

**Silesian University of Technology**  
**Faculty of Energy and Environmental Engineering**

*Politechnika Śląska*  
*Wydział Inżynierii Środowiska I Energetyki*  
*Instytut Maszyn I Urządzeń Energetycznych*

## **Mechanical power measurement**

### *Pomiar mocy*

Metrology laboratory  
*Laboratorium miernictwa*

(M-II)

Opracował: mgr inż Marcin Job

**Aim of the exercise:**

The expected aim of this laboratory exercise is the introduction to basic techniques of mechanical and electric power measurement of electric motors. For this purpose, the power of electric motor is measured, allowing the determination of its operating characteristics and the comparison of results from two different methods of mechanical power measurement.

***Cel ćwiczenia:***

*Celem ćwiczenia jest zapoznanie z podstawowymi technikami pomiaru mocy mechanicznej i elektrycznej silników elektrycznych. W tym celu wykonane zostają pomiary mocy silnika elektrycznego pozwalające na wyznaczenie jego charakterystyk i porównanie wyników uzyskanych dwoma metodami pomiaru mocy mechanicznej.*

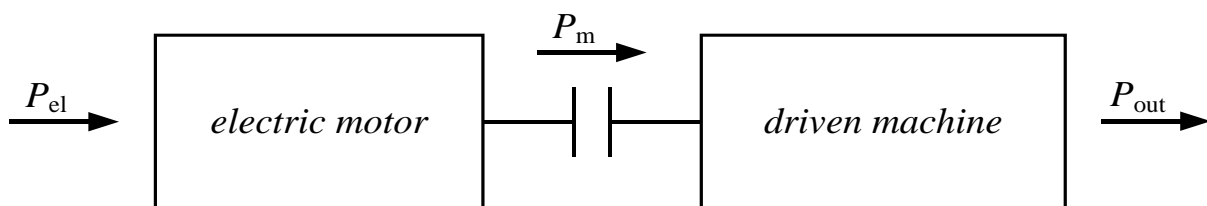
## 1. General scheme of the system // *Ogólny schemat układu*

In figure 1 is presented a general scheme of a system powered by electric motor, in which can be distinguished:

- Electric power supplied to the motor ( $P_{el}$ )
- Mechanical (effective) power ( $P_m$ )
- Power output used by a driven machine or device ( $P_{out}$ )

// *Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu napędowego, w którym można wyróżnić:*

- *moc elektryczna na wejściu silnika (w tym przypadku silnik elektryczny trójfazowy)*
- *moc mechaniczna (moc efektywna)*
- *moc użyteczna (zależna od rodzaju napędzanego urządzenia)*



**Figure 1. General scheme of a system powered by electric motor // *Ogólny schemat układu napędowego***

The objective of laboratory exercise is to measure the electric power  $P_{el}$  and mechanical power  $P_m$  of a motor, which allows to determine electric (internal) efficiency of the motor  $\eta_{el}$  using the relation:

// *Tematem ćwiczenia jest pomiar mocy elektrycznej  $P_{el}$  i mechanicznej  $P_m$ , co pozwala określić sprawność elektryczną silnika  $\eta_{el}$  z zależności:*

$$\eta_{el} = \frac{P_m}{P_{el}} \quad (1)$$

Power output  $P_{out}$  is the part of mechanical power, which is effectively used or converted into another type of energy by driven machine. The methods used to measure the power output depend on the type of driven machine or device.

