

621.314.57/58 : 621.385,2.

Netzgelöschte Stromrichterschaltungen mit Nullventil im Lückbetrieb

JÜRGEN SCHWARZ

Berlin (DDR)

Eingegangen am 21. 2. 1976

Netzgelöschte Stromrichterschaltungen mit Nullventil, wie der Einpulsstromrichter mit Nullventil (M 1 F nach DIN 41761), die halbgesteuerte Einphasenbrücke (B 2 HF, B 2 HZ) und der Zweipulsstromrichter mit Nullventil (M 2 F), arbeiten im Lückbetrieb in verschiedenen Arbeitsbereichen. Es werden die Grenzen der Arbeitsphasen berechnet und ein ALGOL 60-Unterprogramm zur Berechnung der Schaltungen angegeben. Leitdauerdiagramme und Stromspannungs-Diagramme wurden numerisch berechnet und graphisch dargestellt.

Netzgelöschte Stromrichterschaltungen mit Nullventil, wie der Einpulsstromrichter mit Nullventil (Bezeichnung M 1 F nach DIN 41761), die halbgesteuerte Einphasenbrücke (B 2 HAF, B 2 HKF, B 2 HZ, B 2 H nach DIN 41761) und der Zweipulsstromrichter in Mittelpunktschaltung mit Nullventil (M 2 F nach DIN 41761), auf die die folgenden Betrachtungen beschränkt werden, arbeiten im Lückbetrieb mit Gegenspannung und induktiver Strombegrenzung in verschiedenen Arbeitsbereichen. Diese Ersatzschaltung stellt eine gute Näherung für die Speisung von Gleichstrommaschinen durch Stromrichter dar. Die Vollblechung von Gleichstrommaschinen gestattet in Verbindung mit adaptiven Ankerstromreglern einen Betrieb von Antrieben im Lückbetrieb bei guten dynamischen Eigenschaften und minimalem Materialaufwand. Zur optimalen Dimensionierung des Antriebssystems ist eine genaue Untersuchung des lückenden Betriebes erforderlich.

1. ALLGEMEINES

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Schaltungen nach den Abb. 1 und 6 behandelt. Die Schaltungen B 2 HAF, B 2 HKF und M 2 F haben das gleiche Betriebsverhalten wie die Schaltung (B 2 HZ) nach Abb. 6 (Bezeichnungen nach DIN 41761).

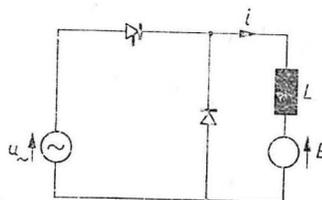


Abb. 1. Einpulsstromrichter mit Nullventil (M 1 F nach
DIN 41761)

1.1. VORAUSSETZUNGEN

Alle Berechnungen in dieser Arbeit gelten unter folgenden Voraussetzungen:

- symmetrisches Netz ohne Oberwellen,
- symmetrisch arbeitende Ansteuervorrichtung,
- keine Kommutierungsreaktanzen vorhanden,
- ideal leitende und sperrende Ventile,
- keine Resistanzen vorhanden,
- die Gegenspannung E sei konstant,
- lineare Induktivität L .

1.2. BEZEICHNUNGEN

E – Gegenspannung,	T – Periodendauer,
g – bezogene Gegenspannung,	u – Spannungsaugenblickswert,
i – Stromaugenblickswert,	U – Netzspannung,
I_{da} – arithmetischer Mittelwert des Stromes,	w – Effektivwertwelligkeit,
I_{de} – Effektivwert des Stromes,	\hat{w} – Oberschwingungsgehalt,
\tilde{I}_{de} – Effektivwert des überlagerten Wechselstromes,	α – Steuerwinkel,
I_{max} – Maximalwert des Stromes,	β – Stromflußwinkel,
I_{min} – Minimalwert des Stromes,	ζ – natürlicher Zündzeitpunkt,
L – Induktivität,	ϑ – bezogene Zeit,
t – Zeit,	ω – Netzkreisfrequenz.

Mit einem * gekennzeichnete Größen sind bezogen.

1.3. PARAMETER DES WELLENSTROMES

Charakteristisch für den Wellenstrom sind sein arithmetischer Mittelwert

$$I_{da} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (1)$$

sein Effektivwert

$$I_{de} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (2)$$

der Effektivwert des überlagerten Wechselstromes

$$\tilde{I}_{de} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - I_{da}]^2 dt} = \sqrt{I_{de}^2 - I_{da}^2} \quad (3)$$

und sein Maximalwert I_{max} . Da der Strom lücken soll, ist sein Minimalwert I_{min} immer Null.

Aus diesen Werten werden die Effektivwertwelligkeit

$$w = \frac{\tilde{I}_{de}}{I_{da}} = \sqrt{\left(\frac{I_{de}}{I_{da}}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

und der Oberschwingungsgehalt

$$\hat{w} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2I_{da}} = \frac{I_{\max}}{2I_{da}} \quad (5)$$

gebildet.

1.4. BEZOGENE GRÖßEN

Die Spannungen werden auf die Amplituden der treibenden Wechselspannungen und die Zeit auf die Netzkreisfrequenz ω bezogen:

$$\vartheta = \omega t, \quad (6)$$

$$u^*(\vartheta) = \frac{u(\vartheta)}{U\sqrt{2}}, \quad (7)$$

$$g = \frac{E}{U\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Der Strom wird auf

$$i^*(\vartheta) = \frac{i(\vartheta)}{\omega L} \quad (9)$$

bezogen. Der natürliche Zündzeitpunkt liegt bei

$$\zeta = \text{Arcsin } g. \quad (10)$$

2. DER EIMPULSSTROMRICHTER MIT NULLVENTIL

Beim Einpulsstromrichter mit Nullventil müssen fünf Arbeitsbereiche unterschieden werden:

- Freilauf ohne Nullventilwirkung (*FO*, Abb. 2a),
- Freilauf mit Nullventilwirkung (*FN*, Abb. 2b),
- Freilauf mit doppelter Stromführung der Hauptventile (trotz Freilauf ist der Zündwinkel entscheidend, Nullventil ist wirksam, *FD*, Abb. 2c),
- Gittersteuerung ohne Nullventilwirkung (*GO*, Abb. 2d),
- Gittersteuerung mit Nullventilwirkung (*GN*, Abb. 2e).

