

Antriebssysteme mit stufenlosen Getrieben

Cz. Koziarski, Wrocław (Polen)

Inhalt. In dem Beitrag werden Systeme zum Antrieb von Maschinen behandelt, die durch Schalten — in Reihe oder parallel — von stufenlos verstellbaren Getrieben mit ebenfalls stufenlos verstellbaren Getrieben oder von stufenlos verstellbaren Getrieben mit Mehrgang- bzw. Getrieben konstanter Übersetzung entstehen. Der Autor leitet Abhängigkeiten her, welche die Synthese paralleler Systeme sowie die Berechnung ihres Wirkungsgrades und ihrer Belastbarkeit erlauben. Als Beispiel dient ein häufig verwendetes paralleles System. Weiterhin wird auf die Möglichkeit hingewiesen, die Widerstände im Umlaufgetriebe zum Vergrößern der Belastbarkeit eines Systems zu nutzen.

Anwendungen. Die Anpassung von Antriebssystemen an spezielle Anforderungen durch Kopplung mehrerer — insbesondere stufenloser — Getriebe dient zur Vergrößerung des Regelbereichs und zur Reduzierung von Verlusten. Die beispielhaften Durchrechnungen unterschiedlicher Schaltungen erleichtern dem Konstrukteur das Anwenden solcher Getriebesysteme.

1 Einführung

Der Energiefluß wird bei mechanischer Energie durch zwei Kenngrößen bestimmt, zum Beispiel sind dies das Drehmoment M und die Winkelgeschwindigkeit ω oder die wirkende Kraft F und die lineare Geschwindigkeit v . Zur Umwandlung dieses Flusses dienen Getriebe oder Rutschkupplungen. Der Bedarf an Energie kann bei Drehbewegungen mit der Abhängigkeit $M = f(\omega)$ ausgedrückt werden. Für einen Fluß mit konstanter Leistung gilt beispielsweise $M = P/\omega$, wobei P der Energieleistungsstrom ist. Bei konstantem Moment ist $M = M_0 = \text{konst.}$

Hat eine Kraftmaschine (oder andere Energiequelle) einen Geschwindigkeitsbereich, der vom geforderten verschieden ist, so läßt sich die Anpassung über Getriebe vornehmen, wenn die Kraftmaschine einen entsprechenden Bereich von ω_{\min} bis ω_{\max} hat und ein ausreichend großes Moment erzeugt. Dies bedeutet, daß das Feld der Momentänderung

$$S = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} M \, d\omega \quad (1)$$

ist. Mit der Zuschaltung eines Mehrganggetriebes und einer Anlaßkupplung läßt sich das Feld vergrößern, wenn sich herausstellt, daß es zu klein ist. Die Wahl des Übersetzungsverhältnisses ermöglicht es zudem, das Feld entsprechend den Anforderungen zu bilden (was bei Fahrzeugantrieben üblich ist).

Bei fehlender Regelbarkeit des Motors ($S \approx 0$) ist ein stufenlos verstellbares Getriebe zuzuschalten. Ähnlich wie Kraftmaschinen, zeichnen sich solche Getriebe durch ein

Nenn Drehmoment M_{zn} aus, das sich mit der Funktion der Übersetzung ändert (bei bestimmter Eintrittsgeschwindigkeit). Diese Abhängigkeit läßt sich mit

$$F = \int_{i_{c, \min}}^{i_{c, \max}} M_{zn} \, di_c \quad (2)$$

darstellen, wobei

$$i_c = \omega_2/\omega_1 \quad (3)$$

die kinematische Übersetzung des stufenlos verstellbaren Getriebes ist (im weiteren Übersetzung genannt) und ω_1 und ω_2 die Winkelgeschwindigkeiten der Antriebs- bzw. der Abtriebswelle sind. Die Übersetzung hat ein positives Vorzeichen, wenn sich die Drehrichtung nicht ändert.

Ähnlich wie das Feld S der Kraftmaschine läßt sich das Feld F des stufenlos verstellbaren Getriebes gestalten. Dies geschieht durch die Verbindung eines nachgeschalteten Getriebes mit konstanter Übersetzung mit dem stufenlos verstellbaren Getriebe, das durch einen entsprechend großen Wert

$$K = i_{c, \max}/i_{c, \min} \quad (4)$$

gekennzeichnet ist, der als Regelbereich der Übersetzungen bezeichnet wird und entsprechende Werte $M_{zn}i_{c, \max}$ als Funktion von i_c aufweist, die reduziertes Nenn Drehmoment genannt werden.

Manchmal ist es bequemer, anstelle des Kennwerts K den Kennwert des relativen Regelbereichs der Übersetzung p zu benutzen, der zum ersten Mal in [1] eingeführt wurde.

$$p = \frac{i_{c, \max} - i_{c, \min}}{i_{c, \max}} = 1 - \frac{i_{c, \min}}{i_{c, \max}}, \quad (5)$$

wobei

$$|i_{c, \max}| \geq |i_{c, \min}|,$$

was weiter zu $0 \leq p \leq 2$ führt.

Stufenlos verstellbare Umschlingungs- und Reibradgetriebe sind gekennzeichnet durch $p < 1$, hydrokinetische Getriebe haben $p = 1$, und hydrostatische Getriebe können $p = 2$ erreichen.