// *Moc wyjściowa  $P_{out}$  jest częścią mocy mechanicznej, która jest efektywnie wykorzystana lub przekształcona w inny rodzaj energii przez napędzane urządzenie. Metoda pomiaru mocy użytecznej zależy od rodzaju urządzenia napędzanego.*

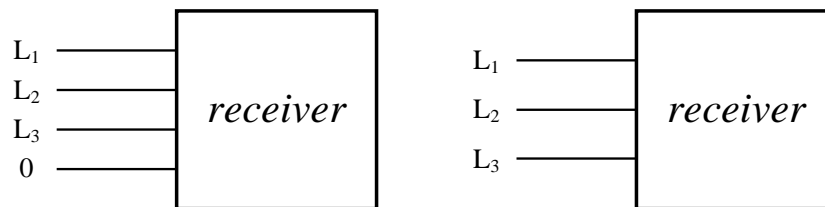
## 2. Electric power measurements // Pomiar mocy elektrycznej

Three-phase electric power systems have at least three conductors carrying alternating current voltages that are offset in time by one-third of the period. It is commonly used to power large motors and other heavy loads. The receiver of electric power in three-phase system can be connected in two ways:

- in four-wire power network (with neutral)
- in three-wire power network

// Trójfazowy system zasilania energii elektrycznej zawiera co najmniej trzy przewody przesyłające prąd zmiennego napięcia, w których napięcie jest przesunięte w czasie o jedną trzecią okresu. Jest on powszechnie używany do zasilania odbiorników dużej mocy. Odbiornik mocy elektrycznej w układzie trójfazowym może być podłączony na dwa sposoby:

- w układzie czteroprzewodowym (z przewodem zerowym)
- w układzie trójprzewodowym

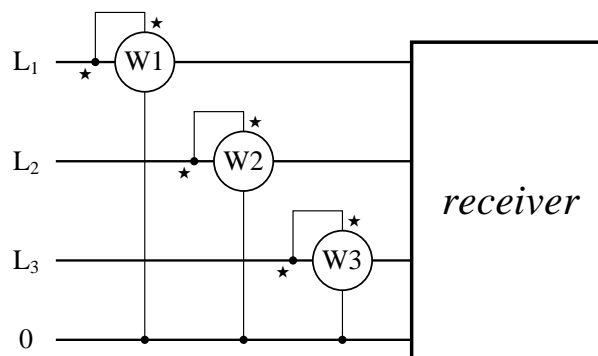


**Figure 2. Receivers of electric power in four-wire system and in three-wire system**

// Odbiorniki mocy elektrycznej w układzie czteroprzewodowym oraz w układzie trójprzewodowym

In four-wire power network to measure active power in the case of asymmetrical phase load should be used 3 watt-meters according to the scheme:

// W układzie 4-przewodowym do pomiaru mocy czynnej w przypadku niesymetrycznego obciążenia faz należy stosować 3 watomierze wg schematu:



**Figure 3. Active power measurement of receiver in four-wire system**

// Pomiar mocy czynnej odbiornika w układzie czteroprzewodowym

Total active power  $P_{el}$  consumed by the receiver is the sum of the individual wattmeter's indications:

// Całkowita moc czynna pobierana przez odbiornik jest sumą wskazań poszczególnych watomierzy:

$$P_{el} = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} \quad (2)$$

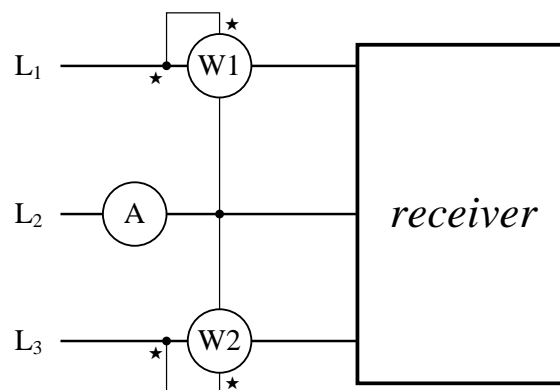
If the load of each phase is the same (the receiver is symmetric) you can use one wattmeter, and the total active power  $P_{el}$  of the four-wire system is three times higher than the indication of the wattmeter:

*// Jeżeli obciążenie każdej fazy jest jednakowe (odbiornik jest symetryczny) można zastosować jeden watomierz, a całkowita moc czynna  $P_{el}$  układu trójfazowego jest trzykrotnie większa od wskazania watomierza:*

$$P_{el} = 3 \cdot P_W \quad (3)$$

When the receiver is connected to a three-wire power network, to measure the active power two watt-meters are used, connected in the Aron system. In this system, watt-meter's current circuits are connected to any two phases of the three-phase system, and the ends of voltage circuits are connected to the phase, which is not connected with current circuits. In presented system the current amperage measurement by ammeter has only a supporting role. Measurements of active power in Aron system are correct both in symmetric and asymmetric load of individual phases. The measurement system is illustrated in figure 4.