2.1. BERECHNUNG DER STROMAUGENBLICKSWERTE

2.1.1. Freilauf

Bereich $\zeta \leq \vartheta \leq \pi$:

Das Hauptventil wird zum Zeitpunkt $\vartheta = \zeta$ leitend. Für den Strom ergibt sich nach [1]

$$i_1^*(\vartheta) = \cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta). \quad (11)$$

Ist der Strom i_1 zum Zeitpunkt $\vartheta = \pi$ größer als Null, so tritt Nullventilwirkung auf.

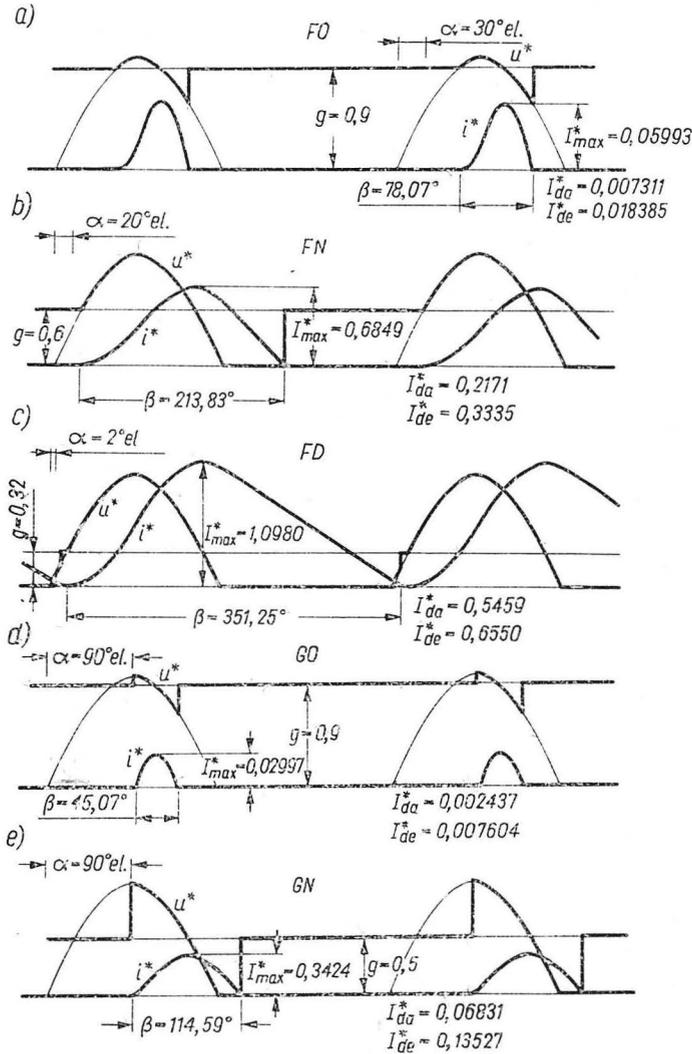


Abb. 2. Spannungen und Ströme in den Arbeitsbereichen (M 1 F): a) Bereich FO, b) Bereich FN, c) Bereich FD, d) Bereich GO, e) Bereich GN

Bereich $\pi \leq \vartheta \leq 2\pi + \alpha$:

Der Strom verhält sich in diesem Bereich nach [2]

$$i_2^*(\vartheta) = \cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta). \tag{12}$$

Wenn der Strom i_2 zum Zeitpunkt $\vartheta = 2\pi + \alpha$ noch fließt, so kommutiert er auf das Hauptventil.

Bereich $2\pi + \alpha \leq \vartheta \leq \zeta + \beta$:

Hier wird der Strom

$$i_3^*(\vartheta) = \cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta). \tag{13}$$

2.1.2. Gittersteuerung

Bereich $\alpha \leq \vartheta \leq \pi$:

Das Hauptventil zündet beim Zeitpunkt $\vartheta = \alpha$.

$$i_4^*(\vartheta) = \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\alpha - \vartheta). \tag{14}$$

Das Nullventil wirkt, wenn der Strom zum Zeitpunkt $\vartheta = \pi$ größer als Null ist.

Bereich $\pi \leq \vartheta \leq \alpha + \beta$:

$$i_5^*(\vartheta) = \cos \alpha + 1 + g(\alpha - \vartheta). \tag{15}$$

2.2. ABGRENZUNG DER BEREICHE

Die Gegenspannung darf wegen des Nullventils nicht negativ werden, damit ergibt sich für g

$$0 \leq g < 1. \tag{16}$$

Der Steuerwinkel α muß sich in den Grenzen

$$0 \leq \alpha \leq \pi \tag{17}$$

bewegen. Abb. 3 gibt einen Überblick über die Bereiche.

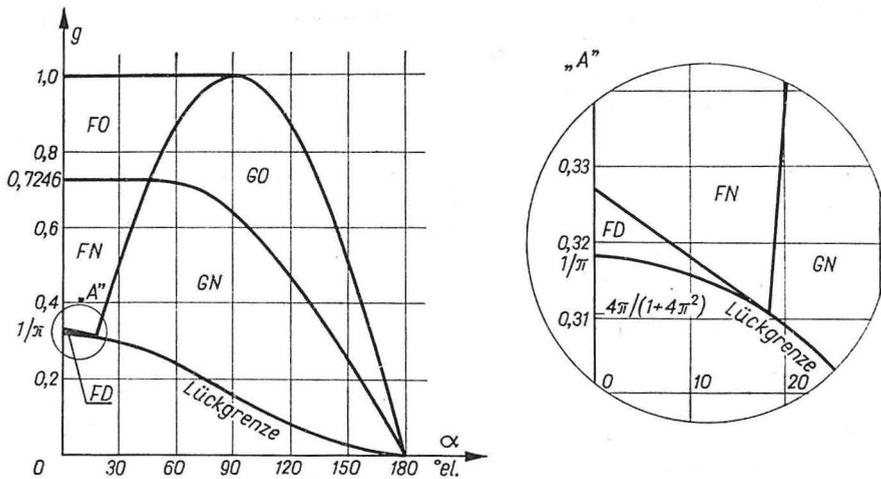


Abb. 3. Arbeitsbereiche M 1 F im Lückbetrieb

F ... Freilauf, O ... ohne Nullventil, D ... doppelte Stromführung der Hauptventile,
G ... Gittersteuerung, N ... mit Nullventil