Wenn der Übersetzungsbereich der stufenlos verstellbaren Getriebe zu klein ist, vergrößert man ihn durch den Einbau in ein Antriebssystem mit ein- oder mehrstufigen Getrieben. Die Getriebesysteme können Reihenschaltungen, Parallelschaltungen oder auch Reihenparallelschaltungen enthalten.

2 Antriebssysteme mit Reihenschaltungen

Die konstruktiv einfachsten Reihenschaltungen sind die meist verbreiteten. Sie ermöglichen eine Erweiterung des Verstellbereichs bis zu dem Wert

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \dots \quad (6)$$

was dem Kennwert

$$p = 1 - \frac{1}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \dots} \quad (7)$$

entspricht ($K_1, K_2, K_3 \dots$ Verstellbereiche der einzelnen Getriebe). Die Abhängigkeiten gelten für Antriebssysteme, die kein Getriebe mit dem Regelungsbereich $p_c \geq 1$ haben und bei denen immer $p < 1$ ist. Hat dagegen eines der stufenlos verstellbaren Getriebe schon einen Bereich $p_c \geq 1$, so trägt der relative Regelbereich des Antriebssystems

$$p = p_c \geq 1 \quad (8)$$

Aus diesem Grund werden in solchen Fällen keine Antriebssysteme mit Reihenschaltungen aus stufenlos verstellbaren Getrieben gebaut, vielmehr schaltet man ein Getriebe mit konstanter Übersetzung, ein Mehrganggetriebe oder ein Wendegetriebe zu. Die Mehrganggetriebe erlauben auch ein Erweitern des Regelbereichs des Getriebes, wenn $p_c < 1$ ist.

Unter der Annahme, daß die Übersetzung zwischen den einzelnen Gängen in solch einem Getriebe nicht größer als der Regelbereich des stufenlos verstellbaren Getriebes ist, wird für dieses Antriebssystem

$$K \leq K_c^n \quad (9)$$

oder

$$p \leq 1 - K_c^{-n} \quad (10)$$

(n Zahl der Gänge). Die Mehrganggetriebe dienen auch zum Erweitern des Bereichs der dynamischen Übersetzungen.

Beim Antrieb mit Reihenschaltungen, d. h., wenn die Leistung $p \geq 0$, gilt

$$i_d = \frac{M_2}{M_1} = \frac{\eta_w i_{dc}}{i_{w, \max}} \dots \frac{\eta_w i_{dc}}{i_{w, \min}} \quad (11)$$

beim Bremsen, wenn $p \leq 0$, ist

$$i_{dh} = \frac{i_{dch}}{\eta_{wh} i_{w, \max}} \dots \frac{i_{dch}}{\eta_{wh} i_{w, \min}} \quad (12)$$

(i_{dc}, i_{dch} dynamische Übersetzung des stufenlos verstellbaren Getriebes während des Antriebs bzw. Abtriebs, i_{dh} dynamische Übersetzung beim Bremsen, η_w, η_{wh} Wirkungsgrad der indirekten Übersetzung beim Antrieb bzw. Bremsen, i_w indirekte Übersetzung).

Bild 1 zeigt schematisch ein Antriebssystem, das ein Erweitern der dynamischen Übersetzungen eines hydrodynamischen Getriebes ermöglicht. Die Charakteristik dieses Systems gibt Bild 2 wieder. Daraus ist zu ersehen, daß die Anwendung eines Antriebssystems mit Reihenschaltung auch den mittleren Wirkungsgrad des stufenlos verstellbaren Getriebes erhöht.

3 Parallelgeschaltete Antriebssysteme

Parallelgeschaltete Antriebssysteme erhält man durch paralleles Schalten von Getrieben mit konstanten oder veränderlichen Übersetzungen mit Hilfe von Umlaufgetrieben. Eines

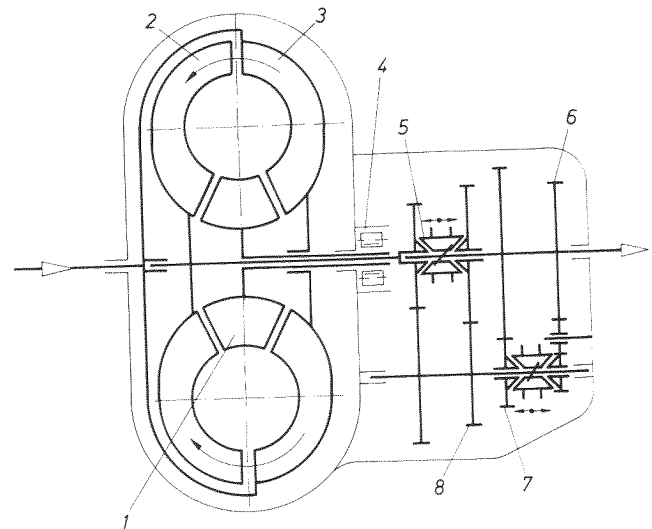


Bild 1. Schema eines hydrokinetischen Getriebes, in Reihe geschaltet mit einem stufenlos verstellbaren Getriebe. 1 Leitring, 2 Turbine, 3 Pumpe, 4 Freilauf, 5 dritter Gang (indirekt), 6 Rückwärtsgang, 7 erster Gang, 8 zweiter Gang

