

Mitteilung aus dem VEB Kombinat Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin

Parameter netzgelöchter Stromrichter im nichtlückenden Betrieb Teil II.

Von J. Schwarz¹

Mit 17 Abbildungen

(Eingegangen am 10. Mai 1975)

Im Teil I wurden ausgehend von den Parametern der Ausgangsspannungen (Abschnitt 1) die Stromextremwerte, der Lückfaktor und die Extremwertwelligkeit (Abschnitt 2) behandelt (Abschn. 2), berechnet und in Kurvenform dargestellt (Abb. 1 bis 16). Die folgenden Abschnitte behandeln die Fourierreihenzerlegung der Spannung und des Stromes und schließlich die Welligkeit an der Lückgrenze und die Extremwert- bzw. Effektivwertwelligkeit.

3. Fourierreihenzerlegung der Spannung

[1] gibt einen ausführlichen Überblick über diese Problematik. Zu berechnen ist Amplitude der einzelnen Oberschwingungen bezogen auf die ideale Leerlaufspannung des Stromrichters.

3.1. Vollgesteuerte Schaltungen

Die Fourierreihenzerlegung der Spannung ergibt nach [2]

$$u = U_{da0} \cdot \cos \alpha \left[1 - \sum_{v=p, 2p, 3p, \dots}^{\infty} \frac{2\sqrt{1 + v^2 \tan^2 \alpha}}{v^2 - 1} \cos (v\vartheta - \psi_v) \right] \quad (3.1)$$

$$\psi_v = \arctan \frac{\sin v\alpha \cdot \cos \alpha - v \cos v\alpha \cdot \sin \alpha}{\cos v\alpha \cdot \cos \alpha + v \cdot \sin v\alpha \cdot \sin \alpha} \quad (3.2)$$

Der Anteil der einzelnen Oberwellen ist also nach [1]

$$\frac{U_v}{U_{da0}} = \frac{\cos \alpha}{v^2 - 1} \sqrt{2(1 + v^2 \tan^2 \alpha)} = \frac{1}{v^2 - 1} \sqrt{2(\cos^2 \alpha + v^2 \sin^2 \alpha)}. \quad (3.3)$$

Dies gilt unabhängig von der Stromrichterschaltung, nur bei den unterschiedlichen Schaltungen treten immer nur die ganzzahligen Vielfache der Pulszahl als Oberschwingung auf (siehe (3.1)).

3.2. Halbgesteuerte Schaltungen mit Nullventil

3.2.1. Einpuls- und Zweipulsschaltung

Der Ansatz

$$u = U_{da\alpha} + \sum_{v=1}^{\infty} a_v \cos v\vartheta + \sum_{v=1}^{\infty} b_v \sin v\vartheta \quad (3.4)$$

¹ Dipl.-Ing. Jürgen Schwarz, DDR-1017 Berlin, Koppenstraße 66.

liefert nach [1] mit

$$U_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2} \cdot \sqrt{2} \quad (3.5)$$

$$U_v = \frac{\sqrt{2 \{ [\cos(\nu\pi) \cdot \cos(\nu\beta) + \cos(\nu\alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta) + \nu \cdot \sin(\nu\alpha) \cdot \sin(\alpha + \beta)]^2 + \dots \}}}{(\nu^2 - 1) \cdot \sqrt{\dots + [\sin(\nu\alpha) \cdot \cos(\alpha + \beta) - \nu \cdot \cos(\nu\alpha) \cdot \sin(\alpha + \beta) - \cos(\nu\pi) \sin(\nu\beta)]^2}} U_{\text{dao}} \cdot [1 + \cos(\alpha + \beta)] \quad (3.6)$$

wobei β den Winkel zwischen Spannungsnulldurchgang und natürlichen Kommutierungszeitpunkt darstellt. Für die Einphasenschaltung mit Nullventil ist

$$\beta = 0 \quad (3.7)$$

und α bewegt sich in den Grenzen von

$$0 \leq \alpha \leq \pi. \quad (3.8)$$

Für die Oberwellen gilt

$$\nu = 1, 2, 3, \dots \quad (3.9)$$

Durch Einsetzen von (1.14) und (3.7) in (3.6) vereinfacht sich die Formel zu

$$U_v = \frac{\sqrt{2 \{ \cos(\nu\pi) + \cos(\nu\alpha) \cdot \cos \alpha - \nu \cdot \sin(\nu\alpha) \sin \alpha \}^2 + \dots}}{(\nu^2 - 1) \cdot \sqrt{\dots + [\sin(\nu\alpha) \cdot \cos \alpha - \nu \cdot \cos(\nu\alpha) \cdot \sin \alpha]^2}} U_{\text{dao}} \quad (3.10)$$