2.2.1. Bereich Freilauf ohne Nullventil (FO)

Die ersten Grenzen ergeben sich aus (16) bzw. (17)

$$g < 1, \tag{18}$$

$$\alpha \geq 0. \tag{19}$$

Aus der Forderung nach Freilauf folgt

$$\alpha < \zeta = \text{Arc sin } g. \quad (20)$$

Durch Nullsetzen von (11) für $\vartheta = \pi$ ergibt sich die Grenze für die Nullventilwirkung

$$\cos \zeta - 1 + g(\zeta - \pi) \leq 0. \quad (21)$$

Eine Umformung liefert für die Grenze

$$g = \sin \left(\frac{1}{g} + \sqrt{\frac{1}{g^2} - 1} \right). \quad (22)$$

Das Ergebnis läßt sich nicht explizit ausdrücken und ergibt sich durch numerische Berechnung zu

$$g \geq 0,724611. \quad (23)$$

2.2.2. Bereich Freilauf mit Nullventil (FN)

Es gelten die Grenzen (19) und (20). Die Umkehrung von (23) liefert

$$g < 0,724611. \quad (24)$$

Das Nullsetzen von (12) für $\vartheta = 2\pi + \alpha$ liefert die Grenze zum Bereich *FD*

$$\cos \zeta + 1 + g(\zeta - 2\pi - \alpha) = 0. \quad (25)$$

Daraus

$$\alpha \geq \frac{1 + \cos \zeta}{g} - 2\pi + \zeta. \quad (26)$$

Für $\alpha = 0$ ergibt sich durch numerische Berechnung

$$g = 0,32689. \quad (27)$$

2.2.3. Bereich Freilauf mit doppelter Stromführung des Hauptventils (FD)

Es gilt die Grenze (19) und die Negation von (26)

$$\alpha < \frac{1 + \cos \zeta}{g} - 2\pi + \zeta. \quad (28)$$

Die dritte Grenze ergibt sich aus der Bedingung des Lückbetriebes, d. h. der Strom muß zum Zeitpunkt $\vartheta = \zeta + 2\pi$ Null sein:

$$\cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos(\zeta + 2\pi) + g(\zeta - \zeta + 2\pi) = 0. \quad (29)$$

Daraus die Bedingung für Lückbetrieb

$$g \geq \frac{1}{2\pi}(1 + \cos \alpha) \quad (30)$$

bzw.

$$\alpha \geq \arccos(2\pi g - 1). \quad (31)$$

Der Schnittpunkt von (28) mit (31) entspricht gerade der Bedingung (20) (punktförmige Berührung).

2.2.4. Bereich Gittersteuerung ohne Nullventilwirkung (GO)

Im Steuerwinkelbereich $\alpha \leq \pi/2$ gilt die Negation von (20)

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \geq \zeta = \text{Arcsin } g. \\ \alpha \leq \frac{\pi}{2} \end{array} \right\} \quad (32)$$

Für größere Steuerwinkel muß g im Zündzeitpunkt kleiner als der Augenblickswert der treibenden Wechselspannung sein, d. h.

$$\left. \begin{array}{l} \alpha < \text{arcsin } g. \\ \alpha \geq \frac{\pi}{2} \end{array} \right\} \quad (33)$$

(32) und (33) können mit

$$g \leq \sin \alpha \quad (34)$$

zusammengefaßt werden. Keine Nullventilwirkung tritt auf, wenn der Strom zum Zeitpunkt $\vartheta = \pi$ Null ist

$$\cos \alpha + 1 + g(\alpha - \pi) = 0, \quad (35)$$

und daraus

$$g \geq \frac{1 + \cos \alpha}{\pi - \alpha}. \quad (36)$$

2.2.5. Bereich Gittersteuerung mit Nullventilwirkung (GN)

Es gelten (32) und die Negation von (36)

$$g < \frac{1 + \cos \alpha}{\pi - \alpha}. \quad (37)$$

Die Lückgrenze ergibt sich durch Nullsetzen von (15) an der Stelle $\vartheta = \alpha + 2\pi$

$$\cos \alpha + 1 + g(\alpha - \alpha - 2\pi) = 0. \quad (38)$$

Daraus ergibt sich (30).

2.3. BERECHNUNG DER SPANNUNG UND DER LEITDAUER

Beim Zeitpunkt $\vartheta = \alpha + \beta$ bzw. $\vartheta = \zeta + \beta$ muß der Strom Null sein. Daraus lassen sich die Spannungen bzw. die Leitdauer ermitteln. Die Leitdauer β läßt sich im allgemeinen nicht explizit ausdrücken.

2.3.1. Bereich FO

Nach [1] ergibt sich g zu

$$g_1 = \sin \left(\arctan \frac{1 - \cos \beta}{\beta - \sin \beta} \right) \quad (39)$$

bzw.

$$g_1 = \frac{1 - \cos \beta}{\sqrt{(\beta - \sin \beta)^2 + (1 - \cos \beta)^2}}. \quad (40)$$

2.3.2. Bereich *FN*

Aus

$$\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \zeta - \beta) = 0 \quad (41)$$

folgt

$$\beta = \frac{1 + \cos \zeta}{g}. \quad (42)$$

Mit

$$\cos \zeta = \sqrt{1 - g^2} \quad (43)$$

ergibt sich für g

$$g_2 = \frac{2\beta}{\beta^2 + 1}. \quad (44)$$

2.3.3. Bereich *FD*

Aus dem Ansatz aus (13)

$$\cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos(\zeta + \beta) + g(\zeta - \zeta - \beta) = 0 \quad (45)$$

ergibt eine längere Rechnung

$$g_3 = \sqrt{1 - 2A^2 + 2A\sqrt{A^2 - B} + B} \quad (46)$$

mit den Koeffizienten

$$A_3 = \frac{(1 + \cos \alpha)(1 - \cos \beta)}{(\beta - \sin \beta)^2 + (1 - \cos \beta)^2} \quad (47)$$

und

$$B_3 = \frac{(1 + \cos \alpha)^2 - (\beta - \sin \beta)^2}{(\beta - \sin \beta)^2 + (1 - \cos \beta)^2}. \quad (48)$$