*// Jeżeli odbiornik podłączony jest w układzie trójprzewodowym, to do pomiaru mocy czynnej wykorzystuje się dwa watomierze, podłączane w układzie Arona. W układzie tym obwody prądowe watomierzy włączane są w dwie dowolne fazy układu trójfazowego, a końce obwodów napięciowych łączą się z fazą, do której nie są włączone obwody prądowe. W przedstawionym układzie amperomierz pełni jedynie rolę pomocniczą. Pomiaru mocy czynnej w układzie Arona są poprawne zarówno przy symetrycznym jak i niesymetrycznym obciążeniu poszczególnych faz. Układ pomiarowy przedstawiono na schemacie poniżej:*



**Figure 4. Active power measurement of receiver in three-wire power network (Aron system)**

*// Pomiar mocy czynnej odbiornika w układzie trójprzewodowym (układ Arona)*

Total active power  $P_{el}$  consumed by the receiver is the sum of the watt-meter's indications:

*// Całkowita moc czynna  $P_{el}$  pobierana przez odbiornik jest sumą wskazań watomierzy:*

$$P_{el} = P_{W1} + P_{W2} \quad (4)$$

### 3. Mechanical power measurements // *Pomiar mocy mechanicznej*

Measurement of mechanical power cannot be done directly. There are several indirect methods of power measurement, which, due to the energy change in measured system, can be classified into non-destructive, destructive and special.

*// Pomiar mocy mechanicznej jest czynnością, której nie da się wykonać bezpośrednio. Istnieje kilka pośrednich sposobów pomiaru mocy, które ze względów energetycznych można podzielić na nieniszczące, niszczące i specjalne.*

- **Non-destructive methods** of power measurement are used to measure indicated power (internal) of motors or working machines operating in a periodic manner. They consist in determining the indicator diagrams of the indicated work with a known rotational speed of the machine. An important advantage here is the ability to measure power of devices in real conditions, without introducing additional loads.

*// Nieniszczące sposoby pomiaru mocy stosuje się do pomiaru mocy indykowanej (wewnętrznej) silników lub maszyn roboczych działających w sposób periodyczny. Polegają one na wyznaczaniu z wykresów indykatorowych pracy indykowanej przy znanej prędkości obrotowej maszyny. Ważną zaletą jest tutaj możliwość pomiaru mocy urządzenia w warunkach rzeczywistych, bez wprowadzania dodatkowego obciążenia.*

- **Destructive methods** are based on the change of mechanical work to a different form of energy more convenient to measure, e.g. into heat or electricity, or to a torque and rotational speed with loading motor with brake. The conversion of mechanical energy into heat does not give very accurate results, due to the large energy losses. In the method using conversion to electric energy it is necessary to know the efficiency characteristics of generator depending on the rotational speed and load. Most often effective power is determined in the test with a motor load by means of the brake.

Destructive methods are used for example in determining the characteristics of the motor and in the preparation of energy balances of the devices. These methods do not allow for the continuous power measurement in real conditions, i.e. without removing the connected machine from the motor.

