

Die Steuerung eines Bremsstandes mit einer Wirbelströmbremse

ing. Hynek Havliš

Leiter der Arbeit: Doc. Ing. Tomáš Vyhlídal PhD

Abstrakt

Seznámíme se s realizací řízení brzdícího stendu pro optimalizaci výkonu spalovacího motoru školní formule ČVUT (www.carttech.cvut.cz). Řešení bylo realizováno - podle zadání - s minimálními náklady a zahrnuje programové vybavení PC (řídící lineární regulátor) a akční člen (PWM regulátor budícího proudu). Bylo využito maximum stávajících prvků měřícího systému - měřící aplikace v LabView a snímače, osazené na brzdě. Řešení je poměrně jednoduché, ale funkční a užitečné.

Dieses Werk beschäftigt sich mit der Steuerung des Bremsstandes. Der Bremsstand dient zu einer Optimisierung der Leistung des Verbrennungsmotors von der Schulformel ČVUT (www.carttech.cvut.cz). Die Lösung wurde realisiert - nach die Aufgabe – mit minimalen Kosten und besteht aus der software-Ausrüstung des Computers (mit einem Linearregler) und einem Aktuator (ein Strömregler). Mann hat auch eine Menge von bestehende Mess- und Leitungselemente benutzt, darin ein Programm in Lab View. Die ganze Lösung ist relativ einfach, aber voll funktionsfähig und nützlich.

Schlüsselwörter:

Wirbelströmbremse, Bremsstand, Steuerung der Drehungen, Integralregler, PWM Regelung, LabView

1. Die Aufgabe

Meine Kollegen aus dem Schulformelteam Formula Student/SAE haben mir um Lösung eines Problems der Drehzahlsteuerung eines Maschinenaggregates Verbrennungsmotor – Wirbelströmbremse ersucht. Die Bremse ist mit dem Motor mit eine Zahnkupplung verbunden. Die Steuerungsaufgabe hier beruht auf dem halten der Drehungen durch die Steuerung des Erregungsströms. Sieh das Regelungsschema auf dem Bild 2.

Der Verbrennungsmotor ist ein 16-Ventil Viertakt- Vierzylindermotor aus einem Motorrad Yamaha R6 (2007). Die maximale Leistung ist 94 kW bei 14500 Drehungen/min.

Die Wirbelströmbremse ist eine Maschine aus den Fünfzigerjahre aus England von der Firma Heenan, maximale Drehungen sind 6000/min, 110 kW, Erregung 90 V/4 A. Sieh das Maschninenaggregat auf dem Bild 1.



Bild 1. Das steuerte Maschinenaggregat. Verbrennungsmotor (rechts), Wirbelströmbremse (links).

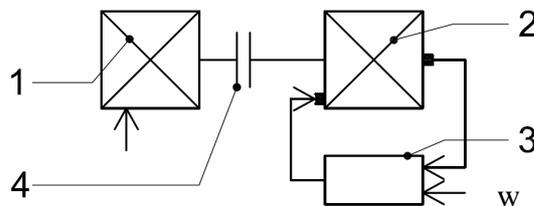


Bild 2. Das Schema von dem Regelkreis. 1 – Verbrennungsmotor, 2 – Wirbelströmbremse, 3 – Erregungsströmregler mit eine Spannungsquelle, 4 - Zahnkupplung, w – Setzwert (Drehungen)

Bei der Bremse stand zu Verfügung der originelle PI Regler mit Einstellungs-elemente. Dieser Regler besteht aus einer Zentraleinheit, einer Strömquelle und einem Strömregler. Dieser Regler arbeitete aber nicht gut, ohne Rücksicht auf die Einrichtung die Drehungen in Schwingungen versetzte.

Darum entschiedet ich ein neuer Regler aufbauen. Ich wollte ein einfacher Regler machen, damit ich alle Grössen in dem Kreis kontrollieren kann. Nächste Forderung war minimale Kosten.

Auf dem Anfang dachte Mann, das die Lösung wird einfach, aber später stellten wir fest, dass das Problem sehr interessant und ein bischen kompliziert ist.

2. Beschreibung der Arbeit einer Wirbelströmbremse

Die Wirbelströmbremse ist eine drehende elektrische Maschine, die die zugeführte Leistung in die Wärme durch die Wirbelströme im Magnetkreis verderbt. Mann sieht, das es um eine Maschine geht, die zum Beispiel in Testräume benutzt wird. Zum Unterschied von andere elektrische Maschinen die Wirbelströmbremse ist nicht im Stande in einem Reversierbetrieb zu sein – das heisst, das sie ist nicht im Stande allein zu drehen.

