι μηδέν αυτό σημαίνει ότι οι όροι του συστήματος μεταβάλλονται ταχύτατα. Αυτό δρα στις μεταβατικές συνθήκες παρέχοντας υψηλής συχνότητας κέρδος για το βρόγχο ελέγχου.

Ο όρος **Ολοκλήρωμα**, είναι η αργή συσσώρευση των τιμών του όρου **Λόγος**. Σε ένα σύστημα χωρίς το ολοκλήρωμα, από το error του λόγου, όσο αυτό μειώνεται ελαχιστοποιείτε στο να πιάσουμε ακριβώς την επιθυμητή τιμή. Το ολοκλήρωμα μας δείχνει να φτάσουμε άμεσα στο τελικό σημείο. Αλλιώς απλά θα μειώνουμε συνεχώς και κάποια στιγμή θα φτάσουμε ακριβώς.

### 2.5.3. Τεχνική προώθησης ανάδρασης

Με τα σύγχρονα ψηφιακά κυκλώματα και επεξεργασία σημάτων (DSPs & microprocessors), ο αλγόριθμος PID έχει βελτιωθεί. Η κλασική PID μέθοδος ελέγχου, απαιτεί τη δημιουργία λάθους ώστε να δημιουργήσει μία εντολή εξόδου για να φτάσει στην επιθυμητή κατάσταση του συστήματος. Με έναν υπολογιστή, η γνώση του συστήματος εφαρμογής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να προστεθούν περισσότεροι όροι στην εξίσωση PID έτσι ώστε ο βρόγχος ελέγχου, δεν χρειάζεται απλά να αντιδρά σε μία κατάσταση εξόδου. Δοσμένης της τάσης εισόδου, των τιμών των στοιχείων του συστήματος και της επιθυμητής εξόδου, μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά η εντολή από το βρόγχο ελέγχου. Αυτή η πρόβλεψη ονομάζεται «προώθηση ανάδρασης». Αυτός ο όρος προστίθεται στους όρους του ελέγχου PID. Για παράδειγμα όταν ένας επεξεργαστής είναι σε κατάσταση αναμονής και πρόκειται να έρθει σε ενεργή κατάσταση, μπορεί να

προωθήσει ένα σήμα στο τροφοδοτικό να αρχίσει να αυξάνει την παροχή ρεύματος. Αυτή η μέθοδος μπορεί να προβλέπει τη μεταβολή του συστήματος, χωρίς αυτή να προλαβαίνει να αντικατοπτρίζεται στην έξοδο. Η μέθοδος αυτή από τα χαρακτηριστικά της είναι σταθερή και προηγείται δράσης.

Η κλασική θεωρία ελέγχου πάντα αντιδρούσε σε οποιαδήποτε νέα αλλαγή. Πάντα κοιτούσε μόνο όπου βρισκόταν η επιστήμη εκείνη τη στιγμή. Είναι σαν να οδηγούμε κοιτάζοντας μόνο τον πλαϊνό καθρέπτη. Η παραπάνω θεωρία PID και η προώθηση ανάδρασης (πρόβλεψη) μπορούν να συνδυαστούν και να έχουμε προ του αποτελέσματος δράση. Γι αυτό όταν οδηγούμε βλέπουμε μπροστά.

Πιο σύγχρονα PID συστήματα ελέγχου, συνδυάζουν πολλαπλούς βρόγχους ελέγχου, οι οποίοι ρυθμίζουν και ελέγχουν συμπεριφορές συστημάτων, σε διαφορετικά επίπεδα της ιεραρχίας του συστήματος. Για παράδειγμα: Σύγχρονοι PID βρόγχοι ελέγχου, μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν και ρεύμα πηγίου και τάση εξόδου.

#### 2.5.4. Οφέλη από ψηφιακές τεχνικές ελέγχου SMPS

Όσο περισσότερες πληροφορίες μπορούν να ενσωματωθούν στην εξίσωση την πρόβλεψης (προώθηση ανάδρασης), λιγοστεύουν τα λάθη εξόδου, και λιγότερες απροσδόκητες μεταβολές μπορούν να γίνουν.

