



*Krzysztof Nalewaj, Joanna Pawłat
Jarosław Diatczyk, Ryszard Goleman*

Laboratorium instalacji energii odnawialnych

Część 2

PODRECZNIKI

Laboratorium instalacji energii odnawialnych

Część 2

Podręczniki – Politechnika Lubelska



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Publikacja współfinansowana ze środków Unii Europejskiej w ramach
Europejskiego Funduszu Społecznego

Krzysztof Nalewaj, Joanna Pawłat
Jarosław Diatczyk, Ryszard Goleman

Laboratorium instalacji energii odnawialnych

Część 2



Politechnika Lubelska
Lublin 2014

Recenzenci:

dr hab. inż. Paweł Surdacki, prof. Politechniki Lubelskiej

dr inż. Michał Łanczont

Skład: Paweł Mazurek

Podręcznik przeznaczony dla studentów Studiów Podyplomowych Technologie Energii Odnawialnych realizowanych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej



Publikacja dystrybuowana bezpłatnie.

Publikacja opracowana i finansowana z projektu „Politechnika przyszłości – dostosowanie oferty do potrzeb rynku pracy i GOW”

Projekt „Politechnika przyszłości – dostosowanie oferty do potrzeb rynku pracy i GOW” współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki.

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2014

ISBN: 978-83-7947-035-8

Wydawca: Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej
Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej
ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin
tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl
www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak
www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

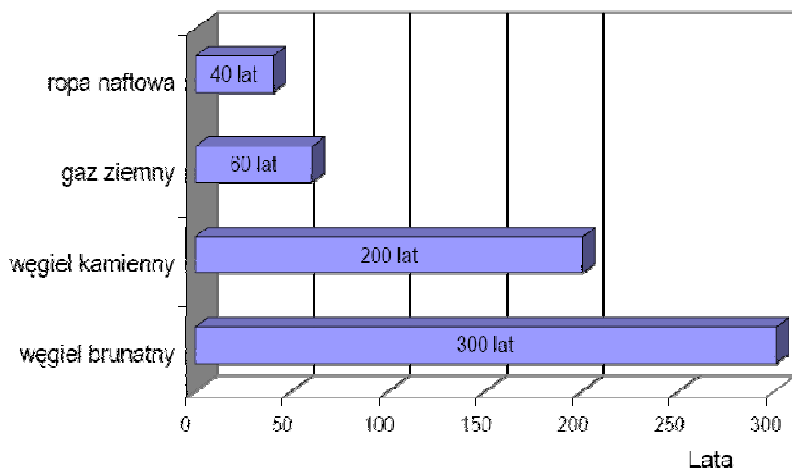
Ćwiczenie 1 BADANIE OGNIWA PALIWOWEGO	7
Ćwiczenie 2 MAŁA ENERGETYKA WODNA	17
Ćwiczenie 3 WYTWARZANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ ZA POMOCĄ MATERIAŁÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH	29
Ćwiczenie 4 BADANIE MODELU POMPY CIEPŁA	40
Ćwiczenie 5 BADANIE OGRZEWACZA WODY Z POMPĄ CIEPŁA TYPU OW-120PC	52
Ćwiczenie 6 BADANIE PANELI FOTOWOLTAICZNYCH	67
Ćwiczenie 7 MODELOWANIE UKŁADÓW CIEPLNYCH METODAMI ELEKTRYCZNYMI	89

