

PWM-Drehzahlregler für DC-Kleinmotoren mit induktionsgeregelter Gegenkopplung

Das Schaltungskonzept dieses Reglers folgt grundsätzlich dem pulsweitenmodulierten Funktionsprinzip (PWM), wobei jedoch – als das hier erstmalig vorgestellte funktionscharakteristische Novum – das von der Motorbelastung abhängige Induktionsspannungsverhalten als Regelgröße zur Gegensteuerung des unter Lastbetrieb hervorgerufenen Drehzahlabfalls herangezogen wird.

Unter vergleichbaren Verhältnissen konnte sich dieses Verfahren nach einem rund einjährigen Erprobungsbetrieb so effektiv erweisen wie eine parallel betriebene und mit einer Thyristorregelung ausgestattete industrielle Kleinbohrmaschine (vgl. z. B. Proxon micromot 50/E). Typische Anwendungsfälle betreffen jedoch nicht nur Kleinwerkzeuge dieser Art, sondern z. B. auch Pumpensteuerungen.

Für die Drehzahlstabilisierung von Gleichstrommotoren sind unterschiedliche Verfahren geläufig [1]. Aufwändige Schaltungskonzepte verwenden z. B. einen mit der Antriebswelle gekoppelten induktiven oder optischen Drehzahlsensor, der mit einem analogen Proportionalregler oder einen auf PWM-Prinzip basierenden Steuerkreis gekoppelt ist. Kaum weniger Ansprüche an den Schaltungsumfang stellen andere auf letzterem Prinzip beruhende Verfahren,

welche periodisch getaktet den Stromfluss durch den Motor unterbrechen und damit dessen abgelieferte Generatorspannung als Drehzahlgröße für die PWM-Steuerung heranziehen [2],[4]. Die Entwicklung des hier vorgestellten Drehzahlstellers – als integrierfähiges Modul für Kleinwerkzeuge – hatte ein dementsprechend optimiertes Verhältnis aus technischer Effizienz zu einem relativ geringen Schaltungsaufwand zum Ziel. Im Ergebnis dieser Vorgabe konnte die Anzahl der passiven Bauelemente auf R1–5, C1–4, D1–4 beschränkt werden. Neben dem zentralen 8-poligen Steuerbaustein und zwei Potentiometern arbeiten lediglich zwei Transistoren, davon ein MOS-FET.

Induktionsspannungsverläufe eines in PWM-Steuerung betriebenen DC-Motors repräsentieren die Bilder 1 und 2, wobei die Betriebsspannung gleich und das Tastverhältnis nahezu gleich sind. Der Spitzenwert der durch das Abschalten des Motorstroms erzeugten Induktionsspannung ist im Lastbetrieb etwa doppelt so hoch. Durch genauere Untersuchungen dieses Zusammenhangs kann aufgezeigt werden, dass der von der augenblicklichen Belastung abhängige Motorstrom zum Amplitudenspitzenwert der Induktionsspannung proportional ist.

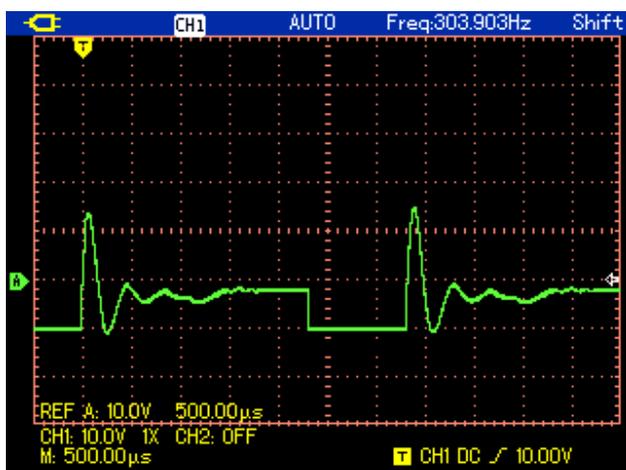


Bild 1. Spannungsverlauf an dem hier zum Minuspol (Bezugspotential) der Betriebsspannung (14 Volt) getakteten Motorspannungsanschluss. Der Motor läuft ohne äußere Last, seine Generatorspannung pendelt sich hier bei rund 6 Volt ein. Die Differenzspannung zeigt sich an der negativ gerichteten Schaltflanke.