Με τα σύγχρονα DSPs οι εξισώσεις του κυκλώματος για ένα SMPS σύστημα, μπορούν να λυθούν άμεσα λαμβάνοντας τιμές τάσης και ρεύματος χωρίς να πρέπει να μετρηθούν. Αυτή η δυνατότητα μπορεί να εξαλείψει θέματα σταθερότητας που μπορεί να δημιουργηθεί από τα στοιχεία του κυκλώματος, συμπεριλαμβανομένων καθυστερημένων μετρήσεων οι οποίες μαστίζουν τον έλεγχο με παραδοσιακές τεχνικές.

Με τους κλασικούς αναλογικούς SMPS PWM ελεγκτές, η μέθοδος ελέγχου και η τοπολογία του κυκλώματος, ορίζονται από το κύκλωμα στην αναλογική συσκευή ελέγχου. Οι κατασκευαστές αυτών των ελεγκτών αναπτύσσουν συσκευές για την υποστήριξη SMPS τοπολογιών που έχουν αρκετές υποδοχές για να δικαιολογήσουν το κόστος ανάπτυξης για κάθε PWM συσκευή.

Η ανάπτυξη νέων τοπολογιών SMPS και νέων απαιτούμενων ελεγκτών PWM, είναι κάτι σαν το θέμα με την κότα και το αυγό. Νέοι ελεγκτές δεν σχεδιάζονται εκτός αν απαιτηθεί από την αγορά, η οποία περιμένει νέους ελεγκτές για να αναπτυχθεί. Οι συσκευές SMPS dsPIC επιτρέπουν να αναπτυχθούν νέες τοπολογίες κυκλωμάτων και μέθοδοι ελέγχου ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις του συστήματος. Αλλαγές στο σύστημα δε σημαίνει πλέον και αλλαγές στα στοιχεία του κυκλώματος, αλλά αλλαγή στο πρόγραμμα που είναι αποθηκευμένο σε flash (μνήμη flash).

#### 2.5.5. Μεθοδολογία μεταγωγής

Η μεθοδολογία μεταγωγής περιγράφει τις συνθήκες τάσης και ρεύματος που εφαρμόζονται σε τρανζίστορ ισχύος σε κατάσταση μετατροπέα μεταγωγής την στιγμή που η μεταγωγή του τρανζίστορ λαμβάνει χώρα από κατάσταση αγωγής σε κατάσταση διακοπής.

Τα περισσότερα παλμοτροφοδοτικά χρησιμοποιούν «Σκληρή-μεταγωγή». Η «Σκληρή-μεταγωγή» είναι η μεταγωγή του τρανζίστορ από τη μία φάση στην άλλη χωρίς να λαμβάνει υπόψη του τη φάση ρευμάτων και τάσεων που εφαρμόζονται στο τρανζίστορ. Ιστορικά κανένας δεν παραπονιόταν για τις απώλειες στα τρανζίστορ όταν αυτά είχαν σχέση με τα γραμμικά κυκλώματα. Σήμερα που οι

συχνότητες είναι 50KHz – 500KHz πλέον αυτό παίζει ρόλο και είναι αναγκαίο να ελεγχτεί. Στους μετατροπής σκληρής μεταγωγής, οι τάσεις και τα ρεύματα είναι συμφασικά, έτσι ώστε η κατανάλωση ισχύος της μεταγωγής είναι ευθέως ανάλογη της συχνότητας και του χρόνου μεταγωγής. Οι χρόνοι μεταγωγής είναι πλέον πιθανό να είναι όσο μικροί όσο είναι πρακτικά δυνατό.