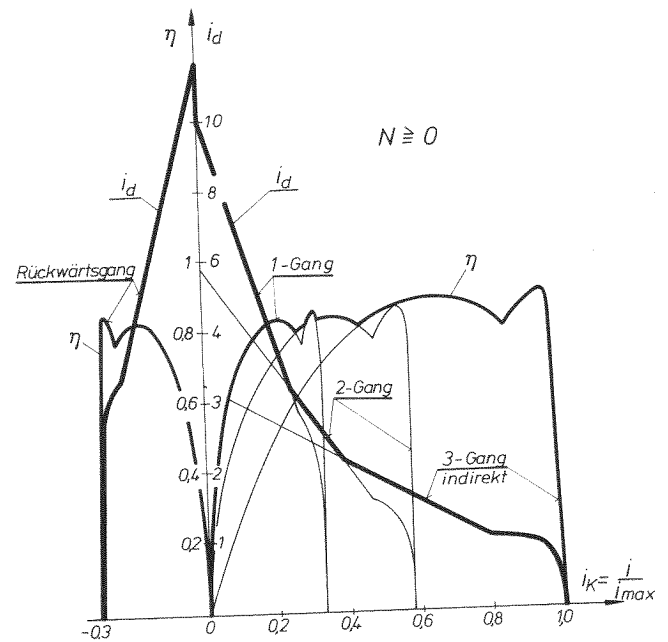


Bild 2. Charakteristik des auf Bild 1 dargestellten in Reihe geschalteten Systems; $\eta_w = 0,95$

der meist angewandten Systeme ist die parallele Schaltung eines stufenlos verstellbaren Getriebes mit einem Getriebe konstanter Übersetzung über ein 3-Wellen-Umlaufgetriebe (Bilder 3 und 4).

Mit einem Umlaufgetriebe kann man parallele Systeme mit einer beliebigen Anzahl von Getrieben bilden. Die Übersetzung eines solchen Systems ist

$$i_k = i_1 i_{c1} + i_2 i_{c2} + i_3 i_{c3} + \dots \quad (13)$$

$i_1, i_2, i_3 \dots$ sind die Übersetzungen, die dem Verhältnis der Geschwindigkeit zwischen der Ausgangswelle des Umlaufgetriebes und der Welle des stufenlos verstellbaren Getriebes gleich sind, wenn die anderen Getriebe stillgesetzt sind.

Umlaufgetriebe mit mehr als drei Wellen entstehen durch Aneinanderschalten von 3-Wellen-Getrieben. Wie in [1] ge-

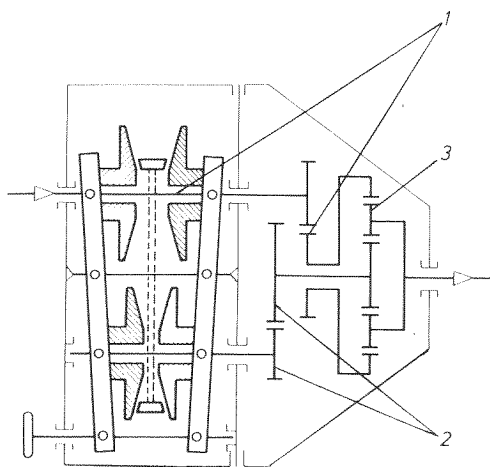
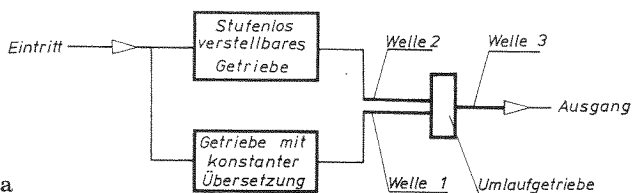
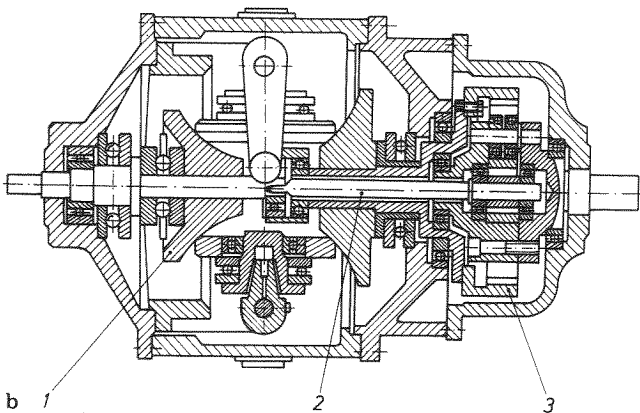