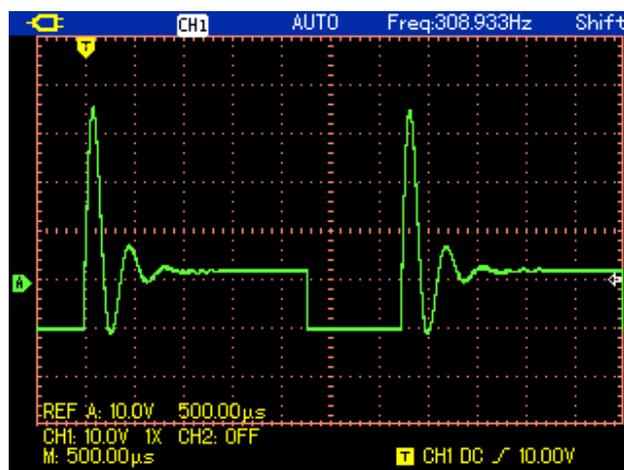


Bild 2. Spannungsverlauf am Motoranschluss der Kleinwerkzeugmaschine im Lastbetrieb ($U_b = 14 \text{ V}$). Der sog. Tastgrad, hier bezogen auf den L-Pegel im Oszillogramm (= „Stromfluss durch den Motor“), liegt nahezu unverändert bei $1 \text{ ms} : 3,24 \text{ ms}$. Dies entspricht einem Tastverhältnis von rund 31 %.

Maximale Motorleistung in Abhängigkeit vom Tastverhältnis

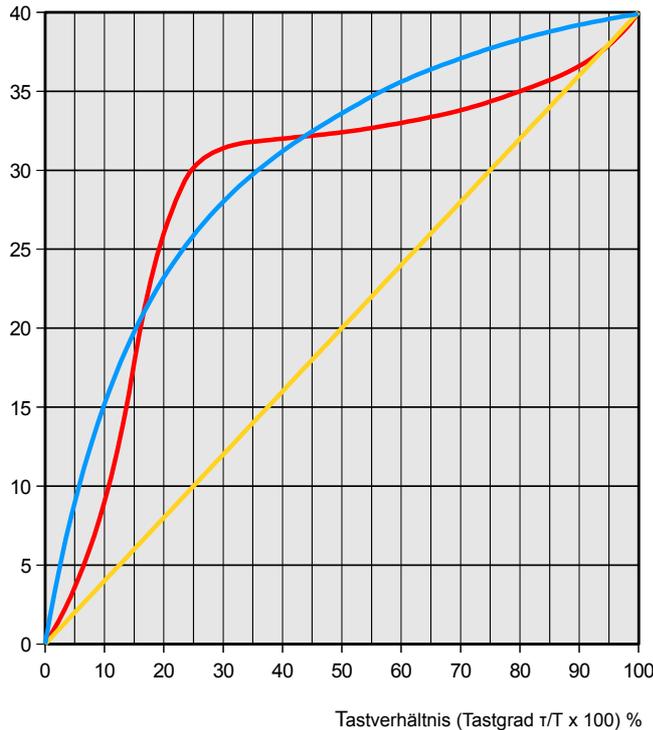
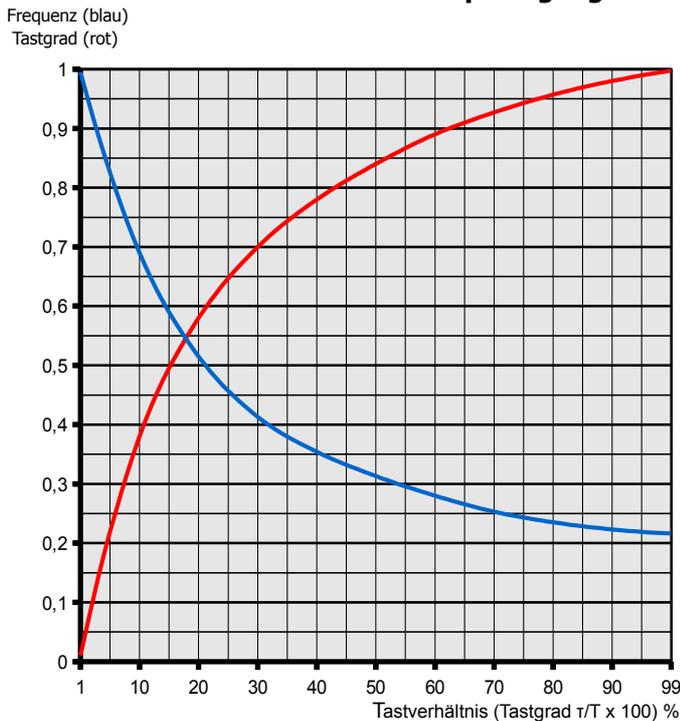


