

**Předmět: BPC-OZU**

**Úloha č. 5 Akumulace elektrické energie pomocí setrvačníku.**

### **Cíl úlohy**

Cílem úlohy je seznámit studenty s akumulací elektrické energie prostřednictvím setrvačníku. V úloze jsou použity čtyři setrvačníky z rozdílných materiálů, rozměrů a hmotností. Úkolem je zjistit, jaké množství energie jsou setrvačníky schopné v závislosti na jejich parametrech akumulovat a určit materiály setrvačníku.

### **Kontrolní otázky**

Jaké parametry setrvačníku ovlivňují jeho schopnost akumulace energie?

Čím si vysvětlujete neustálý odběr energie po roztočení setrvačníku?

### **Zadání úlohy:**

U předložených setrvačnicků zjistěte hodnotu výsledné práce  $W$ , kterou je setrvačnick schopen po získání kinetické energie dodat do zátěže.

Vyneste do grafu rozběhové a brzdící křivky setrvačníku  $I = F(t)$ , dále okamžité hodnoty výkonu setrvačnicků  $P = F(t)$ . V grafu rozběhové křivky identifikujte ztráty způsobené konstrukcí zařízení. Porovnejte velikosti výkonů dodaných setrvačnický vzhledem k odporové zátěži.

Zjistěte velikost momentu hybnosti a kinetické energie akumulované setrvačnický. Setrvačnický seřaďte dle množství akumulované energie. Definujte, které parametry setrvačníku jsou k akumulaci energie nejdůležitější.

Na základě hmotnosti a přiložené výkresové dokumentace setrvačníku zjistěte, z jakých materiálů jsou vyrobeny.

Hmotnosti setrvačnicků:  $m_1 = 9,3 \text{ kg}$ ;  $m_2 = 8,25 \text{ kg}$ ;  $m_3 = 3,05 \text{ kg}$ ;  $m_4 = 3,055 \text{ kg}$

Hodnoty odporů zátěže:  $R_1 = 1 \text{ } \Omega$ ;  $R_2 = 2,2 \text{ } \Omega$ ;  $R_3 = 4 \text{ } \Omega$ ;

## Úloha č. 5 Akumulace elektrické energie pomocí setrvačníku.

### Teoretický rozbor

Setrvačníkem (gyroskopem) nazýváme tuhé homogenní osově souměrné (rotační) těleso s velkým momentem setrvačnosti vzhledem k ose souměrnosti, dle níž je rotace tělesa stabilní. Setrvačníky se roztáčejí vzhledem k ose souměrnosti na vysoké otáčky (otáčky dosahují hodnot až 50 000 ot/min). Takovým způsobem získávají velký moment hybnosti a velkou kinetickou energii, kterou je možné přeměnit na užitečnou práci, nebo jinou formu energie.

Používají se dva typy setrvačnickových akumulátorů. Jeden typ využívá setrvačníky velké hmotnosti uspořádané do takového tvaru, aby bylo dosaženo co největšího momentu setrvačnosti. Druhý typ naopak používá lehčí setrvačníky pracující při vysokých otáčkách. Pro dosažení vysokých otáček musí být rotor uložen ve vakuu, aby se minimalizovalo tření o vzduch. Z tohoto důvodu také často bývá uložen v magnetických ložiskách s magnetickou levitací.

Kinetická energie akumulovaná roztočeným setrvačníkem je dána vztahem

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega^2, \quad [\text{J}] \quad (1)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost a  $J$  je moment setrvačnosti, který úzce souvisí s tvarem a hmotností rotujícího tělesa. Ze vztahu (1) vyplývá, že kinetická energie setrvačníku je přímo úměrná momentu setrvačnosti a roste druhou mocninou s úhlovou rychlostí.

V případě, že bude mít setrvačník tvar plného válce a osa symetrie bude osou otáčení, můžeme uvažovat výpočet momentu hybnosti:

$$J = \frac{1}{2} m r^2, \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (2)$$

kde  $m$  je hmotnost setrvačníku a  $r$  poloměr, tedy vzdálenost od osy souměrnosti.