Bild 3. Schema eines parallelgeschalteten Systems (näher beschrieben in [3]). 1 stufenlos verstellbare Getriebe mit Kettenübertragung, 2 Getriebe mit konstanter Übersetzung, 3 Umlaufgetriebe



a



b

Bild 4a und b. In Reihe geschaltetes System. a Allgemeines Schema; b System vom Typ Arter-Bauart SRD; 1 stufenlos verstellbares Arter-Getriebe (Hersteller: Arter u. Co., Männedorf (Schweiz)), 2 verlängerte Eingangswelle des stufenlos verstellbaren Getriebes als Getriebe mit konstanter Übersetzung $i_s = 1$, 3 Umlaufgetriebe

zeigt wurde, ist für Umlaufgetriebe mit einer beliebigen Anzahl von Wellen

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots = 1. \tag{14}$$

Mehrere Getriebe mit konstanten und veränderlichen Übersetzungen kann man durch zwei Getriebe ersetzen, wobei mindestens eines von ihnen eine veränderliche Übersetzung haben muß. So ein System — Schaltung eines stufenlos verstellbaren Getriebes mit einem Umlaufgetriebe — wurde unter anderem in [1, 3–5] analysiert. Die Synthese dieser Systeme wurde in [1, 3] dargestellt. In diesen Arbeiten wurden die Abhängigkeiten für den Wert der Basisübersetzung des Umlaufgetriebes abgeleitet [1, 4]:

$$i_0 = -i_1/i_2 \tag{15}$$

und für die Übersetzung des Systems

$$i = i_1 i_s + i_2 i_c = \frac{i_c - i_0 i_s}{1 - i_0} \tag{16}$$

(i_s Übersetzung des Getriebes mit konstanter Übersetzung, i_c Übersetzung des stufenlos verstellbaren Getriebes).

Im ersten Fall, wenn die Übersetzung $i = i_{\max}$ bei $i_c = i_{c, \max}$ ist, gilt

$$i_0 = \frac{i_{c, \max}}{i_s} \left(1 - \frac{p_c}{p} \right); \tag{17}$$

im zweiten Fall, wenn $i = i_{\max}$ bei $i_c = i_{c, \min}$ ist, gilt

$$i_0 = \frac{i_{c, \max}}{i_s} \left(1 - p_c + \frac{p_c}{p} \right) \tag{18}$$

(p relativer Bereich der geforderten Übersetzung des Systems, p_c relativer Übersetzungsbereich des stufenlos verstellbaren Getriebes).

Aus der Analyse gehen folgende Abhängigkeiten hervor:

— für die Übersetzung des Systems

$$i = \frac{i_c - i_0 i_s}{1 - i_0}, \tag{19}$$

— für das reduzierte Nennmoment

$$M_{zn} i_{\max} = M_{znc} i_{c, \max} \frac{p_c}{p}. \tag{20}$$

Die Bilder 6 und 7 stellen die aufgrund des in Bild 5 dargestellten Diagramms berechneten Durchläufe dar. Diese Abhängigkeit, die nicht den Energieverlust im Getriebe berücksicht-

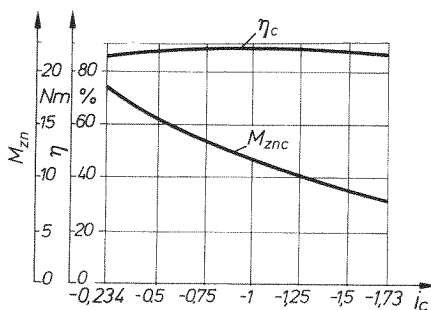


Bild 5. Nennmomentendiagramm des Arter-Getriebes

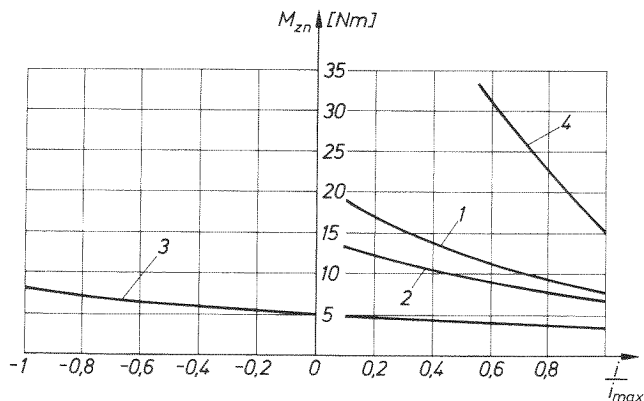


Bild 6. Werte der reduzierten Nennmomente und der maximalen Übersetzungen parallelgeschalteter Systeme wie auf Bild 4; Fall I bei verschiedenen p_c/p : 1 $p_c/p = 1$, 2 $p_c/p = 0,865$; 3 $p_c/p = 0,432$; 4 $p_c/p = 2$

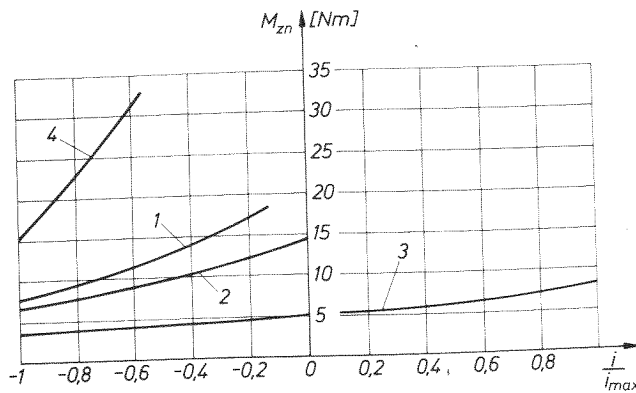


Bild 7. Werte der reduzierten Nennmomente und der maximalen Übersetzungen parallelgeschalteter Systeme wie auf Bild 4; Fall II bei verschiedenen p_c/p : 1 $p_c/p = 1$, 2 $p_c/p = 0,865$, 3 $p_c/p = 0,432$, 4 $p_c/p = 2$

sichtigt, zeigt, daß die Erweiterung des Übersetzungsbereichs auf Kosten der Belastbarkeit des Systems geht, also $F = \text{konst.}$ Wenn man in einem solchen System das Getriebe mit konstanter Übersetzung i_s durch ein Getriebe mit veränderlicher Übersetzung i_{c1} ersetzt, so erhält man ein paralleles System aus zwei stufenlos verstellbaren Getrieben.