Die Erregungswindung befindet sich im Stator des Maschines, der Rotor ist ein einfaches Zahnrad. Durch die Rotation des Rotors ändert sich der Luftspalt im Magnetkreis und der magnetischer Induktionsfluss ändert sich auch. Auf diese Art aufsteigen die Wirbelströme und die mechanische Leistung wird verderbt, mehr zum Beispiel im [1].

Aus dem oben beschriebenen Prinzip ist klar, dass diese Bremse produziert kein Bremsmoment wenn sie nicht dreht.

Im Betrieb muss die Bremse gekühlt sein, denn ziemlich grosse Leistungen sind abzuleiten. Auf dem beschriebenen Maschinenaggregat handelt sich um etwa 15-60 kW bei ständigem Betrieb.

3. Die mathematische Beschreibung des Bremstandes

Wie gewöhnlich in der Praxis kennen wir kein mathematisches Modell des Standes. Darum habe ich einige einfache Experimente gemacht und stellte fest, dass die Maschine sich wirklich besonders benehmt.

Bei langsamen Änderungen des Erregungsstroms benehmt sich das Aggregat als ein Proportionalssystem, aber bei schnelle Änderungen als ein Schwingungssystem an der Stabilitätsgrenze. Das Benehmen war aber unterschiedlich in unterschiedliche Arbeitspunkte, manchmal benehmt sich das Aggregat als ein Proportionalssystem auch bei schnelle Änderungen des Erregungsstroms, siehe nächstes Bild 3.