Für die Einphasenbrückenschaltung gilt

$$\beta = 0 \quad (3.11)$$

$$0 \leq \alpha \leq \pi \quad (3.12)$$

$$\nu = 2, 4, 6, \dots \quad (3.13)$$

Durch Einsetzen von (3.13) in (3.10) folgt

$$\frac{U_v}{U_{\text{dao}}} = \frac{\sqrt{2 \{ [1 + \cos(\nu\alpha) \cdot \cos \alpha + \nu \cdot \sin(\nu\alpha) \sin \alpha]^2 + \dots \}}}{2 \cdot \sqrt{\dots + [\sin(\nu\alpha) \cdot \cos \alpha - \nu \cdot \cos(\nu\alpha) \cdot \sin \alpha]^2}} \quad (3.14)$$

Für die Grundschwingung der Einpulschaltung gilt

$$U_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} \sqrt{\sin^4 \alpha + \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right)^2} U_{\text{dao}} \quad (3.15)$$

(Die Formel (3.10) liefert für $\nu = 1$ wegen $(\nu^2 - 1) = 0$ kein Ergebnis).

3.2.2. Halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil

Die Fourierreihenzerlegung der Ausgangsspannung liefert mit den allgemein bekannten Ansätzen für (3.4)

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos k\omega t \cdot dt \quad (3.16)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin k\omega t \cdot dt \quad (3.17)$$

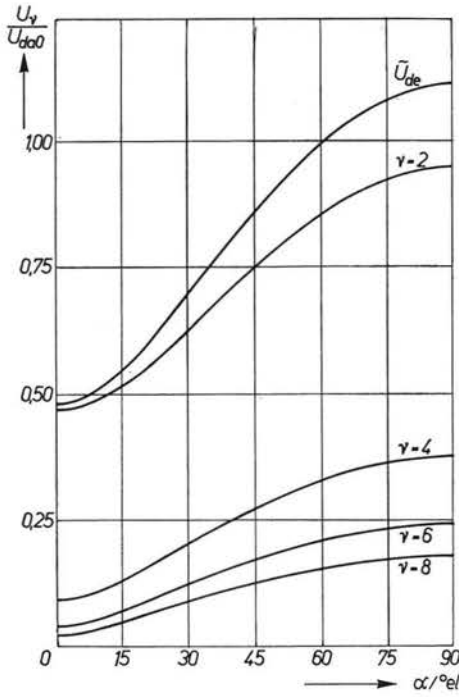


Abb.17. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Zweipulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

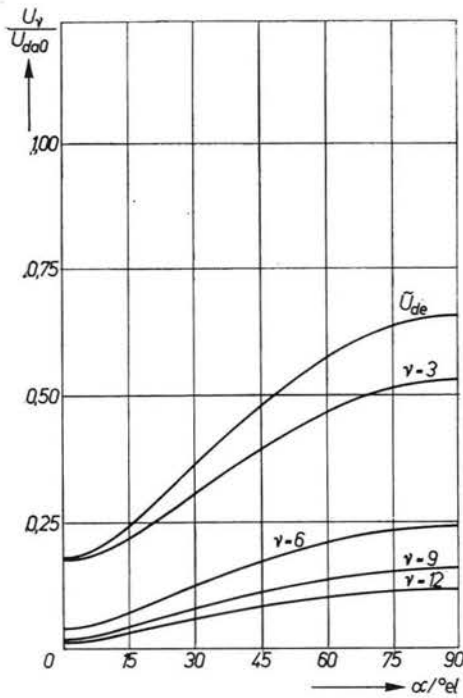


Abb.18. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Dreipulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