Ćwiczenie 1

Badanie ogniwa paliwowego

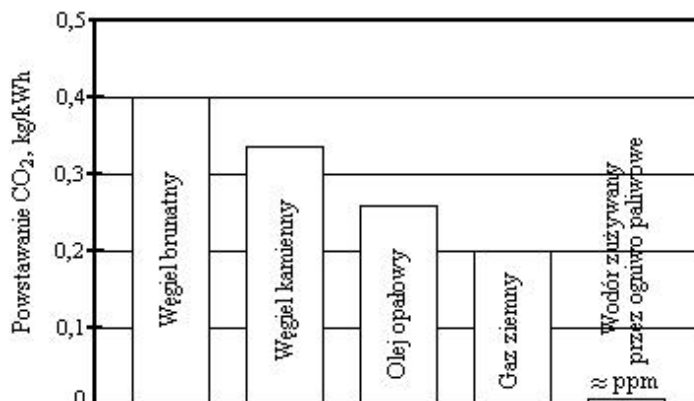
1.1. Wprowadzenie

Na świecie występuje duże uzależnienie różnych gałęzi gospodarki od energii. Niestety zasoby surowców naturalnych, jak ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel kamienny, czy węgiel brunatny nieustannie maleją, a obecna technologia ich pozyskiwania i przetwarzania wpływa w negatywny sposób na stan środowiska naturalnego. Na rysunku 1.1 przedstawiony jest prognozowany czas wyczerpania się nośników energii pierwotnej, a na rysunku 1.2 przedstawiona jest emisja CO₂ różnych nośników energii.



Rys. 1.1. Prognozowany czas wyczerpania się nośników energii pierwotnej

W związku z tym uzasadnione jest dążenie do zastąpienia ich źródłami ekologicznymi, których wykorzystanie nie wpłynie negatywnie na stan środowiska naturalnego, zredukuje ilość odpadów oraz pozwoli zaoszczędzić zasoby surowców naturalnych. Jednym z rozwiązań tych problemów jest zastosowanie ogniw paliwowych zasilanych wodorem.



Rys. 1.2. Emisja CO₂ różnych nośników energii

Wykorzystanie zasobów energii odnawialnej może wzrosnąć dzięki rozwojowi, rozpowszechnieniu i komercjalizacji technologii wodorowej. Wiąże się to bezpośrednio z zastosowaniem ogniw paliwowych do przetwarzania energii chemicznej paliwa w jej użyteczną formę – energię elektryczną i ciepłą. Ogniwa paliwowe otwierają nowe możliwości związane ze sposobami magazynowania energii w postaci wodoru oraz umożliwiają decentralizację miejsc, w których energia jest wytwarzana i wykorzystywana. Ponadto działanie ogniw paliwowych nie powoduje zanieczyszczenia środowiska, ponieważ produktami pracy tych urządzeń są prąd elektryczny, woda, a także ciepło, które może być wykorzystane w celach grzewczych.

Ogniwo paliwowe jest urządzeniem elektrochemicznym, które w bezpośrednim procesie zamienia energię chemiczną zgromadzoną w paliwie na energię elektryczną. Łączy ono w sobie cechy akumulatora i silnika spalinowego. Jest źródłem energii elektrycznej (jak akumulator) i działa w sposób nieprzerwany tak długo, jak długo jest dostarczane do niego paliwo (jak silnik spalinowy). Jednak w porównaniu z silnikiem spalinowym uzyskuje się dużo większą sprawność zamiany energii chemicznej zgromadzonej w paliwie na energię elektryczną. Jako urządzenie elektrochemiczne, ogniwo paliwowe nie podlega ograniczeniom wynikającym z zasady Carnota, która określa sprawność silnika cieplnego. Teoretycznie elektrochemiczne źródło energii elektrycznej, w którym zachodzące reakcje są w pełni odwracalne, mogłoby posiadać sprawność 100%. W rzeczywistości jednak sprawność takiego urządzenia jest niższa i waha się w zakresie od 40% do ponad 60%, w zależności od rodzaju ogniwa paliwowego. Dla porównania teoretyczna sprawność silnika spalinowego, zastosowanego jako napęd pojazdu wynosi około 40%, a w praktyce nie przekracza 25%.