Úhlová rychlost setrvačníku se určí vztahem

$$\omega = 2 \pi \frac{n}{60}, \quad [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

v němž  $n$  značí počet otáček setrvačníku za minutu.

K výpočtu výkonu setrvačníku využijeme vztah

$$P = UI, \quad [\text{W}] \quad (4)$$

u něhož je  $U$  napětí a  $I$  proud.

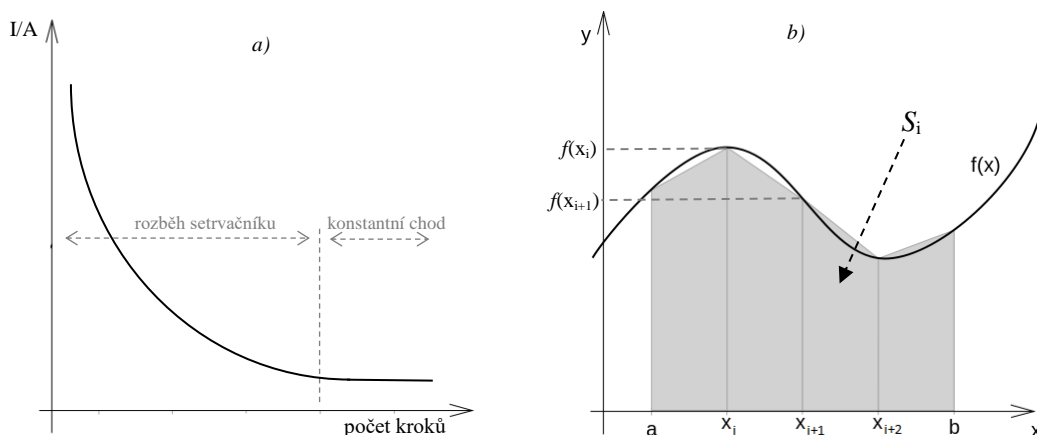
Než dojde k ustálení otáček setrvačníku, je k jeho rozběhu nutné dodat vyšší počáteční proud. Po získání dostatečné kinetické energie setrvačnick přejde do konstantního chodu, v němž se stal mechanickým akumulátorem energie využívající setrvačných sil obr.1 a).

Výkon, který setrvačnick dodává do zátěže, není konstantní. K určení akumulované energie, potažmo velikosti práce na daném systému, je proto nutné počítat ze znalosti časového průběhu dodávaného výkonu. K výpočtu práce se poté využije numerický integrál výkonu založený na lichoběžníkové metodě obr.1 b):

$$W = \int_a^b f(x) dx = \sum_{i=0}^{n-1} S_i = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (5)$$

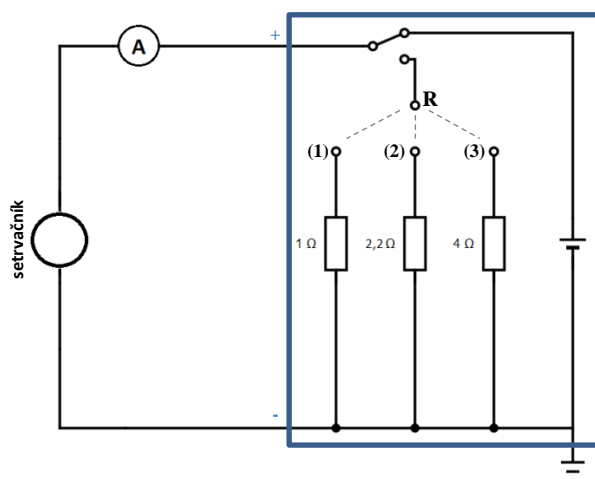
$$S_i = \frac{h}{2} (f(x_i) + f(x_{i+1})) \quad (6)$$

$$h = x_{i+1} - x_i \quad (7)$$



Obr. 1. a) Rozběh setrvačníku a jeho konstantní chod, b) princip výpočtu určitého integrálu lichoběžníkovou numerickou metodou