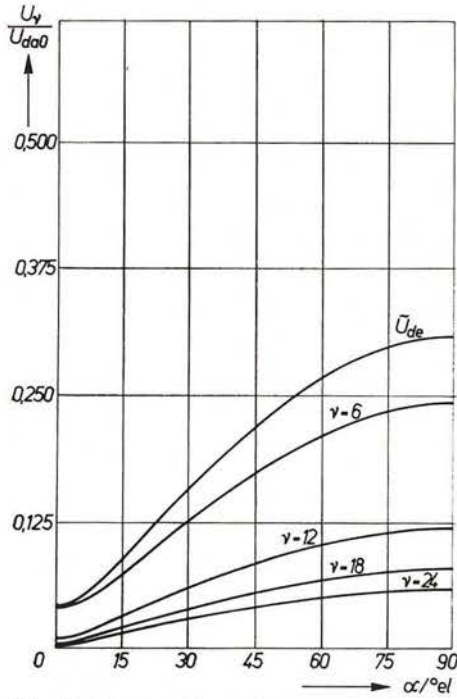


Abb. 19. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Sechspulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

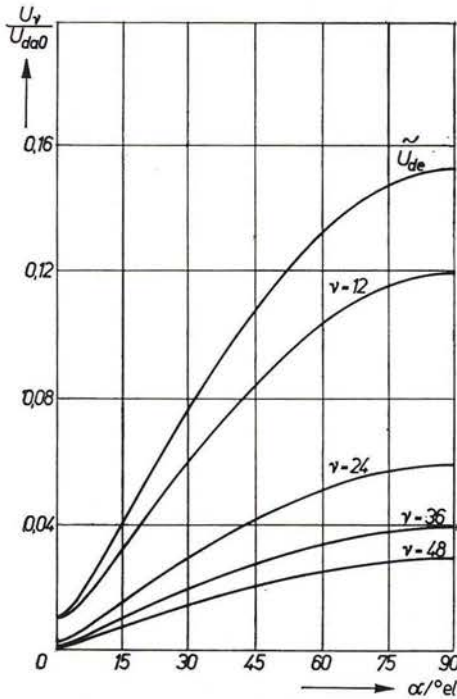


Abb. 20. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Zwölfpulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

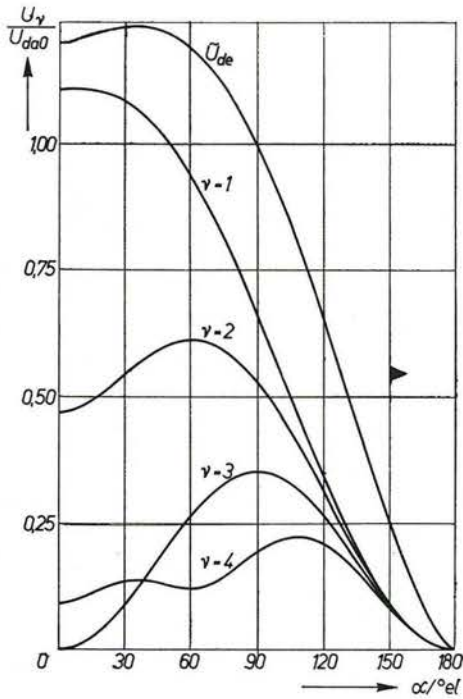


Abb. 21. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Einpulsstromrichter mit Nullventil (Parameter: ν -te Oberwelle)

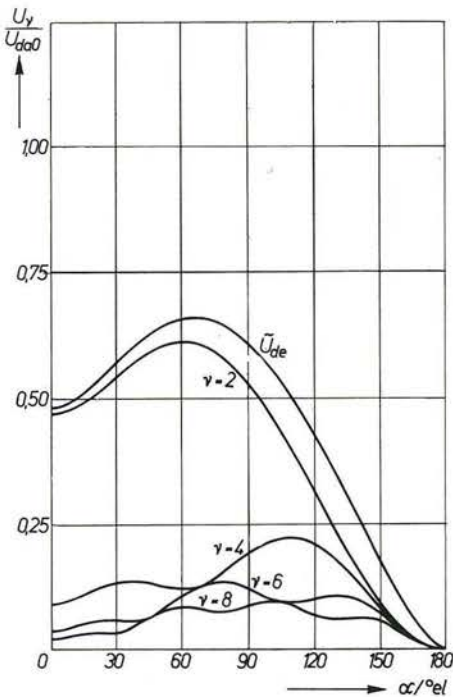


Abb. 22. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Halbgesteuerte Einphasenbrücke mit Nullventil (Parameter: ν -te Oberwelle)