2.3.4. Bereich *GO*

(14) wird Null gesetzt

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta) + g(\alpha - \alpha - \beta) = 0. \quad (49)$$

Daraus ergibt sich [1]

$$g_4 = \frac{\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)}{\beta}. \quad (50)$$

2.3.5. Bereich *GN*

Durch Nullsetzen von (15) erhält man

$$\cos \alpha + 1 + g(\alpha - \alpha - \beta) = 0, \quad (51)$$

$$g_5 = \frac{1}{\beta} (1 + \cos \alpha) \quad (52)$$

bzw.

$$\beta = \frac{1}{g} (1 + \cos \alpha). \quad (53)$$

2.4. BERECHNUNG DER STRÖME

Angegeben werden die Ansätze und die Ergebnisse der Berechnung des arithmetischen Mittelwertes der Ströme. Zur Ermittlung des Effektivwertes werden Formeln angegeben, die eine numerische Auswertung zulassen.

2.4.1. Bereich FO

Nach [1] ergibt sich

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{g} (1 - \cos \beta) - g \frac{\beta^2}{2} \right], \quad (54)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\zeta}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta}. \quad (55)$$

2.4.2. Bereich FN

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta + \int_{\pi}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta \right], \quad (56)$$

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\beta}{2} (1 + \cos \zeta) + g + \zeta - \pi \right], \quad (57)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \int_{\pi}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}}. \quad (58)$$

2.4.3. Bereich FD

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta + \int_{\pi}^{2\pi+\alpha} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta + \dots \right. \\ \left. + \int_{2\pi+\alpha}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta \right\}, \quad (59)$$

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\beta (\cos \zeta + 1) + g \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right) + \zeta - \pi - \sin(\zeta + \beta) + \sin \alpha + \cos \alpha (\zeta + \beta - 2\pi - \alpha) \right], \quad (60)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \int_{\pi}^{2\pi+\alpha} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right. \\ \left. + \int_{2\pi+\alpha}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + 1 + \cos \alpha - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}}. \quad (61)$$

2.4.4. Bereich *GO*

Nach [1] ergibt sich

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\beta \cos \alpha + \sin \alpha - \sin(\alpha + \beta) - g \frac{\beta^2}{2} \right], \quad (62)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\beta} [\cos \alpha - \cos \vartheta + g(\alpha - \vartheta)]^2 d\vartheta}. \quad (63)$$

2.4.5. Bereich *GN*

Nach [2] ist

$$I_{da}^* = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\beta}{2} (1 + \cos \alpha) + \sin \alpha + \alpha - \pi \right], \quad (64)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \int_{\alpha}^{\pi} [\cos \alpha - \cos \vartheta + g(\alpha - \vartheta)]^2 d\vartheta + \int_{\pi}^{\alpha+\beta} [\cos \alpha + 1 + g(\alpha - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}}. \quad (65)$$

2.5. AUSWERTUNG

Ausgehend von den Formeln wurde das Leitdauerdiagramm für die M 1 F (Abb. 4) und das Strom-Spannungs-Diagramm (Abb. 5) berechnet. Es sind die Linien mit konstantem Steuerwinkel und die Grenzen der Arbeitsbereiche eingetragen.

Die Freilaufbereiche *FO* und *FN* sind in den Abb. 4 und 5 nur Linien, da hier nur eine Abhängigkeit von *g* besteht.

3. DIE UNSYMMETRISCHE HALBGESTEUERTE EINPHASENBRÜCKE

Die unsymmetrische halbgesteuerte Einphasenbrücke ist im gleichstromseitigen Betriebsverhalten in den Bereichen *FO*, *FN*, *GO* und *GN* identisch mit der Parallelschaltung von zwei Einpulsstromrichtern mit Nullventil, die von zwei gegenphasigen Wechselspannungen gespeist werden (Phasenverschiebung $\pi \hat{=} 180^\circ$ el.). Es treten fünf Arbeitsbereiche auf, die die gleichen Bezeichnungen wie beim Einpulsstromrichter haben und auch genauso definiert sind (Abb. 7a ... 7e).

3.1. BERECHNUNG DER STROMAUGENBLICKSWERTE

Bei dieser Schaltung gelten die Gleichungen (11), (12), (14) und (15). Gleichung (12) ist allerdings nur im Bereich $\pi \leq \vartheta \leq \pi + \alpha$ gültig. Für Freilauf im Bereich $\pi + \alpha \leq \vartheta \leq \zeta + \beta$ gilt für die treibende Spannung

$$u^*(\vartheta) = -\sin \vartheta - g. \quad (66)$$

Der Strom ergibt sich damit zu

$$i_g^*(\vartheta) = \cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta). \quad (67)$$