### Obvodové zapojení:



Obr. 2. Schéma obvodového zapojení setrvačníku

## **Příklady využití setrvačníku:**

### Akumulace energie

K akumulaci elektrického výkonu se dá nejjednodušeji využít tím způsobem, že setrvačník upevníme na hřídel elektromotoru, poháněného elektrickým proudem, jehož "dávku" potřebujeme akumulovat. Při odběru energie se elektromotor chová jako dynamo či alternátor a akumulovanou energii vrátí.

Švýcarsko zavedlo již před čtyřiceti roky na zkoušku elektrické gyrobusy - upravené trolejbusy s jeden a půl tunovým setrvačníkem pod podlahou na hřídeli elektrického stroje - motoru a generátoru. Po zastavení ve stanici vozidlo vysunulo sběrače k napájecímu stožáru. Proud ze sítě během jeden a půl minuty urychlil setrvačník a do jeho vyšších otáček akumuloval asi 10 kWh energie. Ta po stažení sběrače vystačila trolejbusu k jízdě na další zastávku s nabíjením.

Obecně vývojáři už dávno upustili od těžkých litinových kol a nahrazují je mnohem lehčími a menšími čokovitými setrvačníky z vyztužených plastů, které ve speciálních ložiskách a ve vakuové nebo heliem plněné skříní nechávají otáčet až desettisíckrát za minutu.

Kombinovaná magnetická a mechanická ložiska zaručují životnost nepřetržitého otáčení po dobu deseti let. Tím a také vysokou energetickou účinností (lepší než 80 %) překonávají po všech stránkách tradiční zálohovací akumulátorovny a mohou se zapojit paralelně do baterií, schopných krátkodobě vydat akumulovaný elektrický výkon až do několika MW.

### KERS (Kinetic Energy Recovery System)

KERS, systém rekuperace kinetické energie, je soustava použitá u vozů Formule 1, která uchovává kinetickou energii ztracenou při brzdění automobilu ve formě mechanické energie v setrvačníku. Takto uchovaná energie je poté v případě potřeby využita pro zrychlení vozidla.