folgende Ergebnisse für die Koeffizienten:

$$a_k = \frac{3\sqrt{2}U}{\pi} \left\{ -\frac{1}{9k^2 - 1} + \left[\frac{\cos[\alpha(3k+1)]}{2(3k+1)} - \frac{\cos[\alpha(3k-1)]}{2(3k-1)} \right] (-1)^k \right\} \quad (3.18)$$

$$b_k = \frac{3\sqrt{2}U}{\pi} (-1)^k \left\{ \frac{\sin[\alpha(3k+1)]}{2(3k+1)} - \frac{\sin[\alpha(3k-1)]}{2(3k-1)} \right\} \quad (3.19)$$

Durch Anwendung der Formeln (1.23) und

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (3.20)$$

sowie

$$\nu = 3k \quad (3.21)$$

ergibt sich ein durchgängig zu verwendendes Ergebnis

$$U_\nu = \frac{U_{da0}}{\nu^2 - 1} \sqrt{\{-1 - (-1)^\nu [\cos \alpha \cdot \cos(\nu\alpha) + \nu \cdot \sin \alpha \cdot \sin(\nu\alpha)]\}^2 + \dots} \\ \dots + [\nu \cdot \sin \alpha \cdot \cos(\nu\alpha) - \cos \alpha \cdot \sin(\nu\alpha)]^2 \quad (3.22)$$

3.3. Auswertung

Der Effektivwert der Gesamtspannung ergibt sich zu

$$U_{de\alpha} = \sqrt{U_{da\alpha}^2 + \sum_{\nu=p, 2p, 3p, \dots}^{\infty} U_\nu^2} \quad (3.23)$$

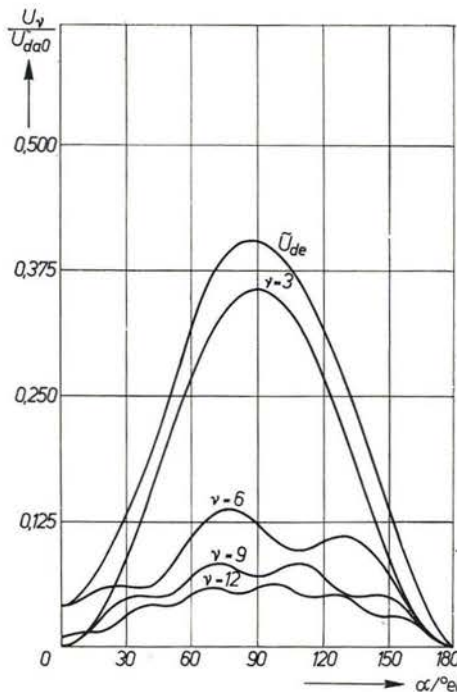


Abb. 23. Fourierreihenzerlegung der Spannung. Halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (Parameter: ν -te Oberwelle)

Der Effektivwert der überlagerten Wechselspannung hat die Größe

$$\tilde{U}_{dex} = \sqrt{\sum_{v=p,2p,3p,\dots}^{\infty} U_v^2}. \tag{3.24}$$

Die Abb.17...23 zeigen die Ergebnisse der Auswertung.

4. Fourierreihenzerlegung des Stromes

4.1. Stromberechnung

Für die Spannung über der Drossel gilt

$$u = \sum_{v=p,2p,3p,\dots}^{\infty} \sqrt{2} U_v \cdot \sin(v\vartheta + \psi_v). \tag{4.1}$$

Durch Einsetzen in (2.1) ergibt sich für den Strom

$$i = \sum_{v=p,2p,3p,\dots}^{\infty} \frac{U_v \cdot \sqrt{2}}{v \cdot \omega L} \cdot \sin\left(v\vartheta + \psi_v - \frac{\pi}{2}\right). \tag{4.2}$$

Für den Effektivwert des überlagerten Wechselstromes folgt daraus

$$\tilde{I}_{dex} = \sqrt{\sum_{v=p,2p,3p,\dots}^{\infty} \left(\frac{U_v}{v \cdot \omega L}\right)^2}. \tag{4.3}$$

4.2. Auswertung

Die Abb.24...30 enthalten die mittels Plotter graphisch dargestellten Ergebnisse.

