

**ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT
DES ZWÖLFPULSIGEN
BAHNUNTERWERKSGLEICHRICHTERS DER ČD**

Karel HLAVA

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

1. Einleitung

Dieses Referat analysiert folgende Kriterien der elektromagnetischen Verträglichkeit des zwölfpulsigen Bahnunterwerksgleichrichters in Abhängigkeit von der Belastung, angesichts des Speisenetzes:

- spektrale Bestandteile des Primärstromes,
- Leistungsfaktor der Grundwelle.

Vom Anfang der Elektrifizierung der Tschechischen Bahnen mit Gleichstromsystem 3 kV in 50. - Jahren verwendete man fast einheitlich zwölfpulsige Schema des Bahnunterwerksgleichrichters mit zwei Diodenbrücken. Nähere Beschreibung kann man in [1] finden. Gründe dazu kann man in zwei Eigenschaften dieser Lösung bewerten, und zwar:

- die Sekundärwicklungen des Gleichrichtertransformators sind zweimal pro Periode mit Belastungsstrom durchgeflossen, was die Ausnützung dieser Wicklungen erhöht,

- die Welligkeit der gleichgerichteten Spannung hat Spektralbestandteile 600 Hz, 1200 Hz, usw. und deswegen war es nicht notwendig Saugkreise für Glättung der Ausgangsspannung zu verwenden.

Vom heutigen Gesichtspunkt sind die obengenannte Vorteile des zwölfpulsigen Gleichrichterschaltung immer gültig, darüber kann man Heute folgende Eigenschaft als sehr wichtige abschätzen, und zwar:

- der niedrigste spektrale Bestandteil des Primärstromes liegt am 550 Hz (Ordnungszahl 11.), dann kommen die Bestandteile 650 Hz (13.), 1150 Hz (23.), 1250 Hz (25.), usw.

2. Die Stromüberlappung

Für folgende Analyse kann man eine Voraussetzung annehmen, und zwar, dass die gesamte Phasenstreureaktanz des Gleichrichtertransformators X_A sich nur auf seiner Sekundärseiten aufweist. Unter dieser Voraussetzung kommutieren beide sechspulsige Diodenbrücken unabhängig.

In der sechspulsigen Diodenbrückenschaltung sind immer mindestens zwei Dioden durch Belastungsstrom durchgeflossen, und zwar eine Diode der positiven Polaritätsgruppe und die andere der negativen Polaritätsgruppe.

Die Übernahme des Belastungsstromes von einer Diode zu der „nächsten“ Diode ist wegen der Phasenstreureaktanz augenblicklich nicht möglich. Es ist bekannt, dass man das Prozess dieser Stromübernahme durch einen zwischenphasigen Kurzschluss beschreiben kann. Unter Voraussetzung, dass der Belastungsstrom A genügend gut geglättet sei, kann man die Zeitverläufe der Diodenströme während der Stromüberlappung durch diese Ausdrücke beschreiben:

- für die „alte“ Diode

$$i_{D1}(\omega t) = A \cdot \cos(\omega t) \quad (1)$$

- für die „neue“ Diode

$$i_{D2}(\omega t) = A \cdot [1 - \cos(\omega t)] \quad (2)$$

wo

$$\cos(\gamma) = 1 - \frac{2 \cdot I_{DC} \cdot X_A}{U_2 \cdot \sqrt{6}} \quad (3)$$

Der Zeitraum für die Stromüberlappung kann man durch das Begriff „der Überlappungswinkel“ γ beschreiben, dessen Berechnungssausdruck aus der Voraussetzung des zwischenphasigen Kurzschlusses wie folgt hervorkommt:

$$\cos(\gamma) = 1 - \frac{2 \cdot I_{DC} \cdot X_A}{U_2 \cdot \sqrt{6}} \quad (4)$$

wo

I_{DC} der Belastungsstromwert einer
Diodenbrückenschaltung,
 X_A die Phasenstreureaktanz des
Gleichrichtertransformators,
 U_2 der Effektivwert der Phasenspeisespannung

ist.