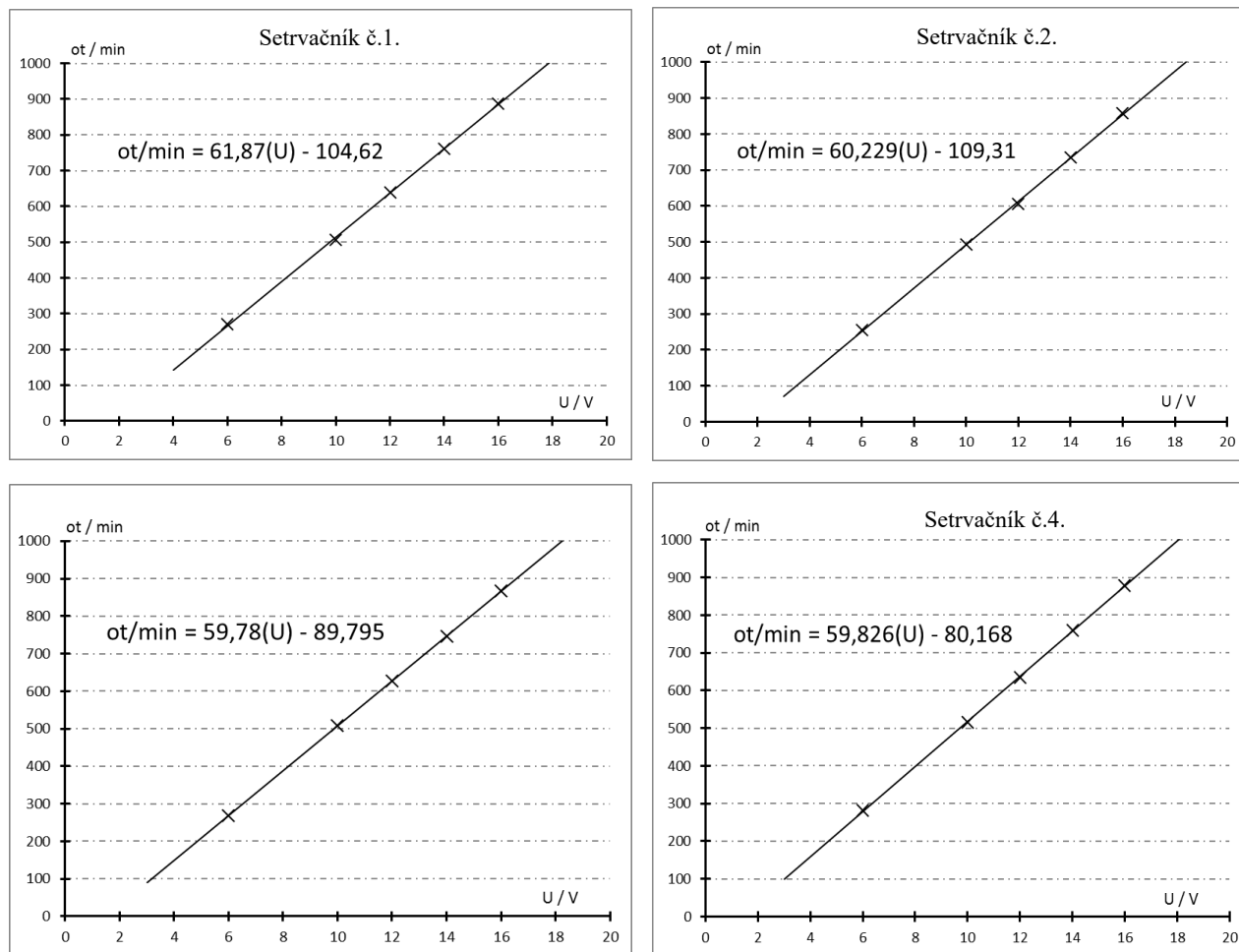
Obr. 3. Setrvačník systému KERS

Výhodou setrvačníků je jejich vysoký výkon a dlouhá životnost. Setrvačníky se také dají dobře využít především pro krátkodobé ukládání energie, například jako náhrada olověných akumulátorů ve zdrojích nepřerušovaného napájení, tj. UPS (Uninterruptible Power Supply/Source).

## Postup měření

### A.

1. Dle pokynů vyučujícího upevněte setrvačnick na nosnou konstrukci zařízení.
2. Před zahájením měření zkontrolujte, zda je na ovládacím boxu přepínač v poloze ZDROJ.
3. Zapněte laboratorní zdroj a dle kalibračních křivek na něm nastavte napětí zadané vyučujícím. Napětí prozatím nepřivádějte na setrvačnick a ponechte tlačítko A,(A,B) na zdroji neaktivní!



Obr.4. Kalibrační křivky setrvačnicků

4. Na pracovní ploše počítače spusťte program Setrvacnik.VEE.
5. V okně programu nastavte počet kroků měření na hodnotu 80 kroků.
6. Poté spusťte měření tlačítkem START a odhadem po dvou sekundovém intervalu přiveďte na setrvačnick napětí (tlačítkem A,(A,B) na laboratorním zdroji).
7. Po uplynutí nastaveného intervalu si ze souboru VA.excel zkopírujte a do svého souboru uložte naměřené hodnoty rozběhové křivky setrvačnicku. Soubor VA.excel poté zavřete.