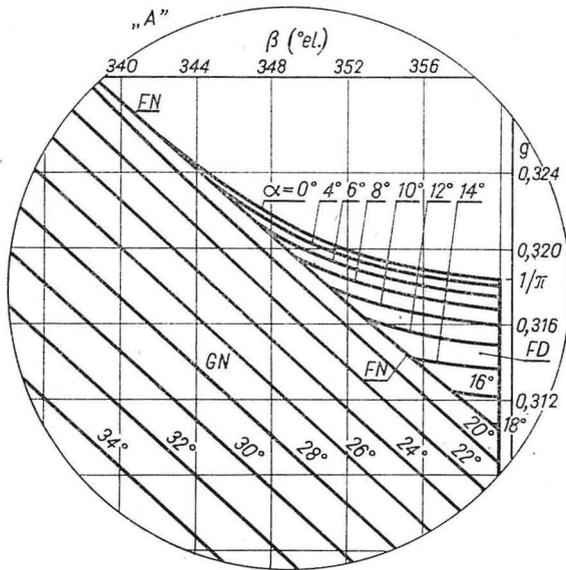
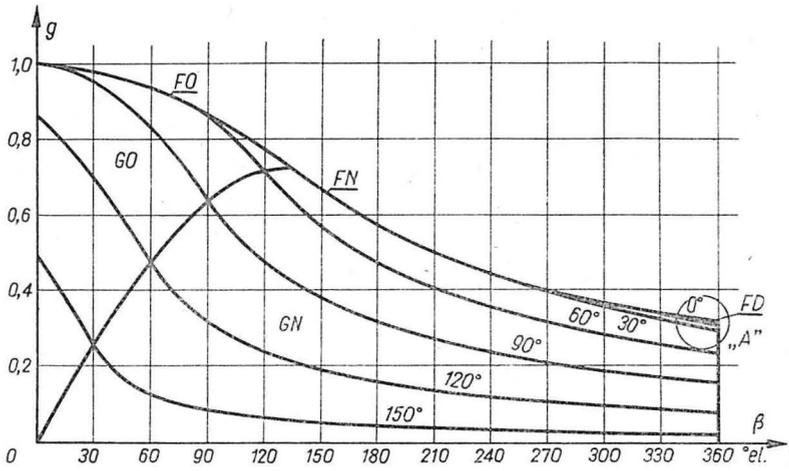


Abb. 4. Leitdauerdiagramm M 1 F (Parameter: α)

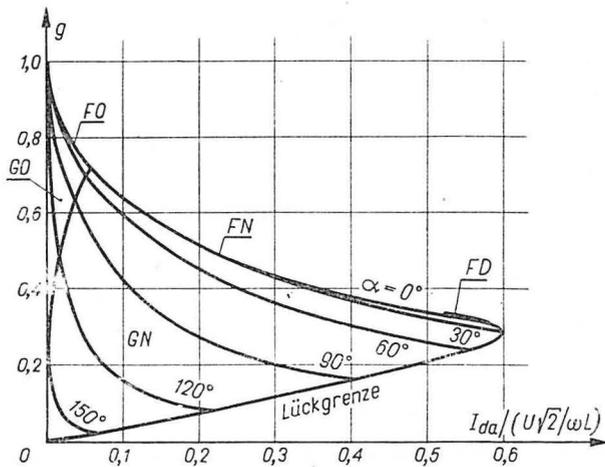


Abb. 5. Strom-Spannungs-Diagramm M 1 F (Parameter: α)

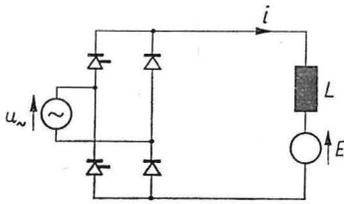


Abb. 6. Zweipulsstromrichter mit Nullventil (B 2 HZ nach DIN 41761)

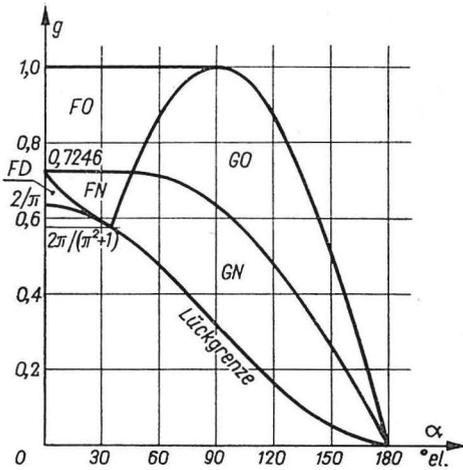


Abb. 8. Arbeitsbereiche B 2 HZ im Lückbetrieb (Bedeutung der Zeichen siehe Abb. 3)

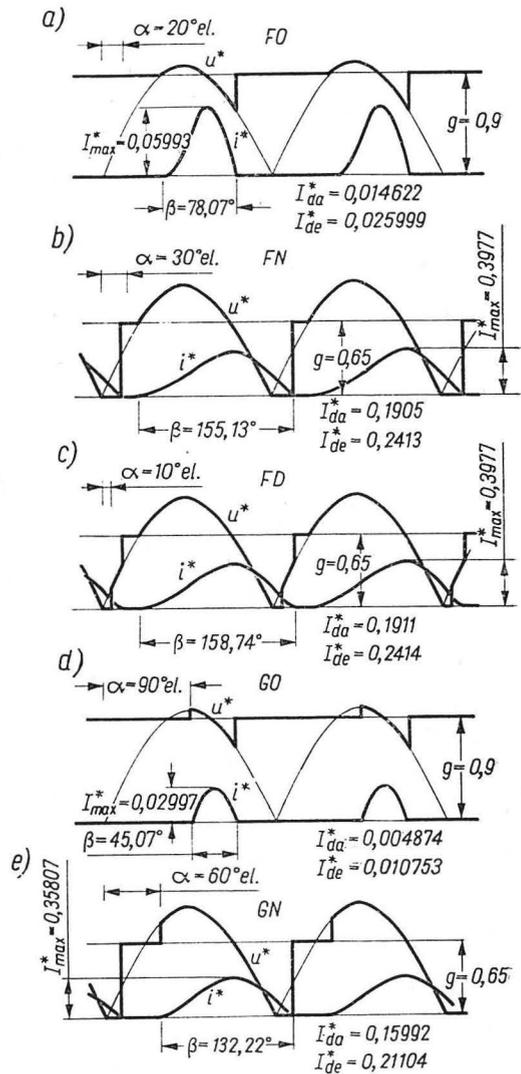


Abb. 7. Spannungen und Ströme in den Arbeitsbereichen (B 2 HZ): a) Bereich FO, b) Bereich FN, c) Bereich FD, d) Bereich GO, e) Bereich GN

3.2. ABGRENZUNG DER BEREICHE

Abb. 8 gibt einen Überblick über die Grenzen der Bereiche. Die Bereiche FO und GO sind genauso abgegrenzt wie beim Einpulsstromrichter, d. h. (16) ... (23) und (32) ... (36) haben weiterhin Gültigkeit.