3. Beeinflussung der spektralen Bestandteile des Primärstromes durch die Stromüberlappung

Der einfachste Ausdruck für Ermittlung der relativen spektralen Bestandteilen des Primärstromes ist

$$I_n \cong \frac{I_1}{n} \quad (5)$$

wo

I_n der relative Effektivwert der n-ten
Harmonischen des Primärstromes,
 I_1 der Effektivwert der Grundschiwingung,
 n der Ordnungszahl der Harmonischen

ist.

Die Gültigkeit dieses Ausdruckes ist durch zwei Voraussetzungen beschränkt, und zwar:

- der gleichgerichtete Strom muss voll geglättet werden,
- die Kurzschlussspannung des Gleichrichtertransformators muss vernachlässig klein sein.

Die erste Voraussetzung wird im praktischen Fahrbetrieb fast genug erfüllt. Der Halbleitergleichrichter des Bahnunterwerkes hat am Ausgang eine reihengeschaltete Luftdrosselspule, speist die Fahrleitung, die überwiegend induktiven Charakter aufweist, und auch die Triebfahrzeuge kann man durch Induktivität ersetzen.

Die zweite Voraussetzung ist dagegen nicht erfüllbar, weil ein faktischer Leistungstransformator immer eine nichtvernachlässigbare Kurzschlussspannung aufweist. Anders gesagt, diese Voraussetzung vernachlässigt die Phasenstreureaktanz der Sekundärwicklungen des Gleichrichtertransformators.

In diesem Fall aber gibt der Ausdruck (4) für den Überlappungswinkel einen Zahlenwert

$$\gamma = 0$$

was zum ideal senkrechtem Anstieg und Abfall des Phasenstromzeitverlaufes, der eine rechteckige Form hat, führt.

Die harmonische Analyse eines solchen Zeitverlaufes zeigt, dass die spektrale Bestandteile gerade mittels Formel (5) gegeben werden.

Für rein rechnerische Analyse ist es vorteilhaft den Zeitverlauf des während der Überlappungsperiode durch Ausdrücke (1) und (2) gegebenen Phasenstromes zu linearisieren und dann den ganzen Phasenstromzeitverlauf durch ein Trapez zu ersetzen.

Unter dieser Vereinfachung ist anstatt Ausdruck (5) zum Beispiel für einen zweipulsigen Einphasengleichrichter ein neuer Ausdruck gültig, und zwar

$$\left| \frac{I_n}{I_1} \right| = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{\sin(n \cdot \alpha)}{\sin \alpha} \quad (6)$$

wo

α relative Zeitspanne des Anstieges und Abfalles
des symmetrischen Trapezzeitverlaufes

ist.

Nachstehende Tabelle zeigt, wie die prozentige Primärstromwerte der spektralen Bestandteile mit wachsendem α für einen zweipulsigen Einphasengleichrichter gemäss (6) gegen den Werten gemäss (5) niedersinken:

A	Rechteck	Trapez ($\alpha = 10^\circ$)	Trapez ($\alpha = 20^\circ$)	Trapez ($\alpha = 30^\circ$)
3	33,3	32,0	28,1	22,2
5	20,0	17,6	11,5	4,0
7	14,3	11,0	3,8	2,0
9	11,1	7,1	0,0	2,5
11	9,1	4,5	1,6	0,8
13	7,7	2,6	1,7	0,6

4. Simulationsanalyse der spektralen Bestandteile des Primärstromes

Das Schema des zwölfpulsigen Bahnunterwerksgleichrichters der ČD ist unter obengenannten Voraussetzungen in zwei unabhängig kommutierende Teilschemen zerlegbar. Da die beide Sekundärwicklungen verschiedene Schaltungen aufweisen, muss man ihre Primärteilströme, die verschiedene Zeitverläufe haben, getrennt analysieren.

Karel Hlava:

Rein rechnerische Analyse der spektralen Bestandteile des völligen Primärstromes ist sehr langwierig, denn während einer Periode 20 ms insgesamt 10 Stromüberlappungen entstehen. Deswegen wurde eine Simulationsmetode gebraucht.