Pierwsze opracowanie opisujące teoretyczne podstawy pracy ogniwa paliwowego zostało opublikowane w 1839 roku w Magazynie Filozoficznym. Autorem publikacji był szwajcarski chemik niemieckiego pochodzenia, Christian Friedrich Schonbein, który w 1838 roku odkrył zasadę działania ogniwa wodorowego. Na podstawie wspomnianej publikacji w roku 1839 sir William Grove, walijski sędzia i naukowiec,

skonstruował i zademonstrował pierwszy model działającego ogniwa wodorowego. Obecnie jest on uznawany za wynalazcę ogniwa paliwowego. Prototypowy egzemplarz wykorzystywał wodór jako paliwo i tlen jako utleniacz. Elektrody wykonane były z pasków platynowych, natomiast rolę elektrolitu spełniał rozcieńczony kwas siarkowy.

Odkryte zjawisko pozostawało ciekawostką laboratoryjną przez wiele lat do chwili, gdy pojawiła się potrzeba zainstalowania źródła energii elektrycznej oraz wody pitnej na statkach kosmicznych. Naukowcy z NASA rozwinęli tą technologię do poziomu umożliwiającego wykorzystanie jej w pojazdach kosmicznych m. in. Apollo, Gemini i Skylab.

Państwa o wysokim wskaźniku rozwoju gospodarczego przeznaczają olbrzymie nakłady finansowe na prowadzenie badań w tej dziedzinie techniki oraz planują i realizują inwestycje w tym zakresie. Obecnie ogniwa paliwowe są stosowane jako źródła energii elektrycznej i cieplnej w systemach energetyki rozproszonej, jako źródła zasilania w telekomunikacji, jako źródła zasilania pomocniczego w energetyce oraz jako źródła energii dla pojazdów samochodowych i innych pojazdów mechanicznych. Według zastosowania i związanej z tym mocy elektrycznej ogniwa paliwowe można podzielić na następujące grupy:

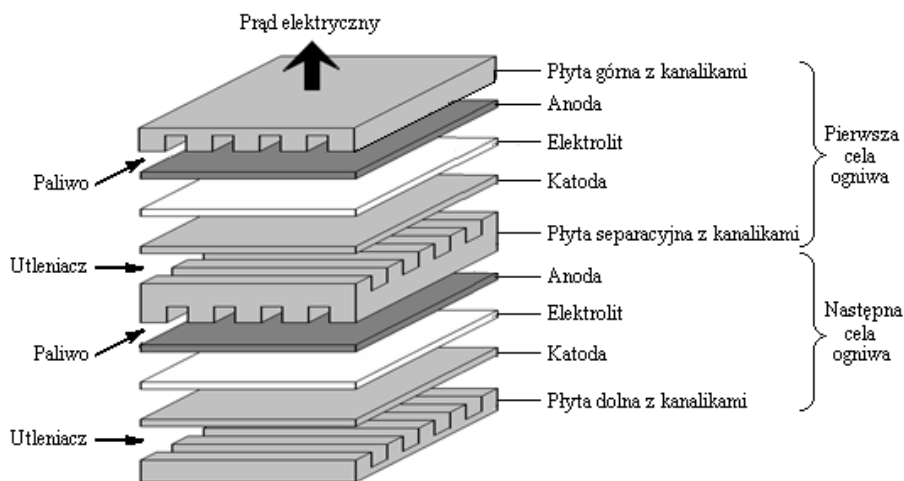
- układy przenośne małej mocy elektrycznej (poniżej 0,5 kWe), oparte na ogniwach PEMFC i DMFC (zdalne urządzenia, laptopy, telefony komórkowe, aparaty fotograficzne itd.);
- stacjonarne układy małej mocy w przedziale od 1 kWe do 10 kWe, głównie oparte na ogniwach PEMFC i SOFC do zastosowań domowych i użyteczności publicznej (pralnie, zasilanie awaryjne, sygnalizacja świetlna itp.);
- ogniwa PEMFC w sektorze transportu w zakresie mocy 50–100 kWe i wyższej (samochody, pojazdy ciężkie czy wózki widłowe);
- stacjonarne układy średniej mocy (od 10 kWe do 200 kWe i wyżej), mające zastosowania komunalne i inne (szkoły, szpitale, komisariaty policji, budynki przemysłowe, centra obliczeniowe, terminale lotnicze, utylizacja odpadów, małe elektrownie i obiekty wojskowe);
- stacjonarne układy energetyczne dużej mocy (powyżej 1 MW). Ogniwa te zasilają elektrownie, dostarczając energię w układach skojarzonych i kombinowanych (obecnie trochę powyżej 10 MW) oraz duże zakłady przemysłowe.