3.2.1. Bereich *FN*

Es gelten die Grenzen (20) und (24) des Einpulsstromrichters. Das Nullsetzen von (12) an der Stelle $\vartheta = \pi + \alpha$ liefert

$$\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \pi - \alpha) = 0, \quad (68)$$

$$\alpha \geq \frac{1 + \cos \zeta}{g} - \pi - \zeta. \quad (69)$$

Für $\alpha = 0$ bedeutet die Grenze (69)

$$g = 0.724611. \quad (70)$$

3.2.2. Bereich *FD*

Es gelten (19) und die Umkehrung von (69)

$$\alpha < \frac{1 + \cos \zeta}{g} - \pi - \zeta. \quad (71)$$

Die Lückgrenze ($\beta = \pi$) liefert die Bedingung

$$\cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos(\zeta + \pi) + g(\zeta - \zeta - \pi) = 0, \quad (72)$$

$$g \geq \frac{1}{\pi} (1 + \cos \alpha), \quad (73)$$

$$\alpha \geq \arccos(\pi g - 1). \quad (74)$$

3.2.3. Bereich *GN*

Es gelten (32) und (37). Die Lückgrenze liefert aus (15)

$$\cos \alpha + 1 + g(\alpha - \alpha - \pi) = 0 \quad (75)$$

die Bedingung (73) bzw. (74).

3.3. BERECHNUNG DER SPANNUNG UND DER LEITDAUER

Spannung und Leitdauer in den Bereichen *FO*, *FN*, *GO* und *GN* entsprechen denen des Einpulsstromrichters. Für den Bereich *FD* ergibt sich durch Nullsetzen von (67) an der Stelle $\vartheta = \zeta + \beta$

$$\cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos(\zeta + \beta) - g\beta = 0 \quad (76)$$

durch längere Rechnung die Gültigkeit von (46) für g_6 mit

$$A_6 = \frac{(1 + \cos \beta)(1 + \cos \alpha)}{(1 + \cos \beta)^2 + (\beta + \sin \beta)^2} \quad (77)$$

und

$$B_6 = \frac{(1 + \cos \alpha)^2 - (\beta + \sin \beta)^2}{(1 + \cos \beta)^2 + (\beta + \sin \beta)^2}. \quad (78)$$

3.4. BERECHNUNG DER STRÖME

Die arithmetischen Mittelwerte der Ströme in den Bereichen FO , FN , GO und GN ergeben sich durch Verdopplung von (54), (57), (62) und (64). Für die Effektivwerte müssen (55), (58), (63) und (65) mit $\sqrt{2}$ multipliziert werden.

Im Bereich FD liefert der Ansatz

$$I_{da}^* = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta + \int_{\pi}^{\pi+\alpha} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta + \dots \right. \\ \left. + \int_{\pi+\alpha}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)] d\vartheta \right\}, \quad (79)$$

$$I_{da}^* = \frac{1}{\pi} \left[\cos \alpha (\zeta + \beta - \pi - \alpha) + \sin \alpha + g \left(1 - \frac{\beta^2}{2} \right) + \zeta + \beta (1 + \cos \zeta) - \pi + \sin (\zeta + \beta) \right], \quad (80)$$

$$I_{de}^* = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left\{ \int_{\zeta}^{\pi} [\cos \zeta - \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \int_{\pi}^{\pi+\alpha} [\cos \zeta + 1 + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta + \dots \right.} \\ \left. + \int_{\pi+\alpha}^{\zeta+\beta} [\cos \zeta + \cos \alpha + 1 + \cos \vartheta + g(\zeta - \vartheta)]^2 d\vartheta \right\}}. \quad (81)$$

3.5. AUSWERTUNG

Ausgehend von den Formeln wurde das Leitdauerdiagramm für die B 2 HZ (Abb. 9) und das Strom-Spannungs-Diagramm (Abb. 10) berechnet. Es sind die Linien mit konstantem Steuerwinkel und die Grenzen der Bereiche eingetragen. Auch in den Abb. 9 und 10 sind die Bereiche FO und FN nur Linien (siehe Abschnitt 2.5).

4. STROMMAXIMALWERTE

Der Strom durch eine Induktivität hat einen Extremwert, wenn die Spannung über der Induktivität durch Null geht. Hier ist das dann der Fall, wenn die Gegenspannung genauso groß wie die treibende Wechselspannung ist, also im Zeitpunkt

$$\vartheta_m = \pi - \zeta. \quad (82)$$

Durch Einsetzen von (82) in (11) ergibt sich für Freilauf

$$I_{\max}^* = 2 \cos \zeta + g(2\zeta - \pi) \quad (83)$$

und in (14) ergibt sich für Gittersteuerung

$$I_{\max}^* = \cos \alpha + \cos \zeta + g(\alpha + \zeta - \pi). \quad (84)$$

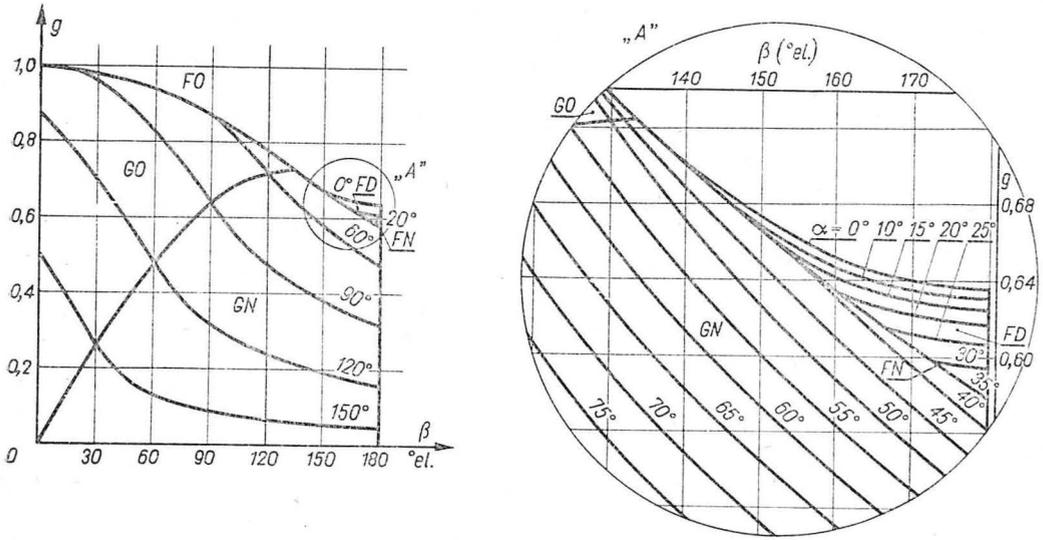


Abb. 9. Leitdauerdiagramm B 2 HZ (Parameter: α)