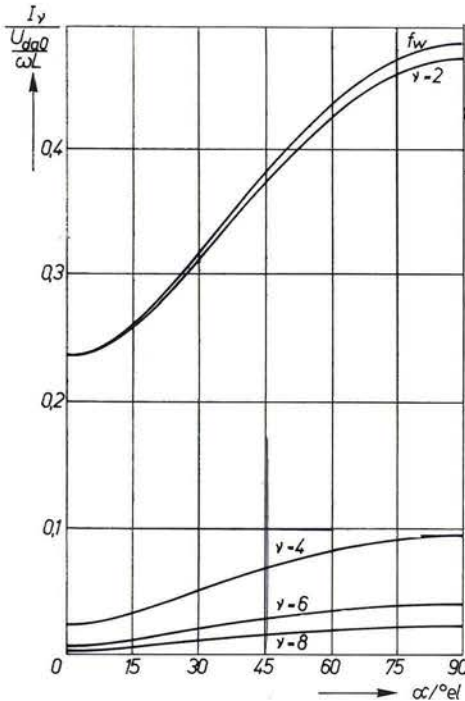


Abb.24. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Zweipulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

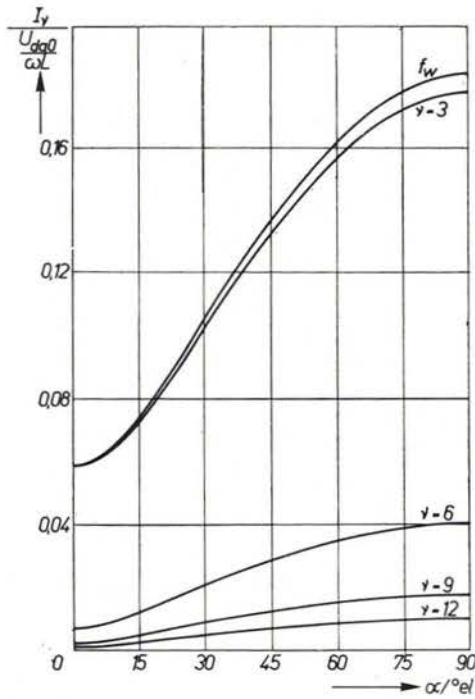


Abb.25. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Dreipulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

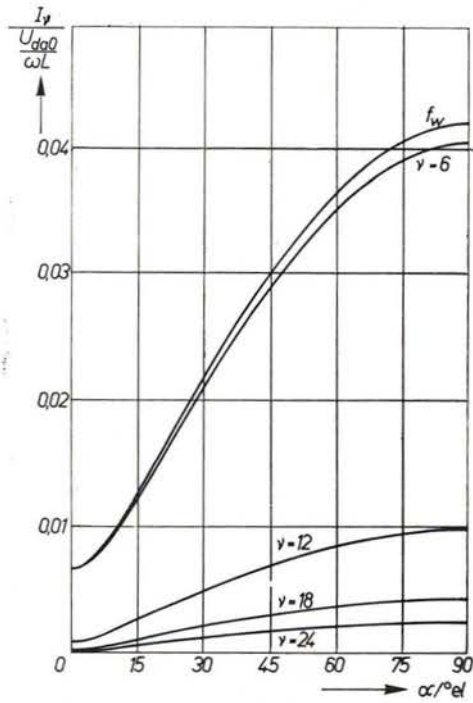


Abb.26. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Sechspulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

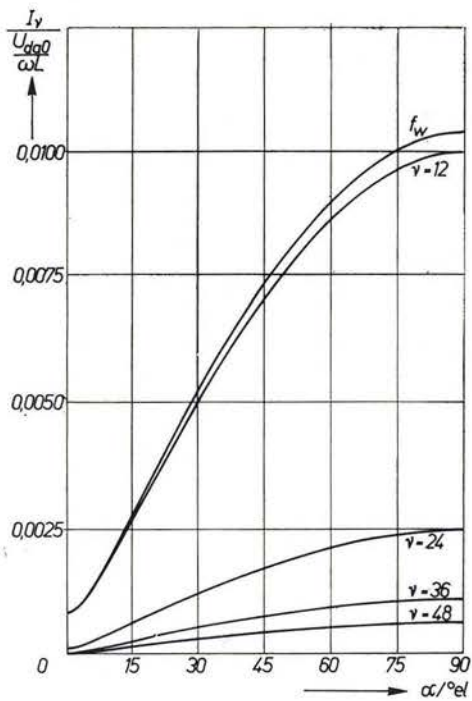


Abb. 27. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Zwölfpulsstromrichter (Parameter: ν -te Oberwelle)