*// Metody niszczące polegają na zmianie pracy mechanicznej na inny rodzaj energii wygodniejszy do mierzenia, np. na ciepło lub energię elektryczną, lub też momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej przy obciążeniu silnika za pomocą hamulca. Przemiana energii mechanicznej na ciepło nie daje zbyt dokładnych wyników, ze względu na duże straty, natomiast przy metodzie wykorzystującej zamianę energii mechanicznej na elektryczną konieczna jest znajomość sprawności prądnicy w zależności od obrotów i obciążenia, co nie zawsze jest znane. Najczęściej wyznacza się moc efektywną na stanowisku badawczym przy obciążeniu silnika za pomocą hamulca.*

*Sposób ten jest stosowany m.in. przy wyznaczaniu charakterystyk silnika i sporządzaniu bilansów urządzeń. Metody te nie pozwalają na ciągły pomiar mocy w warunkach rzeczywistych, tzn. bez odłączania silnika od napędzanej maszyny roboczej.*

- In difficult cases a **special methods** are used, which measures torque without destroying the power by means of the brake. Motor load provides driven machine here. For this type of measurement coupling dynamometers or torsionmeters are used.

*// W trudnych przypadkach stosuje się metody specjalne, polegające na pomiarze momentu obrotowego bez niszczenia mocy za pomocą hamulca. Obciążenie silnika stanowi tu napędzana maszyna robocza. Do tego typu pomiarów stosuje się dynamometry sprzęgowe lub torsjometry.*

Mechanical power  $P_m$  is obtained by multiplying the torque  $M$  and angular speed  $\omega$ :

*// Moc mechaniczna jest iloczynem momentu mechanicznego  $M$  i prędkości kątowej  $\omega$ :*

$$P_{ef} = M \cdot \omega \quad (5)$$

### 3.1. Angular velocity measurement // Pomiar prędkości kątowej

Measurement of the rotational velocity  $n$  (defined as number of rotations in period of time, here rpm – *rotations per minute*) is performed by means of optical tachometer counting pulses of reflected light. The motor is loaded by the band-brake, with a reflective element located on brake disc. The measured rotational velocity shall be converted into angular velocity  $\omega$  (rad/s) according to the following equation:

*// Pomiaru prędkości obrotowej  $n$  (1/min) wykonuje się za pomocą tachometru optycznego zliczającego odbite impulsy świetlne. Silnik obciążony jest hamulcem taśmowym, na tarczy którego umieszczony jest srebrny prostokąt odbijający światło. Wynik pomiaru należy przekształcić na prędkość kątową  $\omega$  (rad/s) według wzoru:*

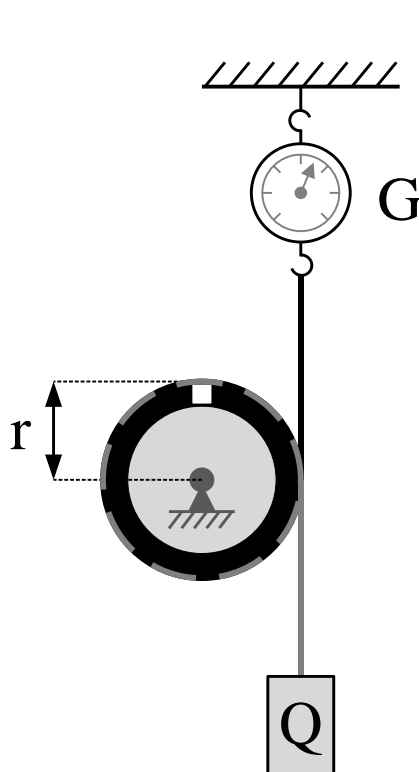
$$\omega = n \cdot \frac{2\pi}{60} \quad (6)$$

### 3.2. Torque measurement using the brake (1st method)

*// Pomiar momentu mechanicznego za pomocą hamulca (metoda 1)*

Torque (moment of force) is the tendency of a force to rotate an object about an axis. The motor is loaded by the band-brake producing friction torque (torque caused by the frictional force that occurs when two objects in contact move), which causes a change of mechanical energy into heat.