Das Berechnungsprogramm PSPice arbeitete mit folgenden Ausgangskenndaten:

- Amplitude der Phasenspannung 2050 V
- Belastungszweig mit reihengeschaltetem Widerstand 200 Ω
und Drosselspule 1,2 H
- Phaseninduktivitäten
von 0,5 mH
bis 24,4 mH

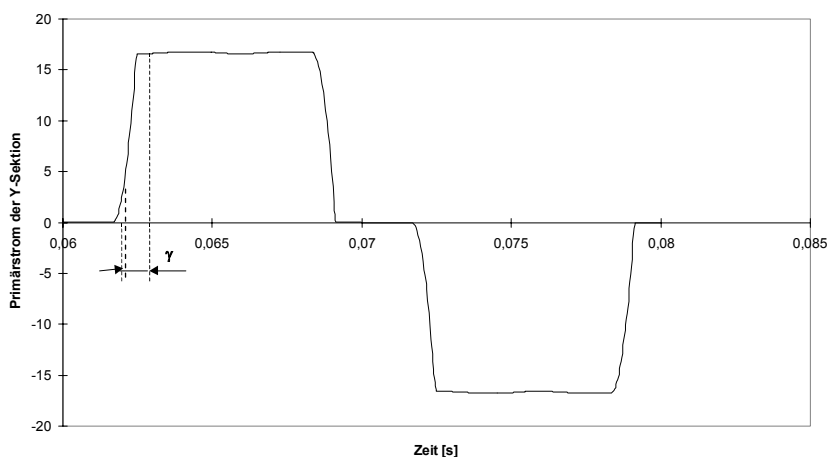


Fig. 1 Zeitverlauf des Primärstromes der Stern-Sektion des Gleichrichtertransformators

Beispielweise zeigt Fig. 1 den Zeitverlauf des Primärstromes für die Stern-Sektion des Bahnunterwerksgleichrichters, Fig. 2 zeigt dasselbe, aber für die Dreieck-Sektion. Der Zeitverlauf des gesamten Primärstromes des ganzen Gleichrichters wird durch die Summe dieser beiden Zeitverläufe gegeben und im

Fig. 3 dargestellt.

Das SW PSPice gibt gute Möglichkeit die Fourier-Analyse des Zeitverlaufes durchzuführen. Man interessierte sich hier für Harmonischen mit Ordnungszahlen

$$n = 5, 7, 11, 13, 23 \text{ und } 25$$

in Abhängigkeit von den Überlappungswinkelwerten γ . Diese Werten werden mittels Ausdruck (4) in Abhängigkeit von der Strombelastung I_{DC} in dem Sinne gegeben,

dass je grösser die Gleichrichterbelastung ist, desto grösser auch das γ ist. Die Werte von X_A und U_2 kann man als Konstante halten.

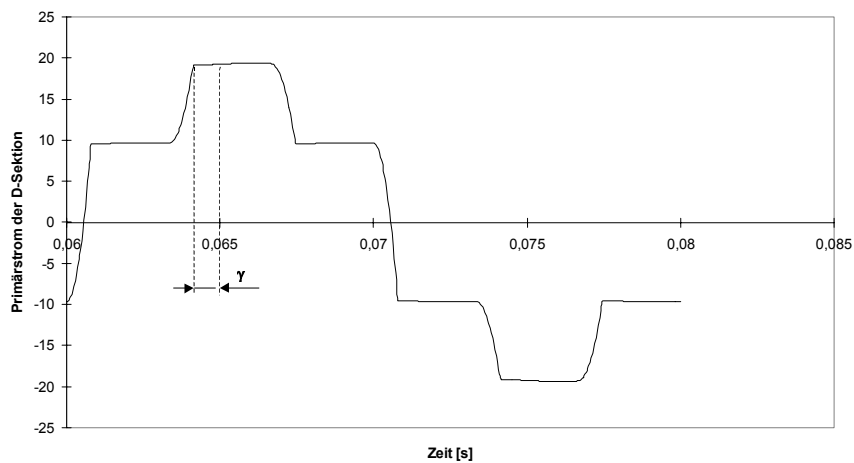


Fig. 2 Zeitverlauf des Primärstromes der Dreieck-Sektion des Gleichrichtertransformators