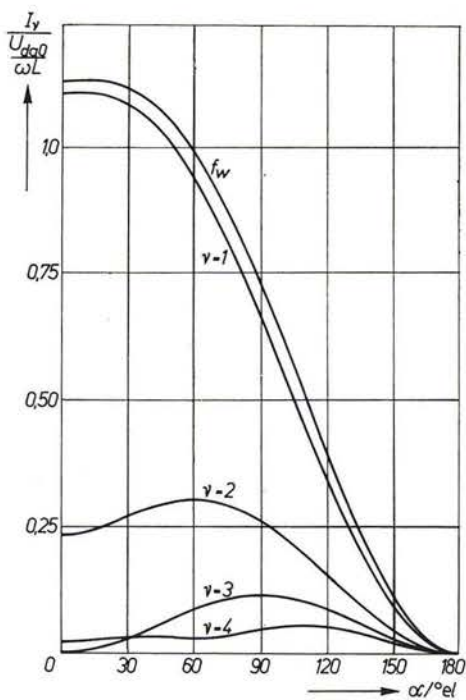


Abb. 28. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Einpulsstromrichter mit Nullventil (Parameter: ν -te Oberwelle)

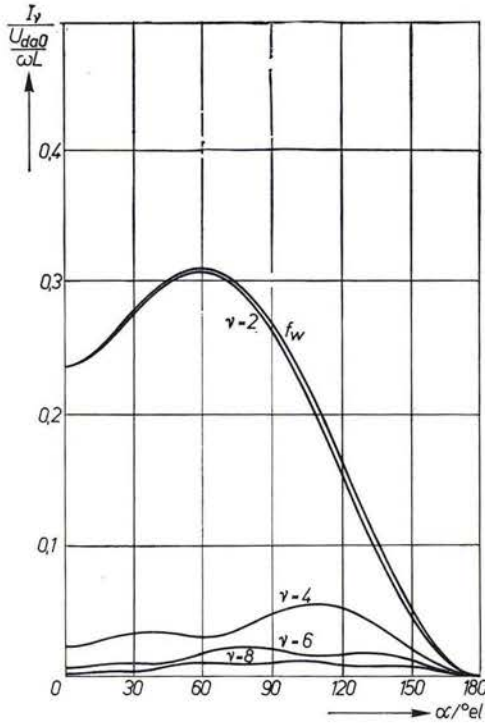


Abb. 29. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Halbgesteuerte Einphasenbrücke mit Nullventil (Parameter: ν -te Oberwelle)

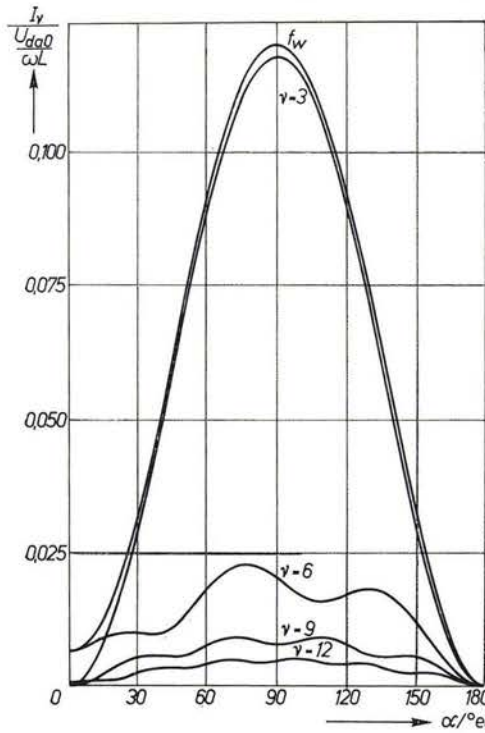


Abb. 30. Fourierreihenzerlegung des Stromes. Halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (Parameter: ν -te Oberwelle)

Aus (4.3) kann mittels

$$w = \frac{\tilde{I}_{dex}}{I_{da}} \tag{4.4}$$

der Welligkeitsfaktor f_w berechnet werden, der durch

$$f_w = \frac{w \cdot \omega L \cdot I_{da}}{U_{da0}} \tag{4.5}$$

definiert und in Abb.31 dargestellt ist.