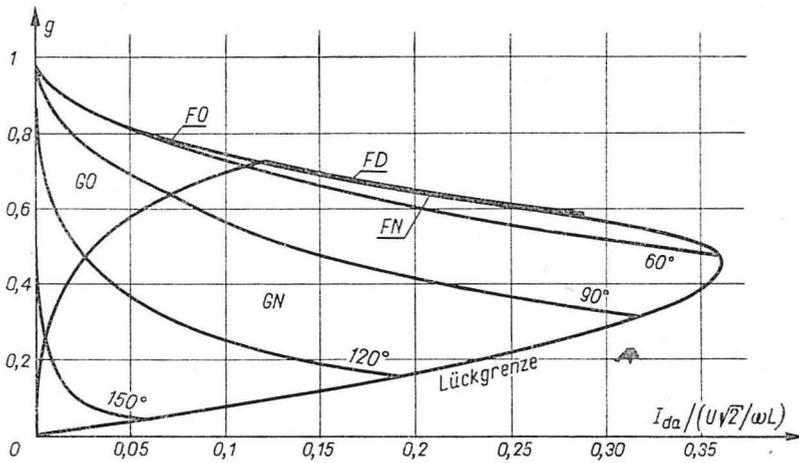


Abb. 10. Strom-Spannungs-Diagramm B 2 HZ (Parameter: α)

5. ALGOL 60-UNTERPROGRAMM $M_p F$

Auf der Grundlage der Abschnitte 2... 4 wurde ein Programm erarbeitet, welches zur Berechnung der Parameter der Schaltungen im Lückbetrieb geeignet ist (Anlage). Nach Vorgabe der Größen p (Pulszahl: 1 für M 1 F und 2 für B 2 HF, B 2 HZ und M 2 F), g und α erfolgt die Berechnung von β , I_{da}^* , I_{de}^* , I_{max}^* . Die Stromkenngrößen werden im Programm noch zur Ermittlung der Effektivwertwelligkeit w nach (4) und des Oberschwin-

Inlere: ALGOL 60-Unterprogramm zur Berechnung der Parameter der Dimpulsschaltung und der halb-
gesteuerten Birphasenbrueckenschaltung mit Nullventil im Lueckbetrieb

```

procedure MpF(g,alpha,p,beta,ida,ide,imax,w,ws,k);
real g,alpha,beta,ida,ide,imax,w,ws;
integer p,k;
begin real ca,cz,ia1,ia2,ia3,ie1,ie2,ie3,pi,x,zeta;
  procedure int(f,a,b,ia,ie);
  real f,a,b,ia,ie;
  begin real delta,r,s,y,z;
    integer k;
    delta:=0.01*(b-a);
    x:=a;
    y:=f;
    s:=r:=0;
    for k:=1 step 2 until 99 do
      begin x:=a+k*delta;
        y:=f;
        x:=x+delta;
        z:=f;
        r:=4*y+2*z;
        s:=4*y*y+2*z*z;
      end;
    ia:=delta/3*(r-z);
    ie:=delta/3*(s-z*z);
  end;
  real procedure reg(f,y,xo,xu);
  value y,xo,xu;
  real f,y,xo,xu;
  begin real fo,fu,fx;
    x:=xo;
    fo:=f-y;
    xu:=xu;
    fu:=f-y;
mp1: x:=xo-fo*(xo-xu)/(fo-fu);
    fx:=f-y;
    if fx*fu < 0 then
      begin fo:=fx;
        xo:=x;
      end else
      begin fu:=fx;
        xu:=x;
      end;
    if abs(fx/y) ≥ 0.000001 then goto mp1;
    reg:=x;
  end;
  real procedure i(k,x);
  integer k;
  real x;
  begin switch v:=m1,m2,m3,m4,m5,m6;
    real w,y,z;
    goto v[k];
m1: y:=ca; z:=zeta; w:=0; goto n1;
m2: y:=ca+1; z:=zeta; w:=0; goto n2;
m3: y:=ca+1+ca; z:=zeta; w:=0; goto n1;
m4: y:=ca; z:=alpha; w:=0; goto n1;
m5: y:=ca+1; z:=alpha; w:=0; goto n2;
m6: y:=ca+1+ca; z:=zeta; w:=pi;
n1: iy:=cos(x+w)+g*(z-x); goto n3;
n2: iy:=g*(z-x);
n3: end;
  real procedure gf(k,x);
  integer k;
  real x;
  begin switch v:=m1,m2,m3,m4,m5,m6;
    real a,b,c;
    goto v[k];