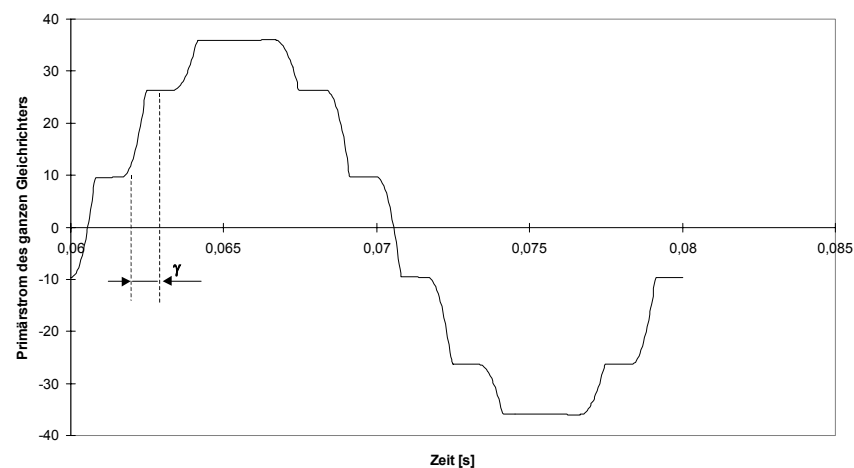


Fig. 3 Zeitverlauf des völligen Primärstromes des Gleichrichtertransformators

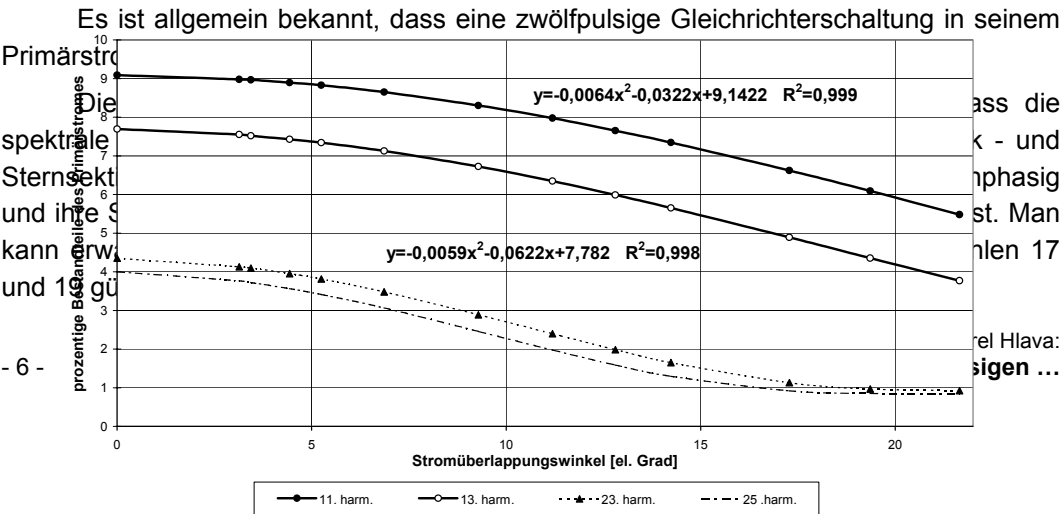


Fig. 4 Prozentige Werte der spektralen Bestandteile eines 12-pulsigen Gleichrichters für Ordnungszahlen 11, 13, 23 und 25 in Abhängigkeit auf den Stromüberlappungswinkel (allgemein gültig)

Die Abhängigkeit der prozentigen Werte der spektralen Bestandteile des Primärstromes mit Ordnungszahlen 11, 13, 23 und 25 auf dem Überlappungswinkel γ veranschaulicht die Fig. 4. Dazu kann man bemerken, dass die Werte aller vier dargestellten Strombestandteile für $\gamma = 0$ dem Ausdruck (5) gehören, das heisst für einen Gleichrichter ohne Stromüberlappung ($X_A \cong 0$) oder für einen unbelasteten Gleichrichter ($I_{DC} \cong 0$) gültig sind.