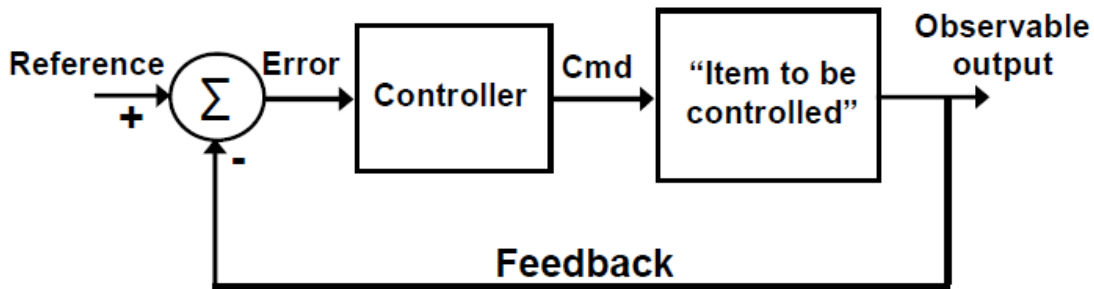
Για να μειώσουμε επιπλέον τις απώλειες μεταγωγής, αναπτύσσονται τοπολογίες SMPS και σχήματα ελέγχου, ώστε να μετατοπίζεται η φάση τάσης του τρανζίστορ, σχετικά με το ρεύμα του τρανζίστορ κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μεταγωγής. Εάν είτε η τάση είτε το ρεύμα είναι μηδέν κατά τη διάρκεια μεταγωγής, τότε η κατανάλωση ισχύος μεταγωγής είναι μηδέν.

Η σκληρή μεταγωγή είναι ακόμα η πιο κοινή μέθοδος μεταγωγής. Οι μετατροπείς σκληρής μεταγωγής είναι απλούστεροι, χαμηλού κόστους και συνήθως έχουν συγκεκριμένη συχνότητα μεταγωγής.

Συγκεκριμένη συχνότητα μεταγωγής κάνει το σχεδιασμό μαγνητικών στοιχείων εύκολα βελτιστοποιήσιμη και απλοποιεί το σχεδιασμό του συστήματος ελέγχου. Συγκεκριμένη συχνότητα μεταγωγής μπορεί να απαιτείτε σε μεγαλύτερα συστήματα, έτσι ώστε η παραγόμενη EMI εμπίπτει σε γνωστές συχνότητες για να αποφευχθούν παρεμβολές με άλλα κυκλώματα του συστήματος.

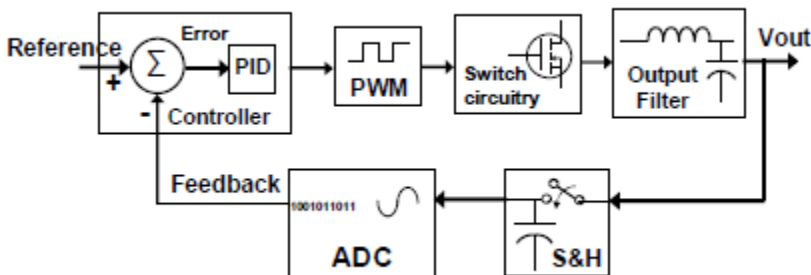
### 2.5.6. Βρόγχος ελέγχου - Ευστάθεια

Παρακάτω φαίνεται ένα μπλοκ διάγραμμα ενός απλού συστήματος με ανάδραση.



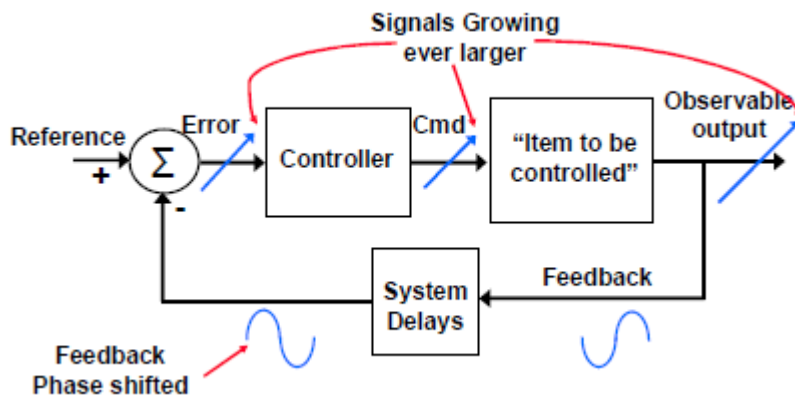
Η ανάδραση παρέχει πληροφορίες στον ελεγκτή για να διορθώσει τυχόν αποκλίσεις από την επιθυμητή έξοδο. Αυτό το διάγραμμα καλείτε βρόγχος ελέγχου, διότι το κύκλωμα επιστροφής δημιουργεί ένα βρόγχο από τον ελεγκτή έως το στοιχείο που ελέγχεται και ξανά πίσω στον ελεγκτή.