Bild 3. Die rote Kurve zeigt das Leistungsdiagramm des Reglers am Beispiel einer 12-V-Kleinbohrmaschine, Typ „ChiliTec 20425 Drill-Power“ (z. B. Pollin xx-500011). Die Ankerinduktivität beträgt 1,5 mH, der reelle Ankerwiderstand ca. 3,6 Ohm. Der blaue Kurvenverlauf bezieht sich auf die in Bild 5 verdeutlichte funktionstheoretische Grundlage. Die Gerade (gelb) zeigt den Leistungsverlauf über eine einstellbare Gleichspannungsquelle, deren Innenwiderstand durch ihre interne Regelung hier nicht relevant ist. (12 V = 100 %, 6 V = 50 %, ...)

Größtmögliche Tastgrad-Aussteuerung mit resultierendem Taktfrequenzgang



Funktionsschaltbild NE555

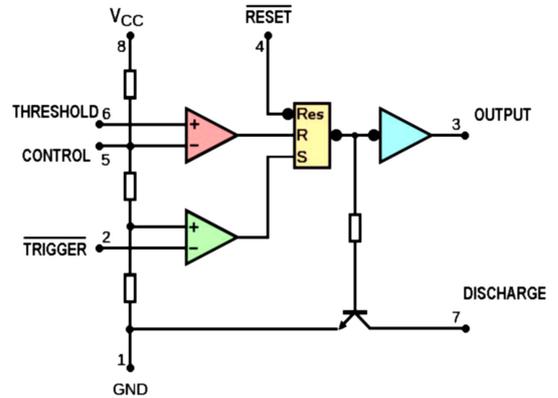


Bild 4. Bei nicht beteiligtem Reset geht der Ausgang 3 auf H-Pegel, wenn die Spannung am Triggereingang 2 weniger als ein Drittel der Betriebsspannung (V_{cc}) beträgt. Der Ausgang schaltet auf L-Pegel, wenn die Spannung am Threshold-Eingang 6 auf zwei Drittel der Betriebsspannung angestiegen ist. Durch eine äußere Beschaltung bzw. Steuerung des Control-Eingangs 5 sind jedoch die Schaltschwellen für das Setzen und Rücksetzen von Ausgang 3 veränderbar. Über den Discharge-Anschluss wird über den integrierten dargestellten Transistor synchron zum L-Ausgangspegel auf GND-Potential durchgeschaltet. Die Werte der eingezeichneten Widerstände zur Festlegung der Schaltschwellen betragen in der klassischen bzw. bipolaren Ausführung des NE555 jeweils ca. 5 kOhm. Die von verschiedenen Herstellern produzierten C-MOS-Varianten wurden mit wesentlich größeren Widerständen an den Eingängen der beiden Komparatoren dimensioniert.

Bild 5. „Obere Modulationsgrenze“ für den PWM-Betrieb des NE555.

Bei ungesteuertem Control-Eingang vorliegende Tastverhältnisse vergrößern sich durch Anhebung der Threshold-Schwelle auf einen Maximalwert, der 50 mV unterhalb der Betriebsspannung liegt – im Ergebnis der rote Kurvenverlauf. Die Tastverhältnisse auf der Abszisse gelten demnach für die Threshold-Referenzspannung in Höhe von $\frac{2}{3}$ der Betriebsspannung. Bei einem Tastverhältnis von z. B. 20 % verkleinert sich die Taktfrequenz um den Faktor von rund 0,5, wenn die Threshold-Spannung auf ihren von der Betriebsspannung abhängigen Maximalwert (s. o.) angehoben wurde.

Die für das oben ausgewiesene Motorleistungsdiagramm (rot) zu folgernden Abweichungen vom theoretischen Verlauf (blau) erklären sich im Wesentlichen aus der Zeitkonstante des Spitzenwertgleichrichters, der abhängig von der Last- und Induktionsspannungscharakteristik des Motors über den Emitterfolger auch ein höheres Spannungsniveau als das der Betriebsspannung an den Threshold-Eingang weiterleiten kann. In diesem Fall bleibt der interne Ausgang des Komparators (und somit auch der Ausgang 3 vom NE555) noch solange auf H-Pegel wie von dem Induktionsspannungsverlauf und der ggf. auf den Motor optimierten abzustimmenden Zeitkonstante (vgl. R4 und C2) vorgegeben wird.

Auf Pulsweitenmodulation basierende Drehzahlregler, welche im Gegensatz zu dem hier vorgestellten Konzept die Generatorspannung des Motors als Messgröße heranziehen, müssen insbesondere für höhere Motordrehzahlbereiche – also relativ große Tastverhältnisse – den Einfluss der Induktionsspannung auf die zur Drehzahl proportionale Generatorspannung hinreichend kompensieren. Da dies mit den verfügbaren technischen Realisationen nur näherungsweise gelingt, dürfte die hier vorgestellte Reglerschaltung im direkten Vergleich nicht wesentlich nachteiliger abschneiden. Wie in Bild 3 angegeben stehen bei der gemessenen Motorausführung für Tastverhältnisse über ca. 25 % bereits mehr als 70% der Maximalleistung zur Verfügung. Diese Leistungskurve bietet den Vorteil, dass bei Dauerbetrieb nahe an der Motorleistungsgrenze Überhitzungsschäden vermieden werden können.

Die scheinbar weit verbreitete Auffassung, dass nach den referenziellen Applikationsbeispielen für den NE555 nur ein vergleichsweise signifikanter Mehraufwand an zusätzlichen Bauelementen für eine Tastverhältnis-Bandbreite von zumindest 98 % erforderlich ist, kann die in Bild 6 dargestellte Schaltung nicht bestätigen. Unter der Voraussetzung, dass die von R1, R2 und C1 gebildete Bauteilanzahl ohnehin für einen Oszillatorbetrieb des NE555 zu berücksichtigen ist, wurden lediglich zwei weitere Bauteile (D1,

D2) und das Potentiometer P1 in die Schaltungsdimensionierung einbezogen.

Damit können Tastverhältnisse zwischen 1 und 99 % eingestellt werden. Der Leistungstransistor T1 ist bei aktivem Ausgang bzw. H-Pegel von IC1 durchgeschaltet. Diese Phase verlängert sich bei einem lastbedingten Spannungsanstieg an dessen „Control“-Anschluss, dementsprechend verringert sich die Taktfrequenz von max. ca. 300 Hz bis in einen Bereich unter 100 Hz. Der Schwellenanschluss 5 von IC1 erhält über den Spannungsteiler R5, P2 und nachfolgenden Spitzenwertgleichrichter D4, C2 und T2 (als entkoppelnder Emitterfolger) eine Schwellenspannung, die proportional ist zur Höhe der in den vorausgegangenen Taktperioden erzeugten Induktionsspannungsspitzen. Der Leistungstransistor T1 ist nur für Ankerströme über 5 Ampere (vgl. 12-Volt-Motoren mit Ankerwiderständen unter 2 Ohm) zu kühlen. Die Betriebsspannung der Schaltung kann auf 14 Volt erhöht werden, falls der Motor nur gelegentlich im Volllastbereich laufen soll. Wenn eine alternativ mögliche Betriebsspannungsversorgung über ein 12-V-Fahrzeuggordnetz nicht beabsichtigt ist, sollte für eine einfache Netzspeisung über Transformator und Brückengleichrichter bei dem Elko C5 ein stromspezifisches Kapazitätsmaß von mindestens 2000 µF (= 2 mF) pro 1 Ampere Ankerstrom eingeplant werden.

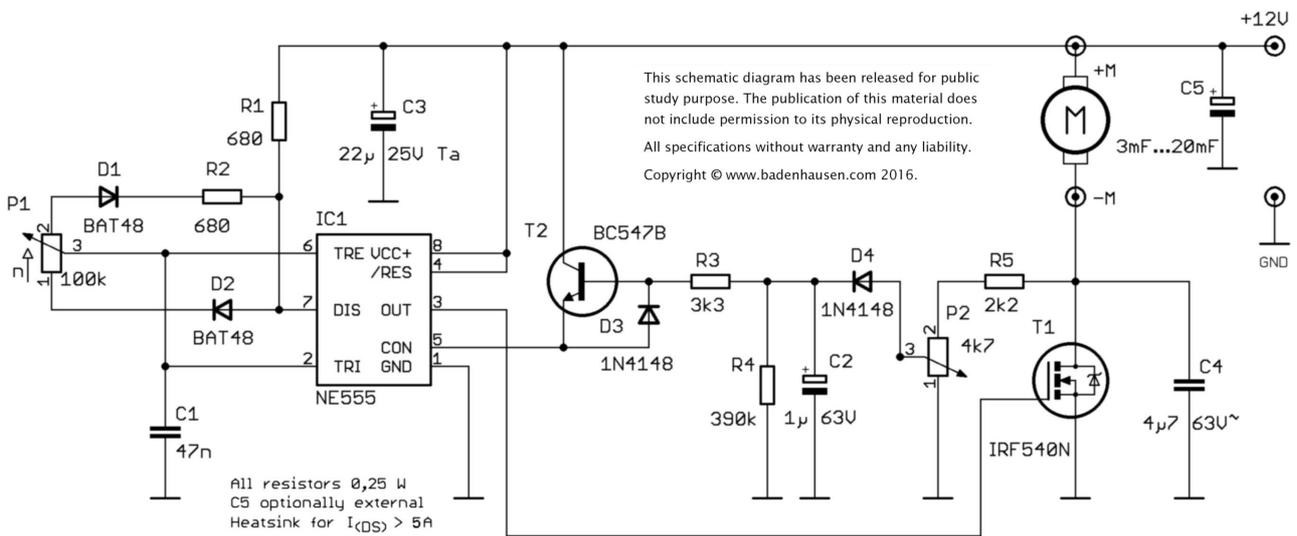


Bild 6. Der Schaltplan des Drehzahlstellers. Für $P1 = R$ und $R1,2 < 0,01R$ sind Tastverhältnisse zwischen 1 und 99 % einstellbar. Innerhalb dieses Bereichs beträgt die Frequenzabweichung max. $\pm 2 \%$. Bei offenem bzw. nicht gesteuertem Control-Eingang 5 von IC1 ergibt sich mit $C1 = C$ und $R \gg R1,2$ für die Ausgangsfrequenz

$$f \approx \frac{1}{0,78 RC}$$

Abstimmung

Der Kapazitätswert von C4 (Elko-Ausführung unbedingt vermeiden) wurde für Motoren mit Ankerinduktivitäten zwischen 0,5 und 5 mH ermittelt. Falls der Amplitudenspitzenwert über C4 bei Motorvollast einen Wert von 100 Volt überschreiten sollte, ist dessen Kapazität zu vergrößern; falls die Spannungsspitzen jedoch weniger als ca. 25 Volt betragen soll-

ten, entsprechend tendenziell zu verkleinern. P2 ist zunächst so einzustellen, dass die Spannung über C2 bei lastfreier Betriebsdrehzahl ca. 70% vom Betriebsspannungswert beträgt. Der Feinabgleich kann unter Einsatzbedingungen vorgenommen werden. Ein pulsierender Motorlauf ist durch Nachjustierung mit P2 kompensierbar.

Letzte Ergänzung: 23.08.2017

Literaturhinweise

- [1] Badenhausen, Rolf: „Stabil auf Rundkurs“
Schaltungsbeispiele für die Drehzahlstabilisierung
ELRAD 12/1988, S. 48–50.
- [2] Badenhausen, Rolf: „Taktiker“
Universell getaktete Motorregelung
ELRAD 12/1988, S. 56–59.
- [3] Badenhausen, Rolf: „Anker los“
Theoretische Betrachtungen für praktische Analysen von DC-Motoren
ELRAD 12/1988, S. 44–47.
- [4] Drehzahlregler für Gleichstrombohrmaschinen
ELV 48/1986, S. 21-24, als Derivat:
Lastunabhängige Drehzahl-Regelung für DC-Motoren
ELV 01/1999, S. 32-36.