Sehr wichtig ist, dass die Zahlenwerte der einzelnen spektralen Bestandteile mit steigendem Überlappungswinkel γ , das heisst mit steigender Strombelastung des Gleichrichters, niedersinken. Für die 11. und 13. Harmonische steht auch ein analytischer Approximationsausdruck zur Verfügung.

5. Zahlenbeispiel

Um die relative Zahlenwerte der spektralen Bestandteile des Gleichrichterprimärstromes in absolute Amper-Werte auszudrücken, kann man folgende Kenndaten annehmen:

- der gesamte gleichgerichtete Strom sei

$$I_{DC,TOTAL} = 2 \cdot I_{DC} = 1500 \text{ ADC} \quad (7)$$

- zu diesem Stromwert gehört der Stromüberlappungswinkel

$$\gamma = 21,65 \text{ el. Grad} \quad (8)$$

- dem Ausdruck (4) zufolge gehört dazu ein Wert der Phaseninduktivität

$$L_A = 0,5315 \text{ mH} \quad (9)$$

In der nachfolgenden Analyse nehme man an, dass der Gleichrichter nur so belastet wird, dass der Überlappungswinkel nicht den Wert 21,65 el. Grad überschreiten wird. Für die graphische Darstellung ist es zweckmässig, die X-Achse mit Zahlwerten des gesamten gleichgerichteten Stromes zu bezeichnen, mittels des folgenden Ausdruckes

$$I_{DC,TOTAL} = \frac{2 \cdot [1 - \cos(\gamma)] \cdot U_2 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot L_A \cdot 2} \quad (10)$$

was mit Hilfe der gegebenen Kenndaten folgenden Ausdruck gibt

$$I_{DC,TOTAL} = 21257,2 \cdot [1 - \cos(\gamma)] \quad (11)$$

Die graphische Darstellung der Abhängigkeit der prozentigen spektralen Bestandteile des gesamten Primärstromes auf dem gleichgerichteten Strom gibt für 11., 13., 23. und 25. Harmonische Fig. 5.

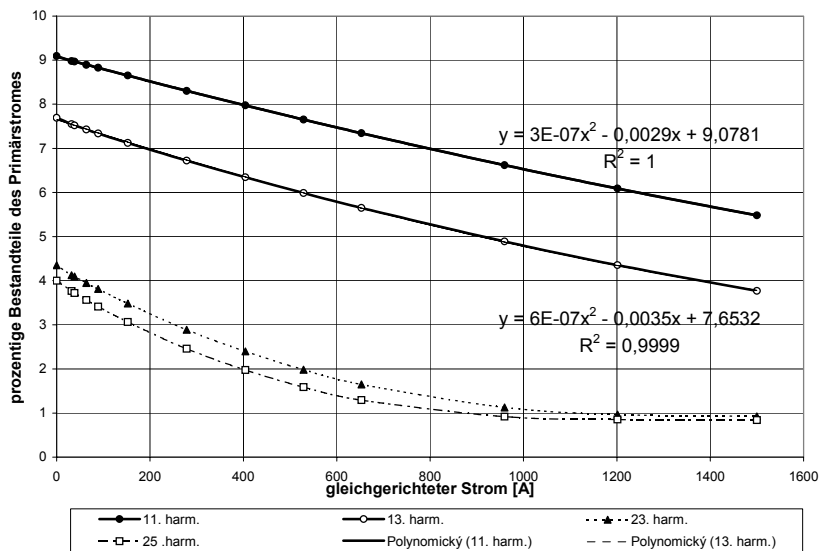


Fig. 5 Prozentige Werte der spektralen Bestandteile eines 12-pulsigen Gleichrichters für Ordnungszahlen 11, 13, 23 und 25 in Abhängigkeit auf dem Belastungsstrom (gültig für den Zahlenbeispiel)