8. Na ovládacím boxu zvolte velikost odporu zátěže. Volit můžete mezi hodnotami  $R_1 = 1 \Omega$ ;  $R_2 = 2,2 \Omega$ ;  $R_3 = 4 \Omega$ , nebo dle pokynů učitele.
9. V okně spuštěného programu zapnete měření tlačítkem START a zároveň na ovládacím boxu přepnete tlačítko do polohy ZÁTĚŽ.
10. Po uplynutí nastaveného intervalu si ze souboru VA.excel opět zkopírujete a do svého souboru uložíte naměřené hodnoty brzdící křivky setrvačníku.
11. Získané hodnoty pro rozběhovou a brzdící křivku setrvačníku vyneste do grafu  $I = F(t)$ .
12. Na zvolené odporové zátěži určete okamžité hodnoty výkonu dodaného setrvačnickem a vyneste je do grafu  $P = F(t)$ .
13. Okamžité hodnoty výkonu na zátěži porovnejte v čase  $t = 8$  s.
14. Dle vzorce (5) vypočítejte velikost práce dodané setrvačnickem na zátěž.

**B.**

1. Určete kinetickou energii  $E_K$  (1) a moment setrvačnosti  $I$  (2) setrvačníku. Pro zjednodušení výpočtu předpokládejte, že mají setrvačníky tvar plného válce.
2. Na základě provedených výpočtů porovnejte vliv rozměrů a váhy setrvačnicků a určete, který z nich je k akumulaci energie nejvhodnější. Své tvrzení zdůvodněte.

**C.**

1. Z rozměrů setrvačnicků na přiloženém listu zjistěte, z jakých materiálů jsou setrvačníky vyrobeny. Hmotnosti jednotlivých setrvačnicků jsou:

Setrvačnick č.1:  $m_1 = 9,3$  kg

Setrvačnick č.2:  $m_2 = 8,25$  kg

Setrvačnick č.3:  $m_3 = 3,05$  kg

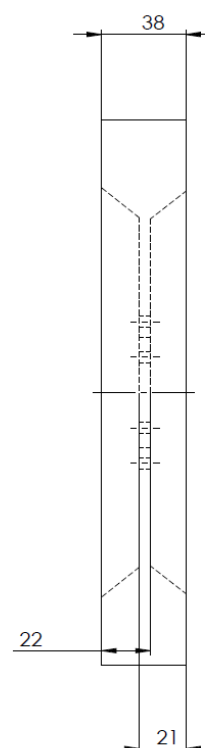
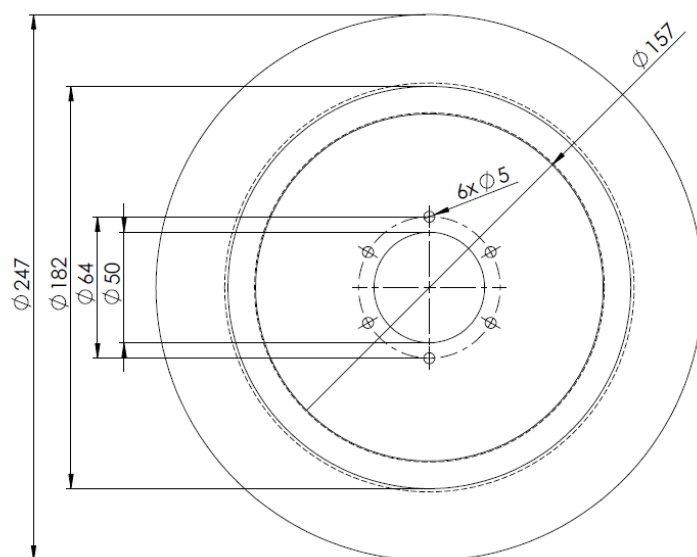
Setrvačnick č.4:  $m_4 = 3,055$  kg