*// Silnik obciążony jest hamulcem taśmowym wytwarzającym moment tarcia, który powoduje zmianę energii mechanicznej na ciepło.*



The value of torque  $M_1$  on the brake shaft can be calculated by multiplying the band friction force on brake disc  $T$  by a radius of the brake disc  $r$ :

*// Wartość momentu siły  $M_1$  na wale hamulca można wyznaczyć mnożąc siłę tarcia taśmy o tarczę hamulca  $T$  przez promień tarczy hamulca  $r$ :*

$$M_1 = T \cdot r \quad (7)$$

The radius of brake disc equals  $r = 0,14 \text{ m}$ .

*// Promień tarczy hamulca wynosi  $r = 0,14 \text{ m}$ .*

The band friction force on brake disc  $T$  is the difference between mass indication  $Q$  and dynamometer indication  $G$ :

*// Siła tarcia liny o tarczę hamulca  $T$  jest różnicą wskazań masy  $Q$  i dynamometru  $G$ :*

$$T = (Q - G) \cdot g \quad (8)$$

where  $g$  is the gravitational acceleration, for calculations take  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

*// gdzie  $g$  to przyspieszenie ziemskie,*

Mechanical power for measurements by 1st method  $P_{m.1}$ :

*// Moc mechaniczna dla pomiaru pierwszą metodą:*

$$P_{m.1} = M_1 \cdot \omega \quad (9)$$

**Figure 5. The band-brake**  
*// Hamulec taśmowy silnika*

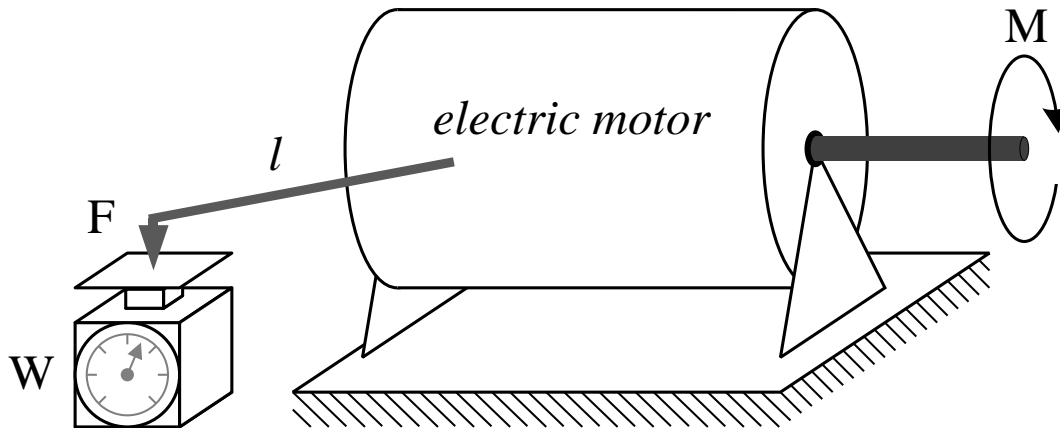
### 3.3. Torque measurement using the oscillating motor suspension (2nd method)

*// Pomiar momentu mechanicznego przez wahliwe zawieszenie silnika (metoda 2)*

Another method of measuring torque on the motor shaft is its oscillating suspension. In normal motor attachment torque on the shaft is transmitted electromagnetically to the body and compensated by the reactions of the body attachment. When the motor body is mounted in bearings (as shown in Figure 6), the torque  $M$  is balanced by the force  $F$ , which is measured using the lever arm pressing the weight (reactions in bearings pass through the rotation axis and do not have torque).



// Innym sposobem pomiaru momentu siły na wale silnika jest jego wahliwe zawieszenie. Przy normalnym zamocowaniu silnika moment siły na jego wale jest przenoszony elektromagnetycznie na korpus i równoważony przez reakcje umocowania korpusu. Przy zamocowaniu korpusu silnika w łożyskach (jak na schemacie poniżej) moment siły  $M$  jest równoważony przez siłę  $F$ , którą mierzy się za pomocą wagi (reakcje w łożyskach przechodzą przez oś obrotu i nie dają momentu).