Es ist zweckmässig noch Abhängigkeit der spektralen Bestandteile des Primärstromes in absoluten Amper-Werten auf dem gleichgerichteten Strom darzustellen. Zu diesem Zweck wurde der Zusammenhang zwischen der Primärstromgrundwelle und dem gleichgerichteten Strom mittels Simulation abgeleitet, und zwar:

$$I_1 \cong 1,05 \cdot I_{DC,TOTAL} \tag{12}$$

Diese Abhängigkeit wurde in die Approximationsausdrücke für 11. und 13. Harmonische laut Fig. 5 eingesetzt. Folgenderweise kann man Fig. 6 darstellen, was für die Auswertung der Messergebnisse dienen kann.

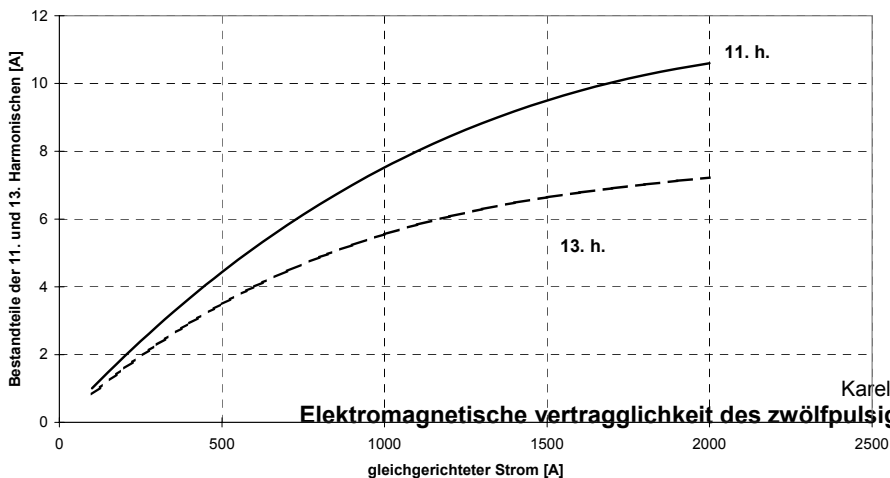


Fig. 6 Abhängigkeit der 11. und 13. Harmonischen des Primärstromes auf dem Belastungsstrom (gültig für den Zahlenbeispiel)

6. Zusammenhang zwischem dem Stromüberlappungswinkel und dem Argument des DPF (Leistungsfaktor der Grundwelle)

Es ist allgemein klar, dass ein Gleichrichter mit R-L Belastung immer das DPF mit induktiven Charakter aufweisen muss. In der Fachliteratur kann man folgende Beziehung finden

$$\varphi_1 \cong \left(\frac{1}{2} \div \frac{2}{3} \right) \cdot \gamma \quad (13)$$

Die Konstante 1/2 ist für den idealisierten linearen Stromzeitverlauf während der Überlappungsperiode gültig.

Dagegen die Konstante 2/3 soll dem realen Stromzeitverlauf im Sinne der Ausdrücke (1) und (2) entsprechen.

Um diese Abhängigkeit näher zu analysieren, kann man die Abhängigkeit eines Hilfsparameter

$$K = \frac{\varphi_1}{\gamma} \quad (14)$$

auf der Phaseninduktivität, die auch den Stromüberlappungswinkel festliegt, feststellen. Resultate dieser Analyse sind in Fig. 7 dargestellt. Aus dieser Darstellung ist es klar, dass der Hilfsparameter wirklich einen Zahlenwert

$$K \cong 0,67 \quad (15)$$

fast unabhängig vom Stromüberlappungswinkel ausweist.