Σε αυτό το σύστημα ελέγχου, το παρατηρήσιμο σήμα εξόδου αφαιρείτε από το σήμα αναφοράς και η διαφορά ονομάζεται σφάλμα (error). Το λάθος σήμα είναι είσοδος στον ελεγκτή. Ο ελεγκτής επεξεργάζεται το λάθος σήμα και παράγει ένα σήμα εντολής. Το σήμα εντολής παρέχει την ώθηση που χρειάζεται για να ωθήσει το ελεγχόμενο στοιχείο στην επιθυμητή κατάσταση. Αυτή βέβαια η αναπαράσταση δεν αντιπροσωπεύει ακριβώς την πραγματικότητα.



Το πιο σημαντικό γεγονός είναι ότι υπάρχουν καθυστερήσεις που συνδέονται με κάθε κατηγορία σε αυτό το διάγραμμα. Το S&H κύκλωμα δειγματοληψίας συνήθως δειγματοληπτεί κάθε 2 έως 10 μικροδευτερόλεπτα. Το ADC θέλει περίπου 500ns για να μετατρέψει το αναλογικό σήμα ανάδρασης σε μία ψηφιακή τιμή. Ο ελεγκτής PID είναι ένα πρόγραμμα που τρέχει σε ένα μικροεπεξεργαστή (DSP) με μία υπολογίσιμη καθυστέρηση 1 με 2  $\mu$ s. Η έξοδος του ελεγκτή (controller) μετατρέπεται σε ένα σήμα PWM το οποίο οδηγεί το κύκλωμα μεταγωγής. Η γεννήτρια PWM μπορεί να εισάγει σημαντικές καθυστερήσεις, αν δεν μπορεί να ενημερώσει άμεσα την έξοδό της σε κάθε κύκλο λειτουργίας.

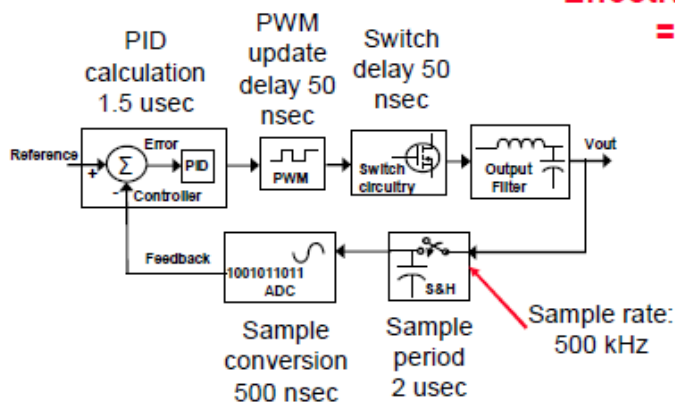
Οι οδηγοί τρανζίστορ και των συνδεδεμένων τρανζίστορ εισαγάγει επίσης καθυστερήσεις από 50ns μέχρι 1 $\mu$ s ανάλογα με τις συσκευές που χρησιμοποιούνται και το σχέδιο του κυκλώματος. Μία πολύ μεγάλη πηγή καθυστερήσεων είναι το φίλτρο εξόδου που τυπικά ολοκληρώνεται με ένα επαγωγικό πηνίο και κύκλωμα πυκνωτή.