Tab. 1.1: Tabulka hustot materiálů

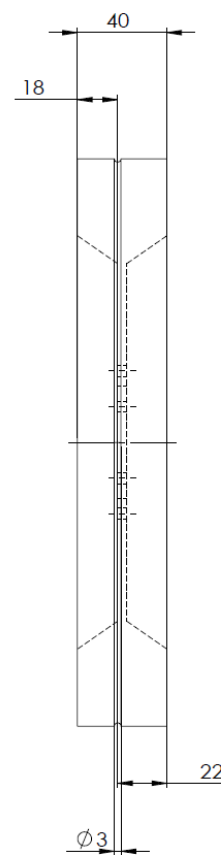
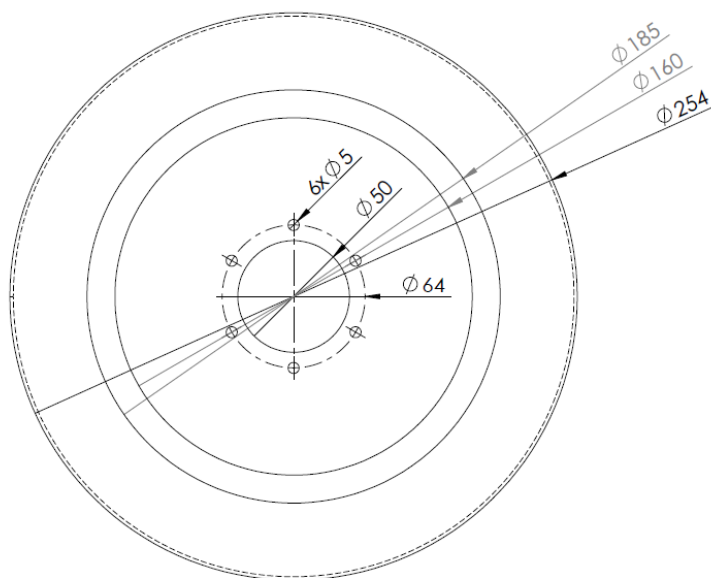
Materiál	$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
Bronz	7 800-8 800
Cín	7 310
Hliník	2 700
Hořčík	1 740
Křemík	2 330
Měď	8 960
Mosaz	8 400-8 750
Nikl	8 900
Železo	7 870
Olovo	11 340
Stříbro	10 500
Titan	4 540
Uhlík	2 250
Zinek	7 140
Platina	21 450
Wolfram	19 300

# Rozměry setrvačníků

Setrvačník č.1.

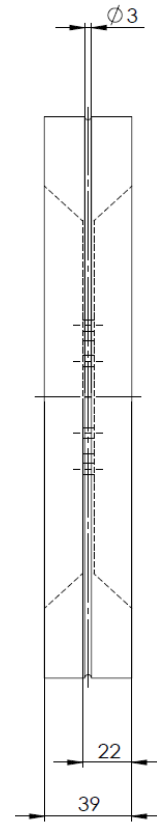
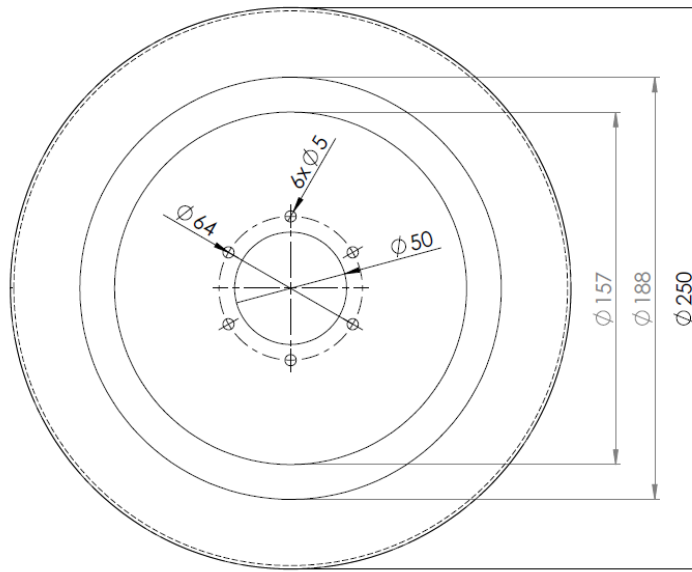


Setrvačník č.2.



## Rozměry setrvačníků

Setrvačník č.3.



#### Setrvačník č.4.