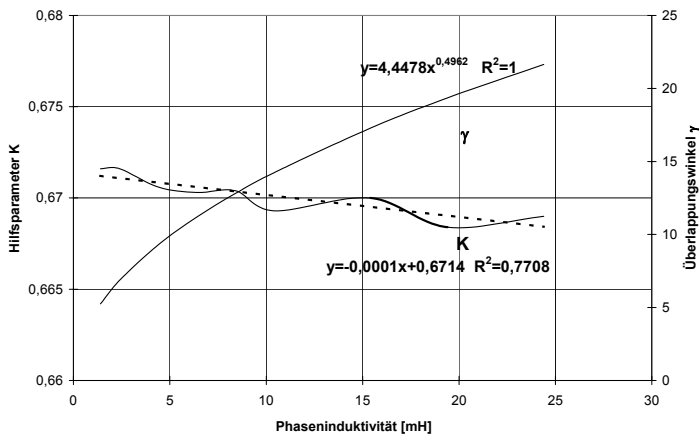


Fig. 7 Abhängigkeit des Hilfsparameters K und des Überlappungswinkels γ auf der Phaseninduktivität (gültig für den Zahlenbeispiel)

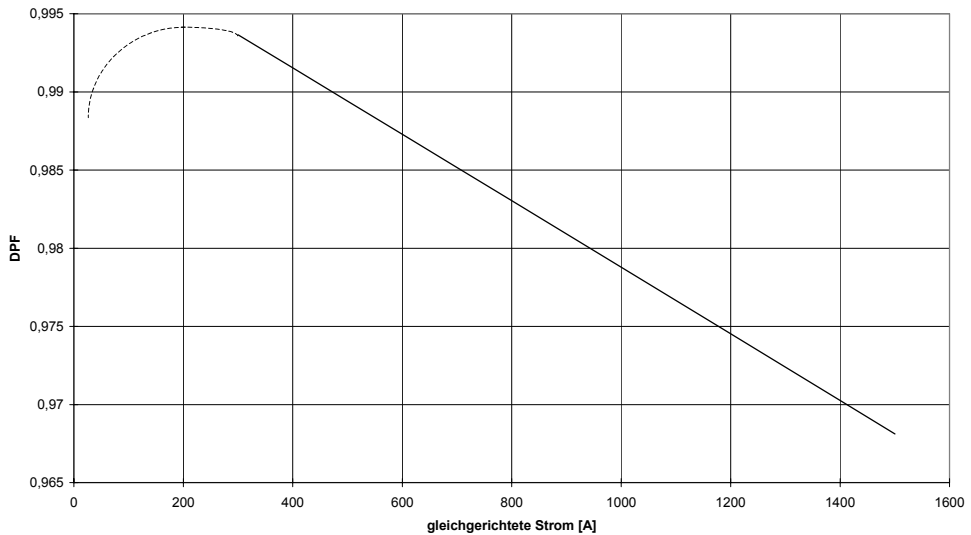


Fig. 8 Abhängigkeit des DPF (Leistungsfaktor der Grungwelle) auf dem Belastungsstrom (gültig für den Zahlenbeispiel)

Für die Kenndaten des Zahlenbeispieles kann man auch die Abhängigkeit des DPF auf der Strombelastung des Gleichrichters analysieren. Dazu braucht man Ausdrücke (11) und (15) und man kann für diese Abhängigkeit einen Endausdruck ableiten, und zwar

$$\cos\left(\frac{\varphi_1}{0,67}\right) \cong 1 - \frac{I_{DC,TOTAL}}{21257,2} \quad (16)$$

Graphische Darstellung kann man in Fig. 8 finden. Die DPF-Werte für kleine Belastungsströme kann man weglassen, weil in diesem Fall der in den Simulationssprogram nicht eingeschlossen Magnetisationsstrom des Gleichrichtertransformators eine erhöhte Rolle spielt und dessen Einfluss die DPF-Werte wesentlich vermindert.

7. Schlussfolgerungen

Die vorgelegte Analyse hat gezeigt, dass die Werte der spektralen Bestandteile des Primärstromes eines zwölfpulsigen Bahnunterwerksgleichrichters, die der Ausdruck (1) bietet, die möglich höchste sind.

Karel Hlava:

Diese Werte kann man nur in dem Fall erreichen, wenn man die Stromüberlappung völlig vernachlässigt. Das ist aber nur dann annehmbar, wenn man die Streureaktanz des Gleichrichtertransformators vernachlässigt, was aber bei einem realen Transformator nicht der Fall ist.