Οι καθυστερήσεις στην παραπάνω εικόνα εμφανίζονται όλες μαζί για σαφήνεια. Το λάθος (error) σήμα υποτίθεται ότι είναι το σήμα αναφοράς μείων τη σήμα ανάδρασης. Εάν υπάρχουν αρκετές καθυστερήσεις σε ένα σύστημα όπου το σήμα ανάδρασης αλλάζει φάση (180 μοίρες καθυστέρηση), τότε η λειτουργία αφαίρεσης γίνεται πρόσθεση (Αναφορά + Ανάδραση). Σε αυτή την περίπτωση το λάθος (error) μεγαλώνει με ανεξέλεγκτο τρόπο.

Σε ένα πραγματικό σύστημα υπάρχουν όρια στα σήματα και τις ικανότητες του συστήματος.

**Digital Controller:**  
**Delay = 4.1 usec**  
**Effective sample rate**  
**= 244 kHz**



**Control Bandwidth**  
**(244 kHz / 6)**  
**= 40 kHz**

Όλες οι καθυστερήσεις οι οποίες συνδέονται με την μετατροπή του αναλογικού σήματος ανάδρασης, μέχρι τους ψηφιακούς υπολογισμούς από τον επεξεργαστή και οι καθυστερήσεις εξόδου του PWM στα τρανζίστορ ισχύος προστίθενται στις καθυστερήσεις του ρυθμού δειγματοληψίας. Η αποτελεσματική συχνότητα δειγματοληψίας είναι το αντίστροφο του ελεγκτή και των καθυστερήσεων δειγματοληψίας.

Το εύρος ζώνης του ελεγκτή είναι το πραγματικό ποσοστό του δείγματος ελέγχου το οποίο διαιρείτε από την αναλογία υπερδειγματοληψίας. Στην παραπάνω εικόνα είναι 6 βαθμίδες.

## **2.6. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα έναντι κοινών τροφοδοτικών**

### **2.6.1. Πλεονεκτήματα**

- Υψηλός βαθμός απόδοσης >90% ακόμη και με μικρή ονομαστική τάση και κυμαινόμενα φορτία
- Μεγάλο εύρος τιμών για τάσεις εισόδου και συχνότητα. Τα παλμοτροφοδοτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολλές διαφορετικές τιμές (85-255 V, 47-63 Hz)
- Πολύ μικρό βάρος και όγκος λόγω μικρών ΜΣ
- Ελάχιστη χρησιμοποίηση χαλκού
- Μικρότερη κατανάλωση αναμονής
- Σαφώς οικονομικότεροι σε σύγκριση με τα κοινά τροφοδοτικά

### **2.6.2. Μειονεκτήματα**

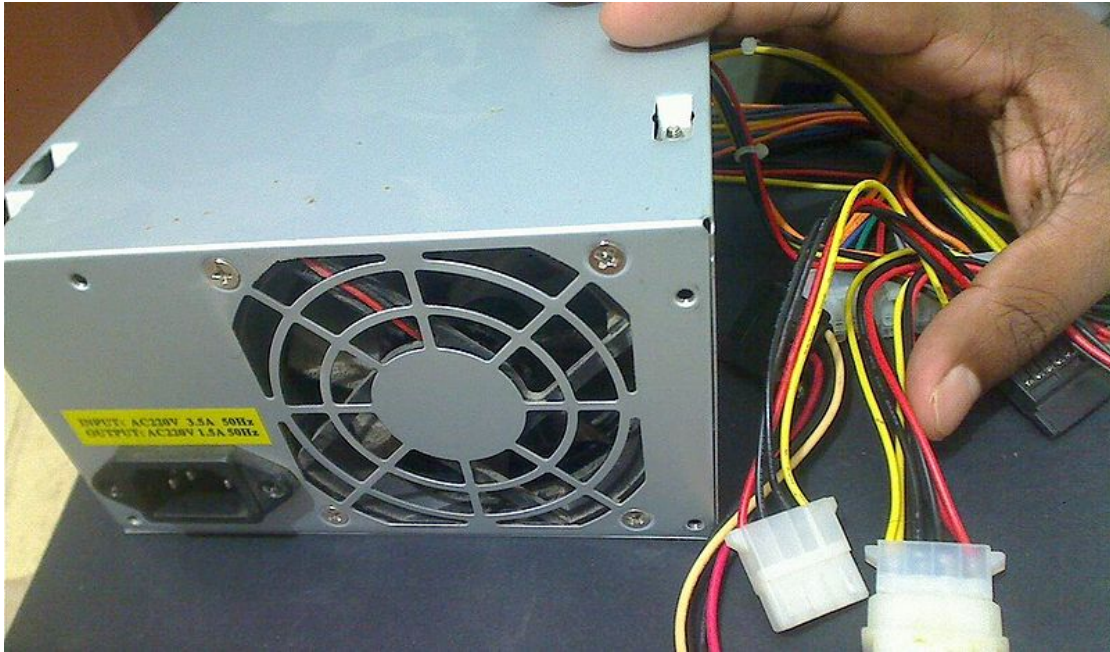
- Λόγω της λειτουργίας σε υψηλές συχνότητες πρέπει να λαμβάνουμε περισσότερα μέτρα για την αντιμετώπιση θορύβου
- Χειρότερη ρύθμιση σε πολύ γρήγορες αλλαγές φορτίου ή σε λειτουργία με πολύ χαμηλό φορτίο
- Στατιστικά μεγαλύτερη πιθανότητα να τεθεί εκτός λειτουργίας λόγω μεγαλύτερου αριθμού δομικών στοιχείων