3.1 Parallele Schaltung von zwei stufenlos verstellbaren Getrieben

Man kann drei Arten solcher Systeme unterscheiden:

- A: $i = i_{\max}$ bei $i_{c1} = i_{c1, \max}$ und $i_{c2} = i_{c2, \max}$,
 B: $i = i_{\max}$ bei $i_{c1} = i_{c1, \max}$ und $i_{c2} = i_{c2, \min}$,
 C: $i = i_{\max}$ bei $i_{c1} = i_{c1, \min}$ und $i_{c2} = i_{c2, \max}$.

Die Fälle B und C sind einander gleichwertig, und deswegen wird die weitere Diskussion hier auf die Fälle A und B beschränkt. Setzt man die Grenzwerte der Übersetzungen nach Gl. (16) in Gl. (5) — die Abhängigkeit für den relativen Übersetzungswert — ein, so erhält man für den Fall A

$$p = \frac{p_{c2} i_{c2, \max} - p_{c1} i_0 i_{c2, \max}}{i_{c2, \max} - i_0 i_{c1, \max}} \quad (21)$$

Wenn $p_{c1} = p_{c2}$, dann ist $p = p_{c1} = p_{c2}$ unabhängig von $i_{c1, \max}$, $i_{c2, \max}$ und i_0 , also von Werten, welche die Verteilung der Energie an die Getriebe bestimmen.

Für den Fall B ist

$$p = \frac{p_{c1} i_0 i_{c1, \max} - p_{c2} i_{c2, \max}}{(1 - p_{c2}) i_{c2, \max} - i_0 i_{c1, \max}} \quad (22)$$

Aus diesen Abhängigkeiten kann man i_0 für die gegebenen Parameter der stufenlos verstellbaren Getriebe und für die geforderten Übersetzungsbereiche des Systems bestimmen. Wenn man weiter die ausgerechneten Werte in Gl. (16) substituiert, so erhält man die Übersetzungen des Systems. Multipliziert man die maximalen Werte dieser Übersetzungen mit dem Wert des Nennmoments des Getriebes und dividiert entsprechend durch die Übersetzungen i_1 oder i_2 , so erhält man als Ergebnis für den Fall A

$$M_{zn} i_{\max} = \min \left(M_{znc1} \frac{i_{c1, \max} (p_{c1} - p_{c2})}{p - p_{c2}}, M_{znc2} \frac{i_{c2, \max} (p_{c1} - p_{c2})}{p_{c1} - p} \right); \quad (23)$$

für den Fall B

$$M_{zn} i_{\max} = \min \left(M_{znc1} \frac{i_{c1, \max} [1 - p(p_{c1} - 1)]}{p_{c2} - p}, M_{znc2} \frac{i_{c2, \max} [p_{c2} (p_{c1} - 1) - p_{c1}]}{p(p_{c1} - 1) - p_{c1}} \right) \quad (24)$$

(M_{zn} Nennmoment des Systems, M_{znc1} , M_{znc2} Nennmoment des stufenlos verstellbaren Getriebes 1 bzw. 2).

Analysiert man diese Ungleichungen, so ist festzustellen, daß das Nennmoment von zwei parallelgeschalteten stufenlos verstellbaren Getrieben höchstens dem Nennmoment eines Systems gleich ist, welches zusammengesetzt ist aus einem stufenlos verstellbaren Getriebe und einem Getriebe konstanter Übersetzung (bei $M_{znc1} = M_{znc2} = M_{znc}/2$ und $p_{c1} = p_{c2} = p_c$ oder bei gleichwertigen Werten).

Außerdem finden solche Systeme im Hinblick auf die Kosten von zwei stufenlos verstellbaren Getrieben nicht allgemein Anwendung. Aus diesem Grund wird der Einfluß des Energieverlusts im Umlaufgetriebe auf die Parameter des Systems, unter Anwendung der Bezeichnungen für ein parallelgeschaltetes System mit einem Getriebe konstanter Übersetzung, besprochen.

3.2 Einfluß des Energieverlusts im Umlaufgetriebe auf die Belastbarkeit des Systems

Bei der Annahme, daß die Winkelgeschwindigkeit des ganzen Umlaufgetriebes eine entgegengesetzte Richtung zur Geschwindigkeit des Gliedes 1 hat und die Werte der übertragenen Momente nicht ändert, sich also auch der Wert der verlorenen Energie nicht ändert, kann man die Verluste aus der relativen Bewegung des Gliedes 2 und des Ausgangsgliedes 3 bestimmen. So gilt

$$M_c (\omega_c - \omega_s) + M_s (\omega_s - \omega_s) = M (\omega - \omega_s) + P_{tr} \quad (25)$$

(M_c und ω_c Moment und Winkelgeschwindigkeit der Welle 1, M_s und ω_s Moment und Winkelgeschwindigkeit der Welle 2, P_{tr} Leistungsverlust im Umlaufgetriebe, M und ω Moment und Winkelgeschwindigkeit der Ausgangswelle 3).