**Figure 6. Torque measurement using the oscillating motor suspension**  
*// Pomiar momentu siły przez wahliwe zawieszenie silnika*

The value of torque  $M_2$  is given by:

// Wartość momentu siły  $M_2$  określa wzór:

$$M_2 = F \cdot l \quad (10)$$

where  $l$  is the length of the lever arm from motor body, amounting  $l = 0,635 \text{ m}$ .

// gdzie  $l$  jest długością ramienia korpusu silnika, wynosi  $l = 0,635 \text{ m}$ .

The force  $F$  is determined using the weight indication  $W$ :

// Siła  $F$  wyznaczana jest za pomocą wagi szalkowej, poprzez odczyt wychylenia wskazówki  $W$ :

$$F = W \cdot g \quad (11)$$

Mechanical power for the measurements by 2nd method  $P_{m.2}$ :

// Moc mechaniczna dla pomiaru drugą metodą:

$$P_{m.2} = M_2 \cdot \omega \quad (12)$$

#### 4. Course of the exercise // Przebieg ćwiczenia

Table of measurements and table of results in a form prepared for printing are located on the last page of these instructions. **Two sets of tables** must be prepared - for measuring with increasing and decreasing load of the brake.

- 1) Measure the mass  $Q$  of all weights, which are used in subsequent steps to load the brake band (the number of weights from 1 to 5).
- 2) With the motor under zero load ( $Q = 0$ ) perform a first series of measurements for: dynamometer  $G$ , the weight  $W$ , current on the ammeter  $I$ , power on watt-meters  $P_{W1}$  and  $P_{W2}$  and the rotational speed  $n$ .
- 3) Load the brake with one weight and make the next series of measurements.
- 4) Repeat step 3 for the number of weights from 2 to 5.
- 5) In analogy to the steps 2-4 make the measurements with offloading the brake, starting from the load of 5 weights and ending at zero load.

// Tabela pomiarowa oraz tabela wyników w formie przygotowanej do wydruku znajdują się na ostatniej stronie instrukcji. Należy przygotować **dwie tabele pomiarowe** – dla pomiarów przy obciążaniu oraz odciążaniu hamulca:

- 1) Dokonać pomiarów masy  $Q$  dla wszystkich używanych ciężarków hamulca wykorzystując wagę szalkową (liczba ciężarków od 1 do 5).
- 2) Przy obciążeniu „zerowym” silnika ( $Q = 0$ ) wykonać pierwszą serię pomiarów: dynamometru  $G$ , wskazania wagi  $W$ , natężenia prądu na amperomierzu  $I$ , mocy na watomierzach  $P_{W1}$  i  $P_{W2}$ , oraz liczby obrotów  $n$ .
- 3) Obciążyć hamulec jednym ciężarkiem i wykonać następną serię pomiarową.
- 4) Powtórzyć krok 3 dla liczby ciężarków 2 do 5.
- 5) Analogicznie do kroków 2-4 dokonać pomiarów przy odciążaniu hamulca rozpoczynając od pomiarów dla obciążenia 5 ciężarkami i kończąc na pomiarach przy obciążeniu „zerowym”.

#### 5. Calculations // Opracowanie wyników

- a) For all measures shall be calculated: electric power  $P_{el}$ , angular speed  $\omega$ , and for both measuring methods: torque  $M_1$  and  $M_2$ , mechanical power  $P_{m,1}$ ,  $P_{m,2}$  and electric efficiency of the motor  $\eta_{el,1}$ ,  $\eta_{el,2}$ . Summarize the results in the table of results.
- b) On the basis of measurements and of the results of calculations create charts with the following characteristics of the analyzed motor:

- |      |                              |                              |
|------|------------------------------|------------------------------|
| I.   | $N_{el} = f(\omega)$         |                              |
| II.  | 1. $P_{m,1} = f(\omega)$     | 2. $P_{m,2} = f(\omega)$     |
| III. | 1. $M_1 = f(\omega)$         | 2. $M_2 = f(\omega)$         |
| IV.  | 1. $\eta_{el,1} = f(\omega)$ | 2. $\eta_{el,2} = f(\omega)$ |

Perform the characteristics separately for the increasing and decreasing motor load.

//

- a) Dla wszystkich pomiarów obliczyć moc elektryczną  $P_{el}$ , prędkość kątową  $\omega$ , oraz dla obu metod pomiaru mocy mechanicznej odpowiednio: momenty siły  $M_1$ ,  $M_2$ , moce mechaniczne  $P_{m.1}$ ,  $P_{m.2}$  i sprawności elektryczne silnika  $\eta_{el.1}$ ,  $\eta_{el.2}$ . Wyniki zestawić w tabeli wyników.
- b) Na podstawie przeprowadzonych pomiarów i otrzymanych wyników obliczeń utworzyć wykresy z następującymi charakterystykami badanego silnika:

- |      |                              |                              |
|------|------------------------------|------------------------------|
| I.   | $N_{el} = f(\omega)$         |                              |
| II.  | 1. $P_{m.1} = f(\omega)$     | 2. $P_{m.2} = f(\omega)$     |
| III. | 1. $M_1 = f(\omega)$         | 2. $M_2 = f(\omega)$         |
| IV.  | 1. $\eta_{el.1} = f(\omega)$ | 2. $\eta_{el.2} = f(\omega)$ |

Charakterystyki wykonać dla pracy z rosnącym oraz malejącym obciążeniem silnika.

## 6. Report // Sprawozdanie

The report shall include:

1. Title page.
2. Objective of the exercise.
3. Theoretical review (short and specific)
4. Sample calculations.
5. Tables of measurements and tables of results.
6. Characteristics of analyzed motor.
7. Comments and conclusions.

// Sprawozdanie powinno zawierać:

1. Stronę tytułową.
2. Cel ćwiczenia.
3. Wstęp teoretyczny.
4. Przykładowe obliczenia.
5. Dołączone tabele pomiarowe oraz tabele wyników.
6. Wykresy charakterystyk badanego silnika.
7. Uwagi i wnioski.

<b>Time:</b>		<b>Date:</b>		<b>LAB No.:</b>	M-2	<b>Group No.:</b>	
--------------	--	--------------	--	-----------------	-----	-------------------	--

TABLE OF MEASUREMENTS								
No.	Number of weights	Mass $Q$ , kg	Dynamometer $G$ , kg	The weight indication $W$ , kg	Amperage $I$ , A	Electric power $P_{W1}$ , W	Electric power $P_{W2}$ , W	Rotational speed $n$ , rpm
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

TABLE OF RESULTS								
No.	Electric power $P_{el}$ , W	Angular speed $\omega$ , rad/s	Torque $M_1$ , Nm	Mechanical power $P_{m1}$ , W	Electric efficiency $\eta_{el.1}$ , %	Torque $M_2$ , Nm	Mechanical power $P_{m2}$ , W	Electric efficiency $\eta_{el.2}$ , %
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

<b>GODZ:</b>		<b>DATA:</b>		<b>NR LAB:</b>	M-2	<b>NR GRUPY:</b>	
--------------	--	--------------	--	----------------	-----	------------------	--

TABELA POMIAROWA								
L.P.	Liczba ciężarków	Masa $Q$ , kg	Dynamometr $G$ , kg	Wskazanie wagi $W$ , kg	Natężenie prądu $I$ , A	Moc $P_{W1}$ , W	Moc $P_{W2}$ , W	L. obrotów $n$ , 1/min
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

TABELA WYNIKÓW								
L.P.	Moc elektryczna $P_{el}$ , W	Prędkość kątowa $\omega$ , rad/s	Moment siły $M_1$ , Nm	Moc mechaniczna $P_{m1}$ , W	Sprawność elektryczna $\eta_{el.1}$ , %	Moment siły $M_2$ , Nm	Moc mechaniczna $P_{m2}$ , W	Sprawność elektryczna $\eta_{el.2}$ , %
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								