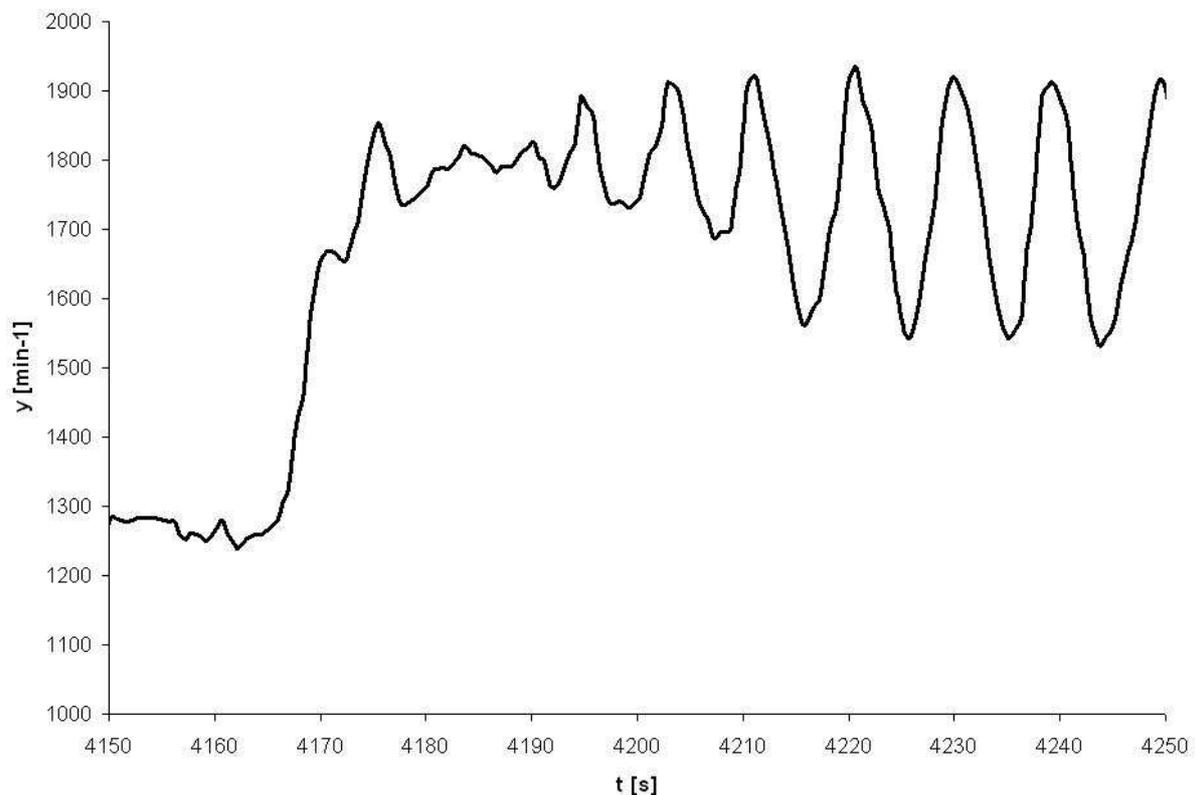


Bild 3. Ein Beispiel von dem Benehmen des Maschinenaggregats nach eine schnelle Änderung des Erregungsstroms. Nach langsame Änderung würde der Verlauf ohne Schwingungen sein.

Die Änderung des Erregungsstroms (Bild 3) hat Mann mit verbindung der Strömquelle gemacht, das heisst, dass die Shwingungen sind bestimmt kein Ergebnis schlechter Funktion des Reglers.

Nach dem Bild 3 können wir erklären, dass das Aggregat benehmt sich nach eine Differentialgleichung mit dieser Struktur:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= f(\mathbf{x}(t), u(t)) \\ y &= g(\mathbf{x}(t), u(t))\end{aligned}\tag{1}$$

Eine explizite Beschreibung nach (1) würde wirklich schwierig zu finden. Nächster Vorgang dann könnte die Linearisierung zu sein und ein analytischer Vorschlag eines Reglers.

4. Die vorgeschlagene Lösung der Regelung

4.1 Die theoretische Lösung nach die Theorie der automatischen Steuerung

Weil der Bremstand sich wirklich kompliziert benehmt, entschiede ich von dynamische Prozesse zu quasi-statische Prozesse überzugehen.

Die Wirbelströmbremse in dem Bremstand ermöglicht eine Arbeit mit langsamen Regelprozessen. Darum ist möglich einen langsamen Regler vorzuschlagen, der wird die Drehungen sehr langsam steuern. Wenn wir diese Sache vorschlagen, heisst das, dass alle Derivationen sind gleich null und die matematiche Beschreibung wird einfacher:

$$0 = m(y_s, u_s)\tag{2}$$

bzw.

$$y(t) = n(u(t))\tag{3}$$

Mit dieser Ableitung haben wir de facto eine Unterlassung der Dynamik gemacht. Das ist in der automatischen Steuerung kein gewöhnlicher Vorgang. Die folgende Experimente mit der Anlagge zeigen, dass wenn wir die Drehungen langsam steuern, das Aggregat benehmt sich als ein Proportionellsystem, obwohl nicht linear.

Nächstes Problem war die Wahl des Typs des Reglers für Modell (3), damit die Steuerung die Regelabweichung löscht. Die Theorie der automatischen Steuerung und die Ingenieurpraxis auch sagen uns, dass wir einen Regler mit Integration benutzen sollten (das heisst einen I oder PI Regler, die Reglern mid einer Derivation haben mit oben empfangenen Prämissen keinen Sinn).

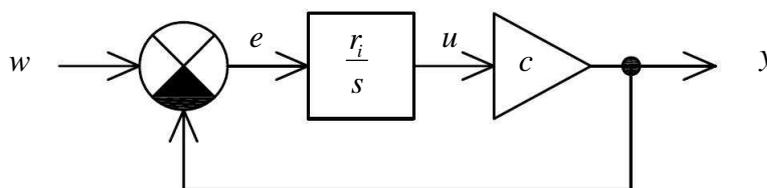


Bild 4. Das Schema der Regelkreis der Drehunge;. w – Setzwert, e – Regelabweichung, u Steuergrösse (der Erregeström), y – Drehungen

Das Bild 4 zeigt uns den Regelkreis verbindet nach oben angenommenen Prämissen – ein System mit keiner Dynamik und ein Integrationsregler, keine Verzögerung. Einen Beweis für die Eignung dieses Reglers machen wir für ein lineares Modell. Das Modell (3) können wir sowieso nicht. Die Übertragung des Setzwertes nach die wirkliche Drehungen des Regelkreises G_{wy} ist gleich nach [2]

$$G_{wy} = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S} \quad (4)$$

Hier G_R , G_S sind gleich

$$G_R = \frac{r_i}{s} \quad G_S = c \quad (5)$$

Dann ersetzen wir (5) in (4) und erhalten ein Ergebnis

$$G_{wy} = \frac{r_i c}{s + r_i c} \quad (6)$$

bzw.