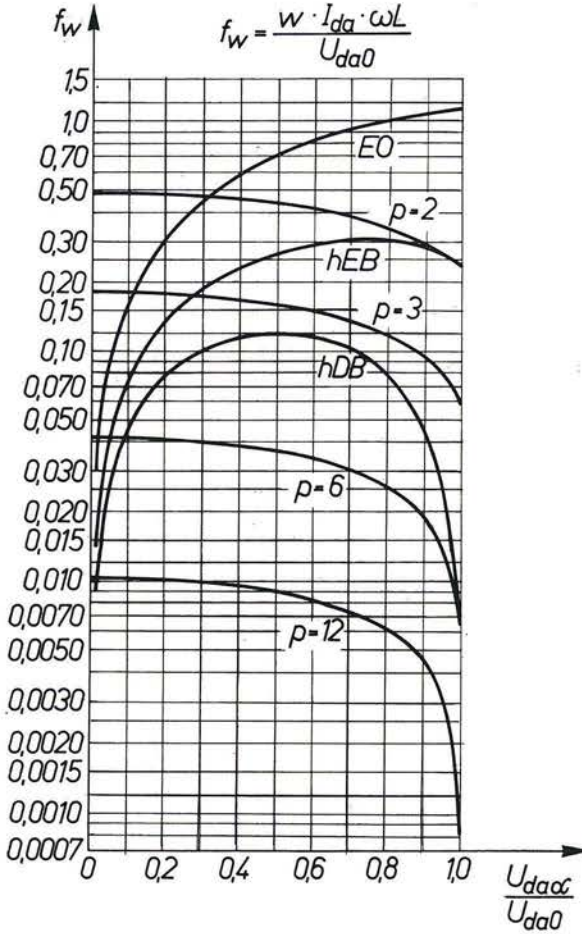


Abb.31. Welligkeitsfaktoren für netzgelöschte Stromrichterschaltungen

5. Welligkeit an der Lückgrenze

Durch Vergleich von (4.5) und (2.2) kann die Welligkeit an der Lückgrenze bestimmt werden:

$$w_L = \frac{f_w}{f_L} \tag{5.1}$$

In Abb.32 ist der Zusammenhang in Abhängigkeit von dem Steuerwinkel graphisch dargestellt.