1.2. Budowa i zasada działania ogniwa paliwowego

Stos ogniw paliwowych składa się z pojedynczych elementów (cel), z których każdy zawiera anodę, katodę i matrycę elektrolitową. Elementy są przedzielone płytami bipolarnymi, wyposażonymi w kanały dopływu reagentów (paliwa i utleniacza). Na rysunku 1.3 przedstawiono budowę ogniwa paliwowego.

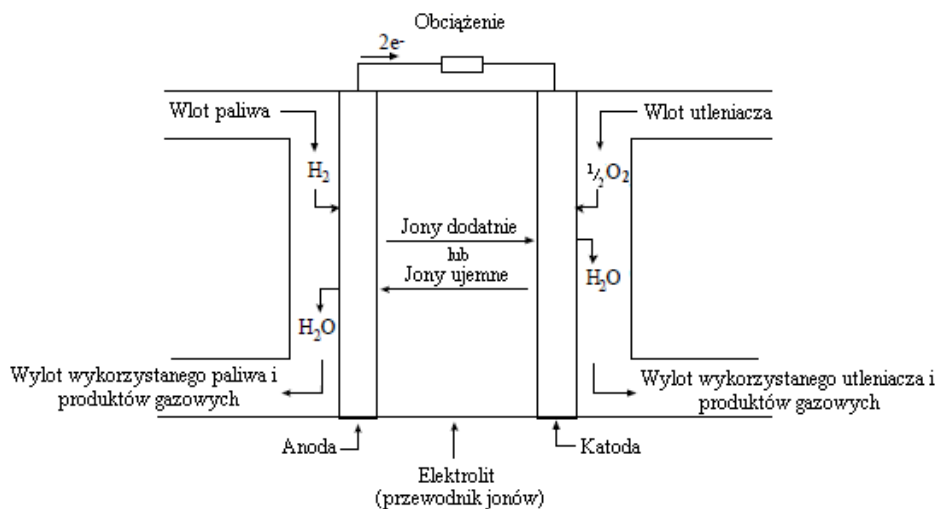
W ogniwie paliwowym następuje bezpośrednia przemiana energii chemicznej w energię elektryczną. Jest to urządzenie, w którym paliwo (wodór) jest doprowa-

dzane w sposób ciągły do anody, a utleniacz (tlen) w stanie czystym lub mieszaninie jest podawany w sposób ciągły do katody.



Rys. 1.3. Budowa ogniwa paliwowego (źródło: www.imiue.polsl.pl)

Procesom elektrochemicznym towarzyszy przepływ elektronów od anody do katody. Zamknięcie obwodu odbywa się dzięki jonom, które przemieszczają się w elektrolicie. W wyniku elektrochemicznej reakcji wodoru i tlenu powstaje prąd elektryczny, woda i ciepło. Zasadę działania ogniwa paliwowego przedstawiono na rysunku 1.4.



Rys. 1.4. Zasada działania ogniwa paliwowego

Siła elektromotoryczna pojedynczego ogniwa wynosi około 1V, a natężenie prądu elektrycznego w obwodzie zależy od powierzchni elektrod. Napięcie można zwiększać łącząc ze sobą szeregowo wiele takich ogniw, zwiększając w ten sposób ich wydajność.