$$G_{wy} = \frac{1}{\frac{1}{r_i c} s + 1} \quad (7)$$

Aus diese Ergebnisse kann man sehen, dass der Regelvorgang wird nach eine Exponentialkurve verlaufen. Die Regelabweichung ist theoretisch gleich Null ohne Rücksicht auf die Grösse der Parameter c , r_i . Die Grösse der Parameter beeinflusst nur die Geschwindigkeit des Regelvorgangs. Diese Behauptung ist gültig nur damals, wenn die Regelung so langsam ist, dass die Dynamik unterlassen sein könnte!

Nächste Sache, die den Regelvorgang verbessern hat, war eine Drosselspule, die ich in den Erregungskreis zugegeben habe. Die Induktivität der Drosselspule ist etwa 7,5 mH gewesen. Die Drosselspule hat verursacht, dass das Aggregat ist in der Mehrheit der Arbeitspunkte Schwingungsfrei.

4.2 Die technische Realisation der Lösung

Es war notwendig den ganzen Regelkreis machen. Der Regelkreis besteht aus diese Elemente:

- ein Sensor der Drehungen
- ein Integrationsregler
- ein Aktuator – Strömregler mit Strömquelle

Im Labor stand schon ein Computer mit eine Mess- und Steuerungskarte zu Verfügung, denen habe ich benutzt. Ich habe eine Struktur des Regelkreises nach dem Bild 5 gemacht.

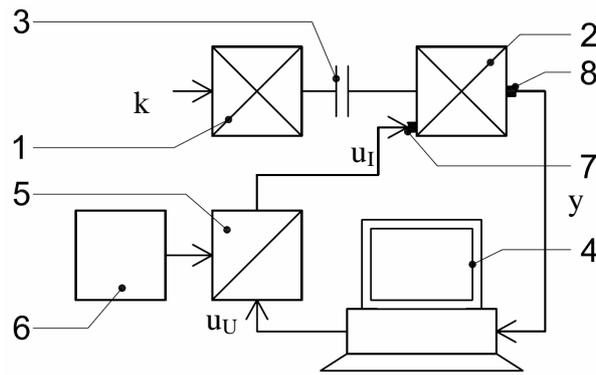


Bild 5. Die technische Realisation des Regelkreises. 1 – Verbrennungsmotor, 2 – Wirbelströmbremse, 3 – Zahnkupplung, 4 - Steuerungscomputer mit dem Integrationsregler, 5 - Konverter 0-5 V/0-1,5 A, 6 – Erregungsströmquelle, 7 - Erregungsklemmplatte der Bremse, 8 – Drehzahlmesser; k – die Gasklappe, y – wirkliche Drehungen, u_U - Steuergrösse (ausgang res Reglers 0-5 V), u_I – Steuergrösse (Erregungsstrom 0-1,5 A)

Wir beschreiben nur die Elemente des Regelkreises, die für die Regelung wichtig sind, das heisst den Integrationsregler und den Aktuator (PWM Erregungsströmregler).

4.3 Der Integrationsregler

Den Regler habe ich in der Software LabView [4] in einere Programmierungssprache Matlab [3] gemacht. Der Eingang des Reglers sind die wirklichen Drehungen und der Setzwert, der Ausgang ist die Steuergrösse 0-5 V, weil 0-5 V ist ein Eingangssignal des Erregungsströmreglers, der die Spannung 0-5 V wechselt in den Ström 0-1,5 A. Natürlich ist möglich auch eine Handsteuerung und das Programm macht eine stossfreie Überschaltung und eine antiwind-up Funktion.

Das Programm ist auf eine einfache Rechtecksapproximation des Inetgrals aufgebaut und verläuft mit einere Tastzeit von 10 ms. Der Algorithmus ist ganz einfach, seine Funktion ist klar aus den Kommentaren, sieh die Beilagen.

In dem Algorithmus gibt es eine interessante Kleinigkeit – das Vorzeichen der Regelabweichung und der Sinn der Rückkopplung im Regelkreis. Weil hier die Steuergrösse das Bremsdrehmoment ist, wenn sie steigt, die Drehungen fallen.

Mein Kollege Peter Čermák hat für den Regler ein Benutzerinterface gemacht, damit alee wichtige Grössen eingestellt werden können.