## **2.7. Εφαρμογές**

Παλμοτροφοδοτικά σε συνήθεις προϊόντα όπως υπολογιστές, συνήθως έχουν εισόδους παγκοσμίων προτύπων, που σημαίνει ότι μπορούν να δεχθούν ισχύ όπως τα περισσότερα τροφοδοτικά που κυκλοφορούν στον κόσμο, από 50Hz έως 60Hz και από 100V έως 240V (φέρουν διακόπτης επιλογής τάσης εισόδου). Το 2006 σε ένα συνέδριο της Intel, μηχανικοί της Google πρότειναν απλή 12V εσωτερικά του υπολογιστή, λόγω της υψηλής αποδοτικότητας των παλμοτροφοδοτικών άμεσα πάνω στη μητρική.

Οι περισσότεροι σύγχρονοι επιτραπέζιοι και φορητοί υπολογιστές, έχουν ένα ρυθμιστή τάσης (DC-DC μετατροπέα), πάνω στη μητρική, για να ταπεινώνουν την τάση από το τροφοδοτικό ή την μπαταρία για τον πυρήνα του επεξεργαστή (CPU) στα 0,8V για χαμηλή τάση επεξεργαστή ή 1,2-1,5V για επιτραπέζια συστήματα του 2007. Μερικές μητρικές έχουν ρυθμίσεις στο BIOS για υπερδοήγηση του επεξεργαστή σε νέα τάση στον πυρήνα, ενώ κάποια άλλα υποστηρίζουν δυναμική κλιμάκωση τάσης όπου σταθερά ρυθμίζουν την τάση του επεξεργαστή. Τα

περισσότερα φορητά επίσης έχουν έναν μετατροπέα από DC σε AC για να μετατρέπουν την τάση της μπαταρίας ώστε να οδηγήσουν το φως της επίπεδης οθόνης η οποία συνήθως απαιτεί 1000Vrms.



Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ένα κλασικό τροφοδοτικό υπολογιστή, με τον ανεμιστήρα απαγωγής θερμότητας και τα καλώδια τροφοδοσίας για την μητρική, τους δίσκους – συσκευές σε ATA ή SATA παροχές.

Λόγω των μεγάλων ποσοτήτων, η φορτιστές κινητών τηλεφώνων είναι άμεσα συνδεδεμένοι με το κόστος διάθεσης στην αγορά. Οι πρώτοι φορτιστές ήταν γραμμικά τροφοδοτικά ισχύος τα οποία όμως γρήγορα αντικαταστάθηκαν από φθηνότερα SMPS τοπολογία τα RCC (Ringing Choke Converters).