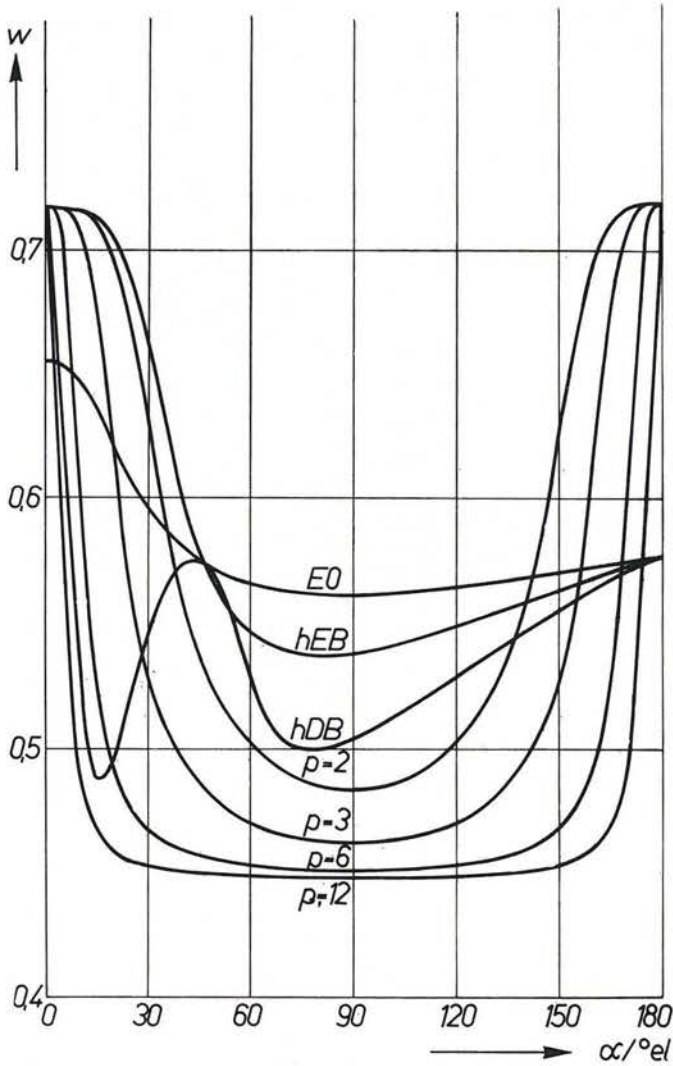


Abb.32. Welligkeit an der Lückgrenze

6. Extremwertwelligkeit und Effektivwertwelligkeit

In der Abb.33 ist als ausgewähltes Beispiel für die halbgesteuerte Drehstrombrückenschaltung mit Nullventil der Zusammenhang zwischen Extremwertwelligkeit und Effektivwertwelligkeit für bestimmte Steuerwinkel graphisch dargestellt. Es gilt allgemein

$$w_E = \frac{\Delta i}{|i| - |\dot{i}| + 2 \cdot I_{da}} \tag{6.1}$$

Ist $|\hat{i}| = |\check{i}|$, dann gilt

$$w_E = \frac{\Delta i}{2 \cdot I_{da}} \tag{6.2}$$

und daraus

$$w_E = w \cdot \frac{\Delta i}{2 \cdot \tilde{I}_{dex}} \tag{6.3}$$

(6.2) und (6.3) gelten allgemein nur bei $\alpha = 0$.

Sonst gilt

$$w_E = w \frac{\Delta i}{(|\hat{i}| - |\check{i}| w + 2\tilde{I}_{dex})} \tag{6.4}$$

bzw.

$$w = w_E \frac{2 \cdot \tilde{I}_{dex}}{\Delta i - w_E (|\hat{i}| - |\check{i}|)} \tag{6.5}$$

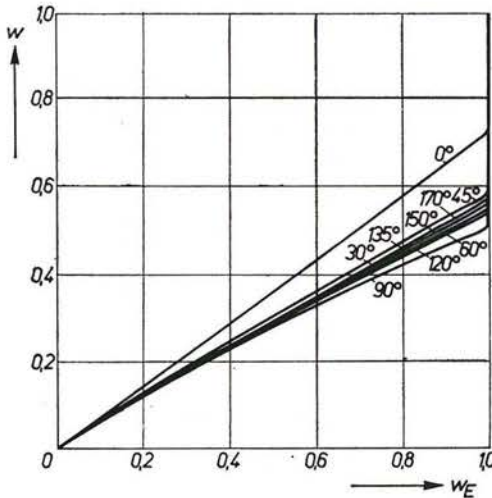


Abb. 33. Effektivwert- und Extremwertwelligkeit. Halbgesteuerte Drehstrombrücke mit Nullventil (Parameter: α)

Schrifttum

[1] *Smith, R.*: Harmonic Voltages in the Outputs of Controlled Rectifier Circuits (Oberwellen in den Ausgangsspannungen gesteuerter Gleichrichterschaltungen). *Electronic Engineering* (1964) H. 12, 832–837.
 [2] *Wasserrab, Th.*: Schaltungslehre der Stromrichtertechnik. Berlin Göttingen Heidelberg: Springer-Verlag 1962.

Schwarz, J.

DK 621.314.5/6

Parameter netzgelöschter Stromrichter im nichtlückenden Betrieb I. u. II.

Z. elektr. Inform.- u. Energietechnik, Leipzig 6 (1976), 6,
S. 481—493, 33 Abb., 2 Lit.-Zit.

Ein Maß für die Kommutierungsbeanspruchung von Gleichstrommaschinen ist die Extremwertelligkeit des Wellenstromes.

Die Arbeit enthält eine zusammenfassende Darstellung der Parameter von Strom und Spannung der bekanntesten netzgelöschten Stromrichterschaltungen bei Betrieb mit Gegenspannung und induktiver Strombegrenzung im nichtlückenden Betrieb.

Ziel ist die problemlose Drosseldimensionierung nach Welligkeit und Lücken und die Bestimmung aus der Extremwertelligkeit und umgekehrt.