```

```

m1:  gf=(1-cos(x))/sqrt((x-sin(x))2+(1-cos(x))2);
      goto n1;
m2:  gf=2*x/(x2+1);
      goto n1;
m3:  c=(x-sin(x))2+(1-cos(x))2;
      a=(1+ca)*(1-cos(x))/c;
      b=((1+ca)2-2*(x-sin(x))2)/c;
      goto n2;
m4:  gf=(ca-cos(alpha+x))/x;
      goto n1;
m5:  gf=(1+ca)/x;
      goto n1;
m6:  c=(1+cos(x))2+(x+sin(x))2;
      a=(1+cos(x))*(1+ca)/c;
      b=((1+ca)2-2*(x+sin(x))2)/c;
n2:  gf=sqrt(1-2*a2+2*a*sqrt(a2-b)+b);
n1:  end;
     pi=3.141592654;
     ca=cos(alpha);
     if g < 0.5*p/pi*(1+ca) v g ≥ 1 v alpha > 0.5*pi ^ g ≥ sin(alpha) v p > 2 v p <
     zeta=arcsin(g);
     cz=cos(zeta);
     ia2=ia3=ie2=ie3=0;
     if alpha ≥ zeta then goto ma1;
     if g _ 0.724611 then goto ma2;
     if alpha ≥ (1+cz)/g-2*pi/p+zeta then goto ma3;
     k=3;
     comment F0;
     int(i(1,x),zeta,pi,ia1,ie1);
     int(i(2,x),pi,2*pi/p+alpha,ia2,ie2);
     if p=2 then goto ma4;
     beta=reg(gf(3,x),g,2*pi+alpha-zeta,2*pi);
     int(i(3,x),2*pi+alpha,zeta+beta,ia3,ie3);
     goto ma5;
ma4:  beta=reg(gf(b,x),g,pi+alpha-zeta,pi);
     int(i(b,x),pi+alpha,zeta+beta,ia3,ie3);
     goto ma5;
ma3:  k=2;
     comment F1;
     beta=(1+cz)/g;
     int(i(1,x),zeta,pi,ia1,ie1);
     int(i(2,x),pi,zeta+beta,ia2,ie2);
     goto ma5;
ma2:  k=1;
     comment F0;
     beta=reg(gf(1,x),g,pi-2*zeta,0.5*pi);
     int(i(1,x),zeta,zeta+beta,ia1,ie1);
     goto ma5;
ma1:  if g < (1+ca)/(pi-alpha) then goto ma6;
     k=4;
     comment G0;
     beta=reg(gf(4,x),g,pi-zeta-alpha,pi-alpha);
     int(i(4,x),alpha,alpha+beta,ia1,ie1);
     goto ma5;
ma6:  k=5;
     comment G5;
     beta=(1+ca)/g;
     int(i(4,x),alpha,pi,ia1,ie1);
     int(i(5,x),pi,alpha+beta,ia2,ie2);
ma5:  ida=0.5*p/pi*(ia1+ia2+ia3);
     ide=sqrt(0.5*p/pi*(ie1+ie2+ie3));
     ws=sqrt((ide/ida)2-1);
     imax= if k ≤ 3 then 2*cz+g*(2*zeta-pi) else ca+cz+g*(alpha+zeta-pi);
     ws=0.5*imax/ida;
end

```

Bemerkung: Das Unterprogramm wurde auf der Digitalrechenanlage ODRA 1204 in der Programmiersprache ALGOL 1204 getestet.

ungsgehaltenes \hat{w} nach (5) verwendet. Zusätzlich wird eine **integer**-Größe k ausgegeben, welche gemäß Tabelle 1 eine Information über den Arbeitsbereich entsprechend den eingegebenen Werten p , g und α gibt.

Tabelle 1

Zusammenhang zwischen k und den Arbeitsbereichen

k	Bereich	k	Bereich
1	FO	4	GO
2	FN	5	GN
3	FD		

Bestandteil der **procedure** *MpF* sind die Unterprogramme *int* und *reg*. Mit der **real procedure** *reg* erfolgt die numerische Ermittlung der Lösung der nicht explizit ausdrückbaren Gleichungen, insbesondere zur Berechnung der Leitauern β nach der Methode der regula falsi. Zur Berechnung der Mittelwerte der Ströme nach (1) und (2) erfolgt die Bildung der Integrale mittels der **procedure** *int*, welche gleichzeitig das Integral

$$ia : = \int_a^b f(x) dx \quad (85)$$

und das Integral

$$ie : = \int_a^b f^2(x) dx \quad (86)$$

nach SIMPSON ermittelt. Die Prozedur arbeitet mit einer festen Anzahl von Schritten (100) ohne Kontrolle der zu erwartenden Fehler. Selbstverständlich lassen sich für *reg* und *int* auch leistungsfähigere Unterprogramme einsetzen.

LITERATUR

1. Wasserrab Th.: *Schaltungslehre der Stromrichtertechnik*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag, 1962.
2. Schwarz J.: *Die Effektivwertwertigkeit des Laststromes von Einpulsstromrichtern*. Z. elektr. Inform. u. Energietechnik, Leipzig 6 (1976) 4, s. 331-342.

UKŁADY PRZEKSZTAŁNIKOWE O KOMUTACJI SIECIOWEJ Z DIODĄ ZEROWĄ W ZAKRESIE PRACY IMPULSOWEJ (PRZERYWANEJ)

Układy przekształtnikowe o komutacji sieciowej z diodą zerową, jak przekształtnik jednopulsowy z diodą zerową (M 1 F wg DIN 41761), półsterowany mostek jednofazowy (B 2 HF, B 2 HZ) i przekształtnik dwupulsowy z diodą zerową (M 2 F), pracują przy przewodzeniu impulsowym w różnych zakresach kątów sterowania. Obliczono granice faz pracy i podano podprogramy w ALGOLU 60 do obliczania układów. Przedstawiono graficznie diagramy czasu przewodzenia i charakterystyki prądowo-napięciowe, które obliczono numerycznie.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ С СЕТЕВОЙ КОММУТАЦИЕЙ И НУЛЕВЫМ ДИОДОМ В ДИАПАЗОНЕ ИМПУЛЬСНОЙ (ПЕРЕРЫВИСТОЙ) РАБОТЫ

Преобразовательные схемы с сетевой коммутацией и нулевым диодом как: одноимпульсный преобразователь с нулевым диодом (M1F по DIN41761), полупроводимый однофазный мостик (B 2HF, B 2HZ) и двухимпульсный преобразователь с нулевым диодом (M 2F) работают при проведении импульсов в различных диапазонах углов управления. Вычислены границы фаз работы и приведены расчетные подпрограммы схем на языке АЛГОЛ 60. Приведены диаграммы времени проведения и характеристики ток-напряжение вычисленные на Э.Ц.В.М.

PHASE-CONTROLLED RECTIFIER CIRCUITS WITH A FREE-WHEELING DIODE IN RANGE OF PULSE (INTERMITTENT) WORKING

Phase-controlled rectifier circuits with a free-wheeling diodes as a half-wave rectifier with a free-wheeling diode (M 1 F according to DIN 41716), a half controlled single phase bridge rectifier (B 2 HF, B 2 HZ) and a two-phase rectifier with a free-wheeling diode (M 2 F) operate by pulse conduction in different ranges of control angles. Boundaries of working phases have been calculated, and subprograms in ALGOL 60 for calculation of circuits are given. There are represented graphically diagrams of conduction time and current-voltage characteristics, which have been calculated numerically.