Unter Berücksichtigung der Stromüberlappung zeigen die Figuren, dass die relative Werte der spektralen Bestandteile des Primärstromes wesentlich kleiner sind und mit wachsender Gleichrichterbelastung immer sich vermindern.

Die Anwesenheit der 5. Harmonischen in dem Primärstrom des Gleichrichters ist dadurch erklärbar, dass diese Bestandteile, die in der Stern- und Dreiecksektion des Gleichrichters entstanden, gegenphasig fließen. Dasselbe ist auch für die 7. Harmonische gültig.

Lektoroval: Prof. Ing. Horák

Předloženo: 23.6.2003

Literaturverzeichniss

1. HLAVA K. *Stromabnahmeparameter beim Zwölfpuls-Traktionsgleichrichter in Abhängigkeit von seiner Belastung (tschechisch)*. Vědeckotechnický sborník Českých drah, s.121-139, 14, (2002). ISBN 0016-7096.
2. KAGANOV I. L. *Elektronnye i ionnye preobrazovateli, část. III*. Cepi pitaniya i upravlya ionnykh priborov, Gosenergoizdat, Moskva, (1956).
3. ČEŘOVSKÝ Z., GRIC R., PAVELKA J. *Výkonová elektronika I*. ČVUT Praha, (1996).

Resumé

ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA DVANÁCTIPULZNÍHO TRAKČNÍHO USMĚRŇOVAČE V MĚNÍRNÁCH ČD

Karel HLAVA

Studie analyzuje chování dvanáctipulzního usměrňovače zavedeného v trakčních napájecích stanicích ČD z hlediska parametrů odběru elektrické energie z napájecí sítě (účinník základní harmonické, deformace časového průběhu primárního proudu harmonickými). Rozbor je založen na počítačové simulaci ustálených elektrických poměrů, což umožnilo respektovat reálný časový průběh fázových proudů v období komutace, který se významně odlišuje od běžně používaného linearizovaného průběhu. Tato okolnost umožnila upřesnit např. výpočet procentních hodnot harmonických primárního proudu, které jsou, jak také ukazují provedená měření, menší než uvádí tzv. „amplitudový zákon“.

Summary

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF A TWELVE-PULSE TRACTION RECTIFIER IN THE ČD SUBSTATIONS

Karel HLAVA

The study analyses the behaviour of a twelve-pulse traction rectifier introduced to the Czech Railways traction substations in terms of the parameters of power consumption from the network (fundamental power factor, deformation of time curve of the primary current by harmonics). The analysis is based on a computer simulation of steady state electrical conditions, which enabled to respect the real time curve of phase currents in the period of commutation which significantly differs from the commonly used linearized curve. This condition enabled to specify, for example, the calculation of percentage values of the primary current harmonics which are, as the performed measurement show, less than the so-called „amplitude law“ says.

Resumé

ELEKTROMAGNETISCHE VERTRÄGLICHKEIT DES ZWÖLFPULSIGEN BAHNUNTERWERKSGLEICHRICHTERS DER ČD

Karel HLAVA

Die Studie analysiert das Verhalten des in den Bahnunterwerken der ČD verwendeten Zwölpuls-Traktionsgleichrichters hinsichtlich der Parameter bei der Stromabnahme aus dem Speisernetz (Leistungsfaktor der Grundwelle, Deformation des Zeitverlaufes des Primärstromes durch Harmonischen). Die Analyse basiert auf einer Computersimulation mit stabilisierten elektrischen Verhältnissen. Dadurch konnte der Echtzeitverlauf der Primärströme zum Zeitpunkt der Kommutation beachtet werden - dieser unterscheidet sich nämlich auf entscheidende Weise von dem üblicherweise verwendeten Linearverlauf. Dieser Umstand ermöglichte es z. B. die Berechnung der Prozentwerte der Primärströmenharmonischen zu präzisieren, die, wie die durchgeführten Messungen zeigen, kleiner sind als das sogenannte „Amplitudengesetz“ anführt.

Karel Hlava: