

WFiiS	Imię i nazwisko: 1. 2.		ROK	GRUPA	ZESPÓŁ
PRACOWNIA FIZYCZNA I i II	TEMAT:				NR ĆWICZENIA
Data wykonania:	Data oddania:	Zwrot do poprawy:	Data oddania:	Data zliczenia:	OCENA

Cel ćwiczenia:

Doświadczalna ocena w oparciu o zasadę zachowania energii sprawności modelowej energii elektrowni wodnej. Ilościowa ocena poszczególnych rodzajów strat ograniczających sprawność procesów przetwarzania energii.

Wstęp teoretyczny:

W tym ćwiczeniu najważniejszą dla nas rzeczą będzie uzyskanie wartości sprawności modelowej elektrowni wodnej oraz zaobserwowanie i wytłumaczenie powstania strat energii w trakcie przetwarzania energii mechanicznej na energię elektryczną.

Sprawność przetwarzania energii określaną jako stosunek energii uzyskanej na wyjściu modelowej elektrowni wodnej do energii wejściowej wynosi:

$$\eta = \frac{E_{wy}}{E_{we}}$$

gdzie E_{we} to energia potencjalna wody o masie m podniesionej na wysokość h ($E_{we} = mgh$, $g \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$), a E_{wy} (energia wyjściowa) może być obliczona jako całka z mocy elektrycznej będącej iloczynem prądu i napięcia na odbiorniku energii $P_{el} = UI$. Zatem:

$$\eta = \frac{\int_0^t P_{el}(t) dt}{mgh}$$

Oczywiście sprawność jest liczbą mniejszą niż 1, co oznacza, że tylko pewien ułamek energii wejściowej jest przetwarzany na energię wyjściową. Nie oznacza to złamania prawa zachowania energii, lecz po prostu fakt, że energia wejściowa przetwarza się nie tylko na energię wyjściową, ale również na energię ΔE_i różnego rodzaju strat:

$$E_{we} = E_{wyj} + \sum_i E_i$$

W układzie modelowej elektrowni wodnej można wyróżnić cztery rodzaje strat energii:

1. straty mechaniczne;
2. straty hydrauliczne;
3. straty energii w turbinie;
4. straty energii w prądnicy;

Straty elektryczne wynikają z wytwarzania ciepła Joule'a wewnątrz prądnicy. Energię strat związanych z wydzielaniem ciepła na oporności wewnętrznej R_w prądnicy przez wytwarzany przez nią prąd $I(t)$ można obliczyć jako całkę:

$$E_{el} = \int_0^t I^2(t) R_w dt$$

Powyższy wzór nie obejmuje innych strat elektrycznych np. strat wynikające z indukowania prądów wirowych.

Straty mechaniczne wynikają z występowania tarcia na łożyskach turbiny i prądnicy, strat w przekładni pasowej, tarcia szczotek o komutator prądnicy itp.

Straty te można ocenić eksperymentalnie jako iloczyn momentu sił tarcia M i drogi kątovej $2\pi N$, gdzie N jest całkowitą liczbą obrotów:

$$E_{mech} = 2\pi NM$$

Straty hydrauliczne związane są z oporami przepływu w przewodzie doprowadzającym wodę do turbiny. Można je oszacować ze wzoru:

$$E_{hydr} = V \cdot \Delta p,$$

gdzie V jest całkowitą objętością wody, Δp natomiast jest stratą ciśnienia wynikającą z oporów przepływu. Wartość Δp można określić ze wzoru Darcy'ego:

$$\Delta p = \frac{l\rho\bar{v}^2}{r} \Psi(Re),$$

gdzie l to długość przewodu, r jego promień, \bar{v} średnia szybkość przepływu ($\bar{v} = \frac{V}{\pi r^2 t}$), Re

liczba Reynolds'a zdefiniowana dla przepływu w rurze jako $Re = \frac{2r\rho\bar{v}}{\eta}$ (w tym przypadku η jest lepkością cieczy).

Straty w turbinie wodnej przedstawiamy przy pomocy elementarnej teorii działania turbiny. Używana w ćwiczeniu turbina jest modelem tzw. turbiny Peltona, używanej w elektrowniach wodnych, w których mamy duży spad h i względnie mały przepływ.

W turbinie Peltona energia potencjalna jest zamieniana w dyszy całkowicie na energię kinetyczną. Prędkość wypływającej wody v_0 wynika z równania:

$$\frac{\rho v_0^2}{2} = \rho gh - \Delta p,$$

które wyraża przemianę energii potencjalnej jednostkowej objętości wody w zbiorniku (ρgh)

na energię kinetyczną ($\frac{\rho v_0^2}{2}$), z uwzględnieniem omawianej wcześniej straty ciśnienia Δp w przewodzie doprowadzającym.

Strumień wody o prędkości v_0 uderza w łopatki turbiny. Aby uzyskać wysoką sprawność, dążymy do zderzenia sprężystego, co otrzymać można w przybliżeniu przy użyciu wyprofilowanych łopatek, które odwracają o 180° kierunek strumienia.

Łopátka porusza się z prędkością v mniejszą od v_0 . Analiza kinematyczna wskazuje, że odbity strumień ma prędkość równą $2v - v_0$. Energia wytwarzana przez turbinę jest różna od energii kinetycznej strugi padającej i odbitej. Sprawność teoretyczną turbiny można zatem obliczyć jako:

$$\eta_{turb} = \frac{\frac{mv_0^2}{2} - \frac{m(2v - v_0^2)}{2}}{\frac{mv_0^2}{2}} = \frac{4v(v_0 - v)}{v_0^2}$$

Jeżeli określono omawiane powyżej rodzaje strat, eksperymentalną sprawność turbiny oszacować można z wzoru:

$$\eta_{turb} = \frac{E_{wy} + E_{el} + E_{mech}}{E_{wy} - E_{hydr}}$$

Wyniki pomiarów:

Tabela 1

POMIARY PRÓBNE		
obciążenie (liczba żarówek)	napięcie [V]	prąd [mA]
1	2,85	290
2 (szeregowo)	4,6	200
2 (równolegle)	1,6	350

Tabela 2

POMIARY WŁAŚCIWE				
obciążenie liczba żarówek	napięcie [V]	prąd [mA]	czas [s]	P=UI [W]
1	2,8	280	0	0,784
	2,8	270	30	0,756
	2,7	270	60	0,729
	2,6	265	90	0,689
	2,6	265	120	0,689
	2,5	250	150	0,625
	2,5	250	180	0,625
	2,5	250	210	0,625
2 (szeregowo)	4,4	190	0	0,836
	4,4	190	30	0,836
	4,4	190	60	0,836
	4,4	190	90	0,836
	4,3	190	120	0,817
	4,3	190	150	0,817
	4,2	190	180	0,798
	4,2	190	210	0,798
	4,2	190	240	0,798
	4,1	190	270	0,779
	4,1	190	310	0,779
3 (szeregowo)	5,0	160	0	0,800
	5,0	160	30	0,800
	5,0	160	60	0,800
	5,0	160	90	0,800
	5,0	160	120	0,800
	5,0	160	150	0,800
	5,0	160	180	0,800
	5,0	160	210	0,800
	4,9	150	240	0,735

Tabela 3

wysokość h [m]:	5
objętość V [dm ³]:	100
średnica rury Φ [mm]:	15
opór wewnętrzny prądnicy R_w [Ω]:	13
masa wody [kg]:	99,7
przyspieszenie ziemskie g [m/s ²]:	9,81
pomiar napięcia bez obciążenia [V]:	8,5
energia potencjalna wody E_c [J]:	4890

Opracowanie wyników pomiarów:

Poniższa tabela przedstawia średnia moc P_{sr} oraz energię wyjściową E_{wy} uzyskaną w modelu elektrowni wodnej. Wartości te wyliczono ze wzorów:

$$P_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i U_i}{N}$$

$$E_{wy} = P_{sr} \cdot t$$

gdzie N to liczba pomiarów, a t całkowity czas pomiaru.

obciążenie (liczba żarówek)	P_{sr} [W]	E_{wy} [J]
1	0,690	145,0
2 (szeregowo)	0,812	251,7
3 (szeregowo)	0,793	190,3

Jak widać największą moc uzyskujemy dla dwóch żarówek połączonych szeregowo. Tylko 5,1% energii początkowej wody udało się zamienić na energię elektryczną. Niepewność pomiaru obliczono korzystając z prawa przenoszenia niepewności, które w tym przypadku ma postać

$$\Delta E_{wy} = \sqrt{(It\Delta U)^2 + (IU\Delta t)^2 + (Ut\Delta I)^2}$$

i ostatecznie wynosi $\Delta E_{wy} \approx 4J$.

Rzecz godną uwagi są straty elektryczne E_{el} . Zostały one wyznaczone z następującego wzoru:

$$E_{el} = \int_0^t I^2(t) \cdot R_w dt$$

który dla pomiarów wykonanych w równych odstępach czasu sprowadza się do poniższego wyrażenia:

$$E_{el} = I^2 R_w t$$

gdzie t to całkowity czas pomiaru.

W tym przypadku niepewność pomiaru także wyznaczono za pomocą prawa przenoszenia niepewności w postaci

$$\Delta E_{el} = \sqrt{(2IR_w t \Delta I)^2 + (I^2 R_w \Delta t)^2}$$

i ostatecznie wynosi: $\Delta E_{el} = 21J$.

Obliczono, że w modelu elektrowni wodnej straty elektryczne sięgają około 57%, czyli 2884J. Pozostała część, mianowicie około 38%, energii rozproszyła się na innego rodzaju stratach: mechanicznych, hydraulicznych oraz w samej turbinie.

Ze wzoru

$$\eta_{turb} = \frac{E_{wy} + \Delta E_{el} + \Delta E_{mech}}{E_{wy} - \Delta E_{hydr}}$$

oszacowano, że sprawność doświadczalna turbiny wynosi około $\eta_{turb} = 0,891$, czyli prawie 90%.

Wnioski:

W ćwiczeniu wyznaczono ilość energii, która została zamieniona na pracę prądu elektrycznego $E_{wy} = 251,7(4)J$. Jest to około 5,1% energii wejściowej.

Ciekawą rzeczą jest także strata energii w prądnic, która wynosi $E_{el} = 2884(21)J$, czyli około 57% energii wejściowej.

Jednakże najważniejszym faktem, który udało się potwierdzić jest blisko 90% sprawność eksperymentalna turbiny Peltona. Oszacowano, że wynosi ona około $\eta_{turb} = 0,891$.

Zatem potwierdza się, że teoretyczna sprawność takich turbin jest bardzo wysoka i w warunkach optymalnych przekracza 90%.

Załączniki:

[1] – kartka z wynikami pomiarów;