Σε περιπτώσεις όπου, πυκνωτές για εξομάλυνση, μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας, θόρυβος και συμβολές πρέπει να αποφεύγονται, τα παλμοτροφοδοτικά (SMPS) είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας DC. Επιπλέον για AC εφαρμογές όπου η συχνότητα και η τάση δεν μπορεί να παραχθεί από την πρωτεύουσα πηγή, ένα παλμοτροφοδοτικό είναι η λύση. Εφαρμογές μπορούμε επιπλέον να συναντήσουμε και στην αυτοκινητοβιομηχανία όπου τα συνήθως φορητά χρησιμοποιούν τυποποιημένα 24V DC ή 12V DC. Συνήθως τα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν 12V DC το οποίο χρησιμοποιούν για τον εξοπλισμό τους.

Σε βιομηχανική χρήση επιλέγουμε μερικές φορές παροχές DC αλλά χωρίς θόρυβο και παρεμβολές με ολοκληρωμένους πυκνωτές και μπαταρίες για να αποθηκεύουμε και εξομαλύνουμε τάσεις. Εδώ και πάλι χρησιμοποιούμε παλμοτροφοδοτικά.

Τα περισσότερα μικρά αεροπλάνα χρησιμοποιούν 28V DC, τα μεγαλύτερα όπως BOEING 747 συχνά χρησιμοποιούν 3φασικό 200V AC 400Hz με έως και 90kV αν και έχουν ένα δίαυλο DC. Τα μαχητικά τύπου F-16 χρησιμοποιούν 400Hz ισχύ. Τα ελικόπτερα επίσης χρησιμοποιούν 28V DC σύστημα ισχύος. Υποβρύχια όπως τα Ρωσικά Alfa class χρησιμοποιούν δύο σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες παρέχουν μεταβλητό 3φασικό ρεύμα 2 X 1500KW, 400V, 400Hz. Τα διαστημικά λεωφορεία χρησιμοποιούν τρεις κυψέλες καυσίμου που παράγουν 30-36V DC. Μερικός μετατρέπεται σε 400Hz AC ισχύ και 20V DC ισχύς. Ο διεθνής διαστημικός σταθμός χρησιμοποιεί 120V DC ισχύς.

Σε περιπτώσεις τηλεοράσεων, καταπληκτική ρύθμιση μπορεί να γίνει με τη χρήση αυτομετασχηματιστών (variac).



Για παράδειγμα σε μερικά μοντέλα της Philips, η παροχή ισχύος ξεκινάει όταν η τάση φτάσει τα 90V . Από εκεί μπορεί κάποιος να αλλάξει την τάση με ένα αυτομετασχηματιστή και να ταπεινώσει στα 40V ή ακόμα και να υψώσει στα 260V (με υψηλό άκρο τα  $260 \times \sqrt{2} = 368V$  p-p) ώστε η εικόνα να δείχνει απολύτως αμετάβλητη.

Τυποποιημένοι λαμπτήρες φθορισμού, χρησιμοποιούν μια απλή μορφή μετατροπέα τύπου boost, για να δημιουργήσουν μία 1200V ανάφλεξη και 600V για την λειτουργία της.

- Τροφοδοτικά Η/Υ, οθόνης, εκτυπωτή και τηλεόρασης,
- Φορτιστές κινητών τηλεφώνων και φορητών Η/Υ,
- Ηλεκτρονικοί ΜΣ για λυχνίες αλογόνου χαμηλής κατανάλωσης,
- Ηλεκτροσυγκολλήσεις,
- Φορτιστές συσσωρευτών,
- Κυκλώματα οχημάτων και αεροσκαφών,
- Τροφοδοσία λαμπτήρων.

### 3. Αναφορές.

1. Από το site της Wikipedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation))
2. Από το site της Wikipedia ([http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode\\_power\\_supply](http://en.wikipedia.org/wiki/Switched-mode_power_supply))
3. Από το site της Wikipedia (<http://de.wikipedia.org/wiki/Schaltnetzteil>)
4. Introduction to Switched-Mode Power Supply (SMPS) Circuits, Version 2 EE IIT, Kharagpur
5. Power supply cookbook, Marty Brown second edition, Newnes, 2001
6. 2006 Microchip Technology Incorporated, Introduction to SMPS Control Techniques, WebSeminar.