4.4 Der Erregungsströmregler

Der Regler ist zwischen den Computer und die Wirbelströmbremse eingereicht. Er überträgt die Spannung 0-5 V nach die Erregungsström 0-1,5 A.

Den Erregungsströmregler habe ich als ein einfaches PWM-Regler konstruiert. Er ist mit dem Mikrocomputer ATmega8 steuert. Der Steuerungsteil und der Kraftteil sind – wegen die Störung - galvanisch getrennt mit einem optischen Trenner. Ich habe einige kleine Berechnungen gemacht, aber mit ihnen werden wir uns hier nicht beschäftigen. Das Schema des Gerätes ist auf dem Bild 6, das Gerät dann auf dem Bild 7.

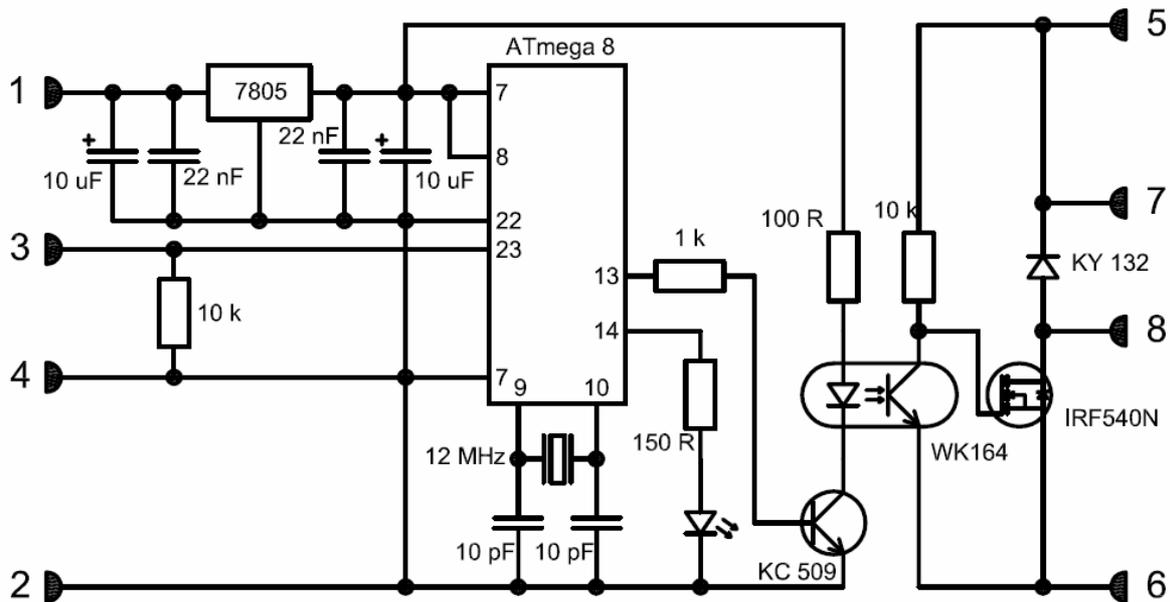


Bild 6. Das Schema des Erregungsströmreglers. Links ist der Steuerungsteil mit dem Mikrocomputer ATmega8, rechts der Kraftteil (galvanisch getrennt) mit dem MOSFET Transistor IRF540N.

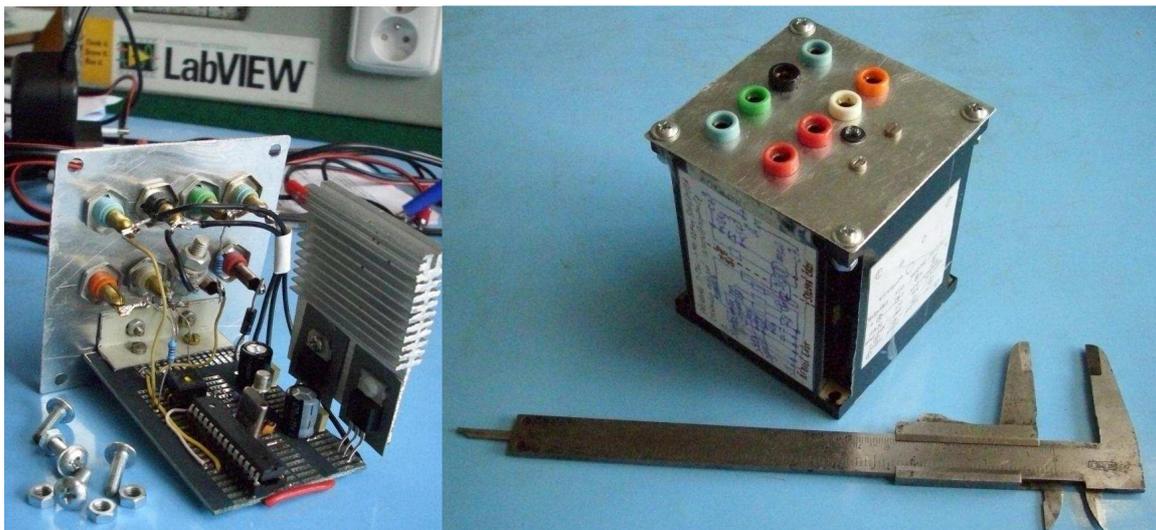


Bild 7. Fotos des Gerätes, links das Gerät ohne Deckel.

Das Herz des Gerätes ist der Mikrocomputer ATmega8 und sein Programm. Der Mikrocomputer ist u.a. mit einem 8 kB flash Speicher, 1 kB RAM Speicher, 6-Kanal 10 bit A/D Wandler und I/O Töre ausgerüstet.

Sein Programm ist wirklich einfach, es liest den Eingang (0-5 V) und nach die Spannung schaltet es den Ausgangstransistor IRF540N in 0-100 % der Zeit, sieh Bild 8. Der Verlauf des Programms ist mit einem 12 MHz Quartz steuert.

Im linken Teil des Bildes 6 sehen wir den Steuerungsteil (Eingang 0-5 V=, Hilfsströmkreise des Mikrocomputers), rechts sehen wir den Kraftteil mit dem Schalttransistor IRF540N wieder mit einige Hilfsbauelemente. Beide teilen sind mit einem optischen Trenner getrennt.

Den Strömkreis habe ich auf eine universale Platte gemacht, einige kleinen mechanischen elemente habe ich auch selbst erzeugt. Das Gerät ist nicht präzis, aber es handelt sich doch um einen Laboratoriumsprototyp.

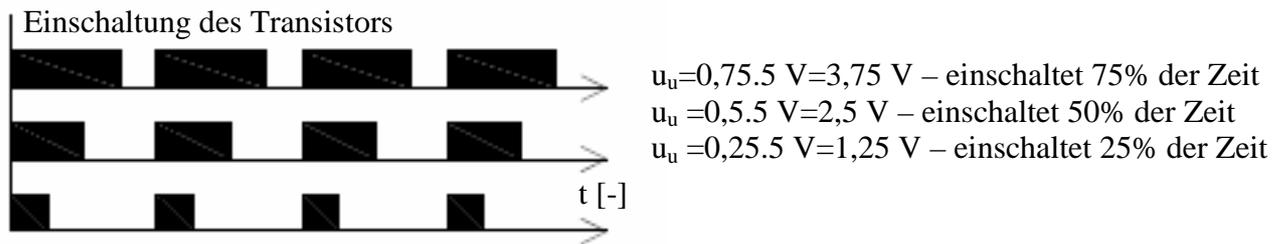


Bild 8. Das Prinzip der Arbeit des Erregungsstromreglers. Der Eingangsspannungsumfang 0-5 V entspricht 0-100% der Zeit der Einschaltung des Transistors

4.5 Das Benutzerinterface

Das Benutzerinterface dient für nötige Einstellungen der Regelung – des Setzwertes (Drehungen) und die Integrationskonstante des Reglers – siehe Bild 9.

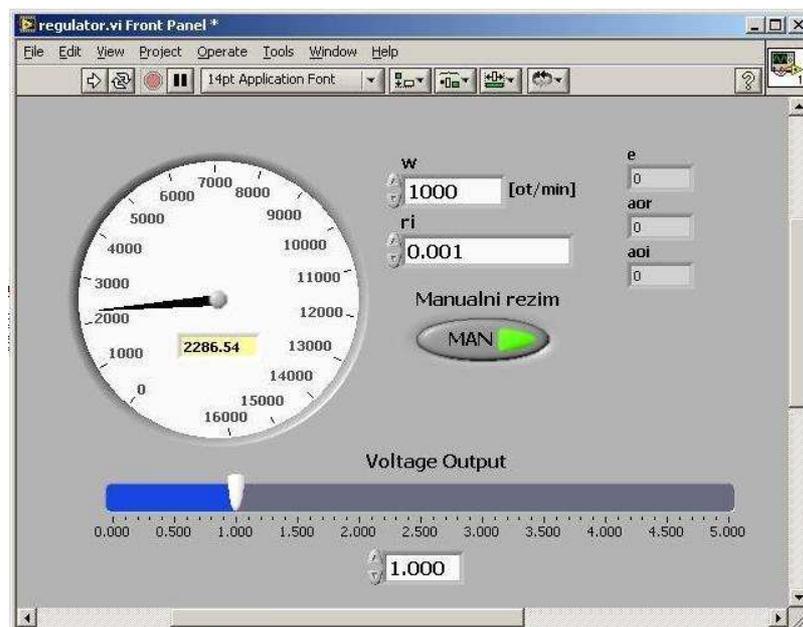


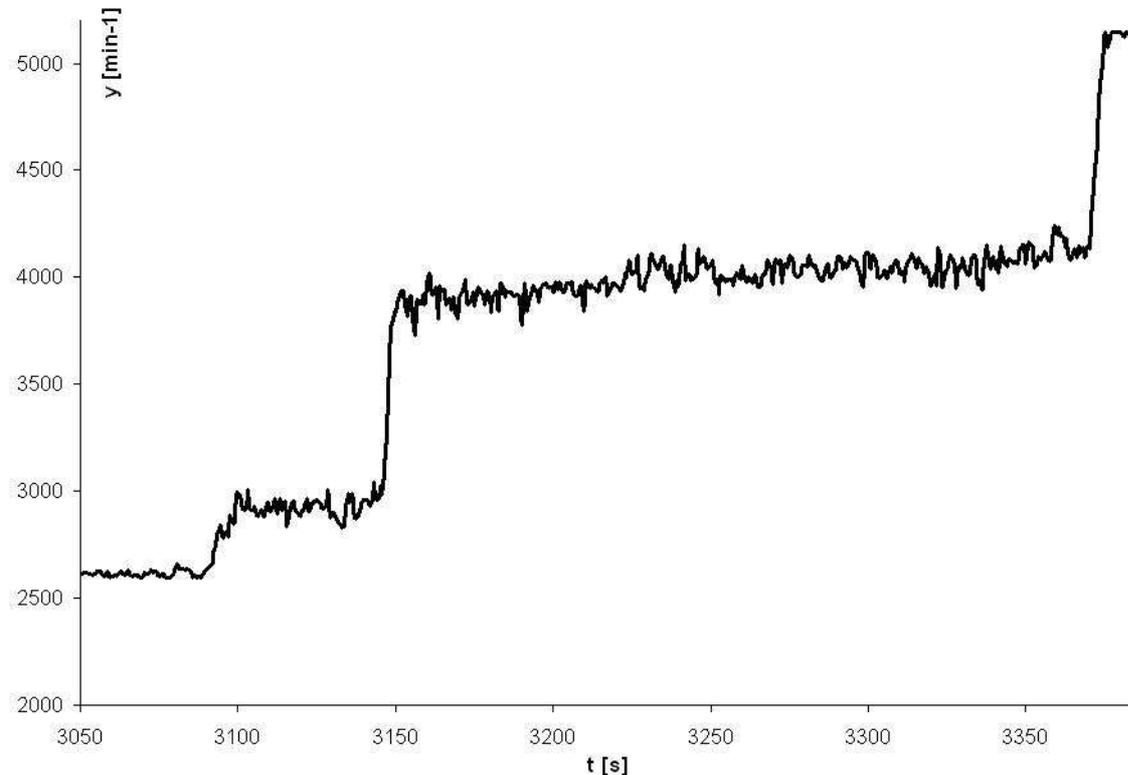
Bild 9. Das Benutzerinterface der Regelung mit der Visualisierung einige Betriebswerte und Einstellungselemente.

Auf dem Bild 9 sehen wir das Interface, das ermöglicht automatische oder manuelle Steuerung der Drehungen. Manuelle Steuerung ist möglich mit Abschieben von dem Slider im unteren Teil des Bildes. Wenn die Regelung automatisch eingestellt ist, schiebt mit dem Slider der Regler allein.

Diese Lösung gefällt sich sehr den Kollegen, die auf dem Maschinenaggregat arbeiten.