Die relative Leistung auf der Welle des Gliedes 2 beträgt

$$P'_0 = M_c (\omega_c - \omega_s) = M_c \omega_1 (i_c - i_s). \quad (26)$$

Die relative Leistung auf der Welle des Gliedes 3 beträgt

$$P' = M (\omega - \omega_s) = M \omega_1 (i - i_s) = P \frac{i - i_s}{i}. \quad (27)$$

Daraus geht hervor, daß der Leistungsverlust

$$P_{tr} = P'_0 - P' \text{ beträgt.} \quad (28)$$

Voraussetzend, daß das ganze Umlaufgetriebe die Winkelgeschwindigkeit ω_s hat und daß $P'_0 \geq 0$ ist, kann man das Moment auf Welle 2 aus der Abhängigkeit

$$M_c = \frac{M i_2}{\eta_2} = \frac{M}{(1 - i_0) \eta_2} \quad (29)$$

berechnen.

Im untersuchten Fall entspricht das dem Moment auf der Ausgangswelle des Getriebes, wo η_2 der Wirkungsgrad des Umlaufgetriebes beim Durchfluß der Energie vom Glied 2 zu Glied 3 ist. Die relative Leistung auf Welle 2 beträgt also

$$P'_0 = \frac{P}{\eta_2} \cdot \frac{i_c - i_s}{i_c - i_s i_0}. \quad (30)$$

Den Leistungsverlust kann man aus folgender Abhängigkeit bestimmen:

$$P_{tr} = P \left(1 - \frac{i_s}{i}\right) \left(\frac{1}{\eta_2} - 1\right). \quad (31)$$

Für den Fall, daß $P'_0 \leq 0$ ist, wird das Moment auf Welle 2 durch

$$M_c = M_{i_c} \eta_{2h} = \frac{M \eta_{2h}}{1 - i_0} \quad (32)$$

beschrieben (η_{2h} Wirkungsgrad des Umlaufgetriebes beim Durchfluß der Energie von Welle 3 zu Welle 2).

Die relative Leistung auf Welle 2 beträgt dann

$$P'_{0h} = P \eta_{2h} \left(1 - \frac{i_c}{i}\right). \quad (33)$$

Die Leistung der verlorenen Energie wird mit

$$P_{tr,h} = P \left(1 - \frac{i_c}{i}\right) (\eta_{2h} - 1) \quad (34)$$

bestimmt.

Die Leistung der durch das stufenlos verstellbare Getriebe nach den Gln. (29) und (32) fließenden Energie beträgt bei $P'_0 \geq 0$

$$P_c = M_c \omega_c = \frac{M_c \omega i_c}{i} = \frac{P i_2 i_c}{i \eta_2} = \frac{P i_0}{(i_c - i_0 i_s) \eta_2}, \quad (35)$$

bei $P'_0 \leq 0$

$$P_c = \frac{P i_2 i_c \eta_{2h}}{i} = \frac{P i_0 \eta_{2h}}{i_c - i_0 i_s}. \quad (36)$$

Das Verhältnis des Leistungswertes der durch das Getriebe fließenden Energie zur Leistung des Systems nach Berücksichtigung der Verluste im Umlaufgetriebe, wenn $P'_0 \geq 0$ ist, beträgt nach Gl. (35)

$$v_c^h = \frac{P_c}{P} = \frac{i_c}{(i_c - i_0 i_s) \eta_2}, \quad (37)$$

dagegen

$$v_s^h = 1 - v_c^h + \frac{P_{tr}}{P}. \quad (38)$$

Wenn $P'_0 \leq 0$ ist, dann gilt in Übereinstimmung mit Gl. (36)

$$v_c^h = \frac{P_c}{P} = \frac{i_c \eta_{2h}}{i_c - i_0 i_s} \quad (39)$$

und

$$v_s^h = 1 - v_c^h + \frac{P_{tr,h}}{P}. \quad (40)$$

3.3 Größe des Energieverlusts

Der summarische Leistungsverlust im System ist

$$P_t = P_{tc} + P_{ts} + P_{t0} \quad (41)$$

(P_{tc} Leistungsverlust im stufenlos verstellbaren Getriebe, P_{ts} Leistungsverlust im Getriebe mit konstanter Übersetzung, P_{t0} Leistungsverlust im Umlaufgetriebe).

Wenn $P'_0 \geq 0$ ist, können vier Fälle für die Durchflußrichtung der Energie auftreten, die durch das Vorzeichen bei den Leistungswerten P und P_s bezeichnet werden.

Wenn $P'_0 \leq 0$ ist, treten auch vier Fälle für die Durchflußrichtung der Energie auf. In Einzelfällen beträgt der Leistungsverlust:

$$\begin{aligned} \text{für } P'_0 \geq 0 \text{ ist } P_{t0} &= P_{tr}, \\ P'_0 \leq 0 & P_{t0} = P_{tr,h}, \\ P_c \geq 0 & P_{tc} = P v_c^h \left(\frac{1}{\eta_c} - 1\right), \\ P_c \leq 0 & P_{tc} = P_{tch} = P v_c^h (\eta_c - 1), \\ P_s \geq 0 & P_{ts} = P v_s^h \left(\frac{1}{\eta_s} - 1\right), \\ P_s \leq 0 & P_{ts} = P v_s^h (\eta_{sh} - 1). \end{aligned} \quad (42)$$

Substituiert man die Abhängigkeiten in Gl. (41), so erhält man acht Gleichungen für P_t bei verschiedenen Durchflußrichtungen der Energie in den einzelnen Getrieben des Systems [3].

In Abhängigkeit von der Durchflußrichtung der Energie auf Welle 3 wird der Wirkungsgrad des Systems:

$$\text{bei } P \geq 0 \text{ ist } \eta = \frac{P}{P + P_t}, \quad (43)$$

$$P \leq 0 \quad \eta_h = \frac{P - P_t}{P}. \quad (44)$$

Die Überlegungen und abgeleiteten Abhängigkeiten für den Leistungsverlust sind auch gültig für Systeme aus zwei parallelschalteten stufenlos verstellbaren Getrieben.

4 Rechnungsbeispiel und Schlußfolgerungen

Um einer Lösung der beschriebenen Probleme näherzukommen, wurden beispielhaft Berechnungen der Elemente und Parameter eines Systems durchgeführt, das aus einem stufenlos verstellbaren Getriebe und einem Umlaufgetriebe besteht (Bild 4). Die Übersetzung läßt sich im Bereich von $-0,234$ bis $-1,73$ ändern, d. h., der relative Übersetzungsbereich beträgt $p_c = 0,865$. Das Nennmoment des stufenlos verstellbaren Getriebes als Funktion der Übersetzung und den entsprechenden Verlauf des Wirkungsgrades zeigt Bild 5.

Gefordert wurde ein Übersetzungsbereich des Systems von $p = 1,5$; die Lösung dieser Aufgabe wird nach dem zweiten Fall vorgenommen. Der Wirkungsgrad η_2 des stufenlos verstellbaren Getriebes steigt sich von 1,0 über 0,9; 0,7 bis 0,5. Ähnlich ist $\eta_{2h} = 1,0$; 0,9; 0,7 bis 0,5. Angenommen wurde auch, daß die Übersetzung des Getriebes mit konstanter Übersetzung $i_s = -0,5$ ist und daß der Leistungsverlust auf diesem Wege vernachlässigbar klein ist.

Bei diesen Voraussetzungen wurde aus Gl. (18) der Wert der Basisübersetzung des Umlaufgetriebes berechnet zu $i_0 = 2,46$; dagegen betragen die Grenzübersetzungen

$$i_{\min} = +0,308 \quad \text{und} \quad i_{\max} = -0,616.$$

Für den Fall, daß $P > 0$ ist, gilt nach den Gln. (30) und (33):

$$\begin{aligned} \text{für } i < 0 \text{ ist } P'_0 &> 0, \\ i_s < i < 0 & P'_0 = P'_{0h} < 0; \end{aligned}$$

bei $i \leq i_s$ ist $P_0 \geq 0$, was der Bedingung entspricht, daß:

$$\text{bei } \frac{i}{i_{\max}} < 0 \quad \text{ist } P'_0 > 0,$$

$$\frac{i}{i_{\max}} > \frac{i_s}{i_{\max}} \quad P'_0 > 0.$$

Weiter geht aus Gl. (35) hervor, daß:

bei $\frac{i}{i_{max}} < 0$ ist $P'_0 > 0$ und $P_s < 0$;

dagegen

bei $0 \leq \frac{i}{i_{max}} \leq \frac{i_s}{i_{max}}$ $P'_0 < 0$ und $P_s > 0$.

Aus diesen Feststellungen ist zu ersehen, daß bei $P > 0$ für einzelne Übersetzungsbereiche folgende Abhängigkeiten zu nutzen sind:

— Bei der Berechnung des Nennmoments dividiert durch die maximale Übersetzung gilt:

$i/i_{max} < 0$ ergibt

$$M_{zn}i_{max} = M_{znc}i_{max}\eta_2$$

Wenn $0 \leq \frac{i}{i_{max}} \leq \frac{i_s}{i_{max}}$, dann ist

$$M_{zn}i_{max} = M_{znc}i_{max}/\eta_{2h}$$

und wenn $\frac{i}{i_{max}} \geq \frac{i_s}{i_{max}}$, dann ist

$$M_{zn}i_{max} = M_{znc}i_{max}\eta_2$$

($M_{znc} = M_{zn}$ aus Gl. (20)).

— Bei der Berechnung des Wirkungsgrades des Systems gilt nach Gl. (43) $\eta = \frac{P}{P + P_s}$.

Für $\frac{i}{i_{max}} < 0$ ist

$$P_t = P \left[v_c^h \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right) + v_s^h (\eta_{sh} - 1) + \left(1 - \frac{i_s}{i} \right) \left(\frac{1}{\eta_2} - 1 \right) \right],$$

$0 \leq \frac{i}{i_{max}} \leq \frac{i_s}{i_{max}}$

$$P_t = P \left[v_c^h (\eta_{ch} - 1) + v_s^h \left(\frac{1}{\eta_s} - 1 \right) + \left(1 - \frac{i_s}{i} \right) \left(\frac{1}{\eta_2} - 1 \right) \right],$$

$\frac{i}{i_{max}} \geq \frac{i_s}{i_{max}}$

$$P_t = P \left[v_c^h (\eta_{ch} - 1) + v_s^h \left(\frac{1}{\eta_s} - 1 \right) + \left(1 - \frac{i_s}{i} \right) \left(\frac{1}{\eta_2} - 1 \right) \right].$$

Die Bilder 8 und 9 zeigen die Berechnungsergebnisse. Demnach besteht bei

$$0 \leq \frac{i}{i_{max}} \leq \frac{i_s}{i_{max}}$$

die Möglichkeit, Leistungsverluste des Umlaufgetriebes zur Vergrößerung des Nennmoments des Systems zu nutzen und damit die Fähigkeit des Systems zum Übertragen der Energie zu erhöhen. Das geschieht, was leicht zu bemerken ist, auf Kosten des Wirkungsgrades des Systems — jedoch nur bis zu dem Wert, den die Anlaufkupplung hat. Diesen Wert als Funktion der Übertragung des Systems bestimmt die Gerade, die dem Ursprung des Koordinatensystems entspringt [2].

Das besprochene System hat gegenüber der Anlaufkupplung Vorteile, da man seine Übersetzungen unabhängig von der Belastung des Systems steuern kann.

Abschließend sei noch darauf aufmerksam gemacht, daß die parallelgeschalteten Systeme im Grunde genommen zur

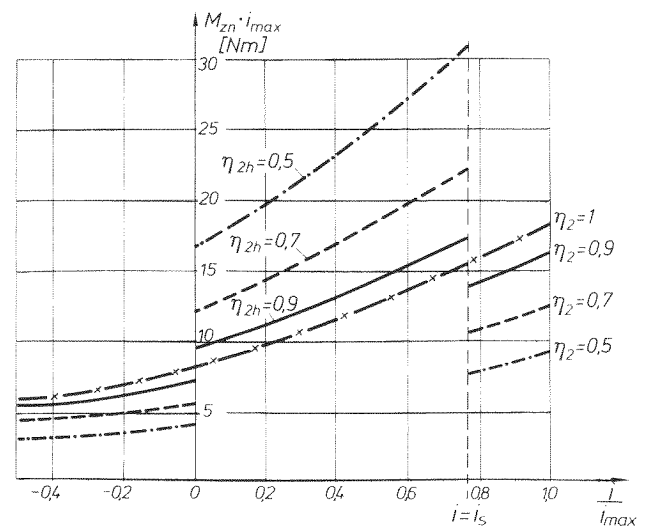


Bild 8. Verlauf des Nennmoments des Systems als Funktion der relativen Übersetzung (nach der Berechnung des Beispiels)

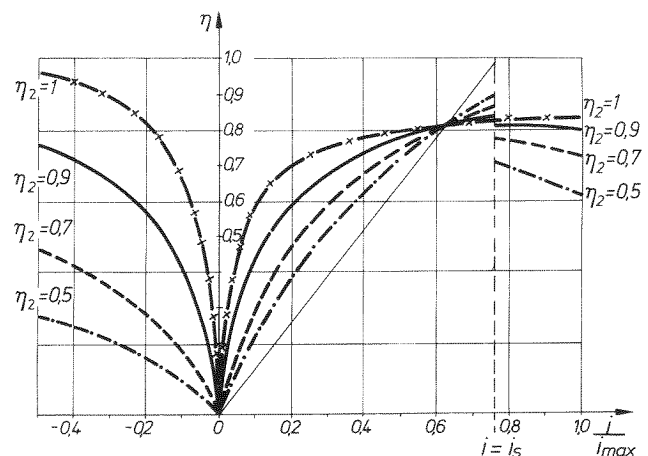


Bild 9. Verlauf des Wirkungsgrads des Systems als Funktion der relativen Übersetzung

Änderung des Regelbereichs dienen, dagegen kann man sie zur Vergrößerung des Feldes F in Reihe mit einem mehrstufigen Getriebe schalten.

Literatur

1. Koziarski, Cz.: Przekładnie bezstopniowe połączone z obiegowymi (Stufenlos verstellbare Getriebe geschaltet mit Umlaufgetrieben). Przegląd Mechaniczny 25 (1966) H. 5, S. 133–137
2. Czarny, R.; Koziarski, Cz.: Sprzęgła rozruchowo-przeciążeniowe w napędach maszyn i urządzeń (Anlauf- und Überlastungskupplungen im Antrieb von Maschinen und Anlagen). Przegląd Mechaniczny 30 (1971) H. 15, S. 467–470
3. Koziarski, Cz.: Przekładnie bezstopniowe połączone z obiegowymi (Stufenlos verstellbare Getriebe geschaltet mit Umlaufgetrieben). Przegląd Mechaniczny 44 (1985) H. 10, S. 9–12
4. Müller, H. W.: Einheitliche Berechnung von Planetengetrieben. ant 15 (1976) H. 1, S. 11–17; H. 2, S. 85–89 und H. 3, S. 145–149
5. Town, H. C.: Improving efficiency of steples drives with planetary gears. Hydraul. Pneum. Mech. Power 22 (1976) No. 10, pp. 382–386