5. Ergebnisse

Bild 10 zeigt einen Regelvorgang.



Obr. 10. Záznam regulačního pochodu. Vidíme, že uzavřený regulační obvod je stabilní a

Eine akzeptable Funktion des Regelkreises wurde erreicht. Mit der Hilfe der Drosselpule waren die Eigenschaften des Maschinenaggregats verbessert, das heisst, dass das Aggregat benehmt jetzt in der Mehrheit der Arbeitspunkte schwingungslos. Auf dem Bild 10 sehen wir noch (in der Zeit etwa 3150-3300 sec) einen Anstieg der Drehungen, den ist durch die Arbeit des Integrationsregler erreicht. In der Zeit etwa 3150 sec zehen wir eine grössere Änderung der Drehungen, die manuelle gemacht ist.

Auser diese Ergebnisse hat der Integrationsregler noch eine Verbesserung gebracht. Dieser Regler ändert nämlich die Drehungen sehr langsam, das heisst, dass wir können die Drehungen für konstant zu betrachten. Das heisst, dass bei einem Messen können wir die Eigenschaften des Verbrennungsmotors nicht nur in einem Punkt, sondern in eine ganze Kurve feststellen. Und das ist für die Operatoren des Aggregats sehr bequem und auch schnell.

6. Das Nachwort

Die oben beschriebene Lösung ist funktionell, trotzdem sie ist theoretisch ungewönlich. Die Lösung hat eigentlich nur einen Nachteil, und das ist eine langsame Regelung. Die langsame Regelung ist aber im Labor kein Problem, im Gegenteil, sie hat neue Möglichkeiten der Arbeit auf dem Bremstand gebracht.

Die oben geschriebene Lösung ist nur eine experimentelle Realisation, weiter können wir uns beschäftigen mit *low gain control* nach [7] und zum Beispiel mit der Benutzung des PI Reglers.

Die Danksage

Ich muss herrn Diplomingenieur J. Vlček, CSc aus unserem Institut danken für wertvolle Beratungen, die mir mit der Steuerung der Wirbelströmbremse wirklich geholfen haben.

Die Beilagen

Der Algorithmus des Integralreglers

```
%ktp - pomocna konstanta (pouzita ze zvyku)
%e - reg. Odchylka
%rr - promena indikující rucni rezim (1), automaticky (0)

ktp=0.01
e=-(w-air)%vypocet regulacni odchylky - pozor na smysl ZPV!

aoi=aoi+ktp*ri*e%vypocet akčního zasahu

if rr==1 %je-li rucni rezim, pis na vystup manualne
aoi=man %navic funguje i jako beznarazovy prepinač A/M
end;

aor=aoi

if aor>5 %antiwind - up nahoru
aoi=aoi-ktp*ri*e
aor=5
end;

if aor<0 %antiwind - up dolu
aoi=aoi-ktp*ri*e
aor=0
end;
```

Die Liste der Symbole

u_U	Die Steuergrösse – Spannung 0-5 V (Ausgang des Reglers)	[V]
u_I	Die Steuergrösse Erregungsstrom 0-1,5 A	[A]
G_R	Die Übertragung des Reglers	[-]
G_S	Die Übertragung der Bremse	[-]
G_{wy}	Die Übertragung des Regelkreises	[-]
c	Die Verstärkung der Bremse	[-]
r_i	Die Integrationskonstante des Reglers	[-]
w	Der Setzwert der Drehungen	[min ⁻¹]
y	Die wirkliche Drehungen	[min ⁻¹]
e	Die Regelabweichung	[min ⁻¹]
s	Der Laplacescher Operator	[-]
x	Der Zustandgrössevektor der Bremse	[-]

Die Liste der Literatur

- [1] *Novák, J.*: Dynamometr na vířivé proudy a jeho regulace. Elektro 6/2002.
- [2] *Ogata, K.*: Modern control engineering. Prentice Hall, London 1997.
- [3] <http://www.mathworks.com> (Marz 2010)
- [4] <http://www.ni.com/labview> (Marz 2010)
- [5] <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/econtrolhtml/Intro/Intro3.html> (Marz 2010)
- [6] <http://www.ges.cz> (Marz 2010)
- [7] *Flienger, T.; Logemann, H.; Ryan, E. P.*: Low-gain integral control of continuous-time linear systems subject to input and output nonlinearities. Automatica 39/2003.