Tlen jest pobierany zwykle z powietrza atmosferycznego, natomiast wodór jest dostarczany w postaci czystej lub jest wytwarzany w urządzeniu zwanym reformerem, w którym gaz powstaje w procesie rozkładu paliwa pierwotnego. Paliwem tym może być gaz ziemny, destylaty ropy naftowej, płynny propan, zgazyfikowany węgiel oraz paliwa odnawialne, takie jak etanol, metanol. Można stosować również gazy wydzielające się ze składowisk odpadów organicznych lub z oczyszczalni ścieków. W procesie wytwarzania wodoru w reformerze są emitowane zanieczyszczenia w ilości znikomej w porównaniu z ilościami emitowanymi np. podczas procesów spalania paliw pierwotnych w ciepłych układach energetycznych.

1.3. Klasyfikacja ogniw paliwowych

Opracowano już wiele typów ogniw paliwowych, a klasyfikuje się je poprzez określenie rodzaju elektrolitu:

- AFC** – Alkaline Fuel Cell (alkaliczne ogniwa paliwowe)
- PEMFC** – Proton Exchange Membrane Fuel Cell (ogniwa paliwowe z polimerową membraną wymiany jonów)
- PAFC** – Phosphoric Acid Fuel Cell (ogniwa paliwowe z kwasem fosforowym)
- MCFC** – Molten Carbonate Fuel Cell (ogniwa paliwowe ze stopionym węglanem)
- SOFC** – Solid Oxide Fuel Cell (ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem).

Parametry wymienionych ogniw paliwowych przedstawiono w tabeli 1.1

Tab. 1.1 Parametry ogniw paliwowych

Ogniwo paliwowe	Elektrolit	Elektrody	Paliwo	Temp. pracy i zastosowanie	Sprawność %
AFC	Roztwór wodorotlenku potasu	Różne metale	Wodór, metan (bez CO ₂)	100-200°C Technika wojsk. i kosmiczna	40-50
PEMFC	Jonowymienna membrana z polimeru	Platyna	Wodór, metanol (bez CO)	Do 120°C Transport, cele grzewcze	40-50

PAFC	Kwas fosforowy	Platyna naniesiona na podłoże węglowe	Wodór, gaz ziemny, nafta, (bez CO)	150-200°C Źródło energii elektr. i ciepłej	40-50
MCFC	Mieszanina węglanów alkalicznych	A-porowaty nikiel K-tlenek niklu	Gaz ziemny, metanol, biogaz	600-700°C Cele grzewcze	ponad 60
SOFC	Stały tlenek metalu, najczęściej cyrkonu ZrO_2	A-porowaty nikiel K-magnez	Gaz ziemny, biogaz	900-1000°C Cele grzewcze, źr. zas. pom. w energetyce	ponad 60

Odmianą ogniwa polimerowego jest ogniwo typu DMFC (Direct Methanol Fuel Cell). Ogniwo tego typu jest wykorzystywane w ćwiczeniu.

1.4. Zalety i wady ogniw paliwowych

Do zalet ogniw paliwowych należy zaliczyć:

- względnie prosta konstrukcja
- duża sprawność przetwarzania energii chemicznej na elektryczną
- sprawność ogniwa paliwowego w niewielkim stopniu zależy od wymiarów urządzenia
- produkty uboczne jak H_2O , CO_2 , N_2 są czyste i bez zapachu
- mała emisja SO_2 , NO_x , węglowodorów, tlenków węgla i cząstek stałych
- niski poziom hałasu
- system modułowy (łatwa, szybka i ekonomiczna budowa łatwość rozbudowy)
- mogą pracować bez przerwy o ile tylko doprowadzane jest paliwo i utleniacz
- odporność na bardzo duże przeciążenia chwilowe oraz możliwość pracy z niskimi obciążeniami, brak biegu jałowego.

Wady ogniw paliwowych:

- niskie napięcie prądu uzyskiwane z pojedynczej celi ($< 1V$)
- produkcja prądu stałego (czasami jest to zaletą)
- drogie materiały do produkcji katalizatorów
- stosunkowo niewielkie moce uzyskiwane z modułu.

2. INSTRUKCJA WYKONANIA ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z podstawowymi parametrami i zasadą działania ognia paliwowego typu DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) w konfiguracji z układem ładowania akumulatora.

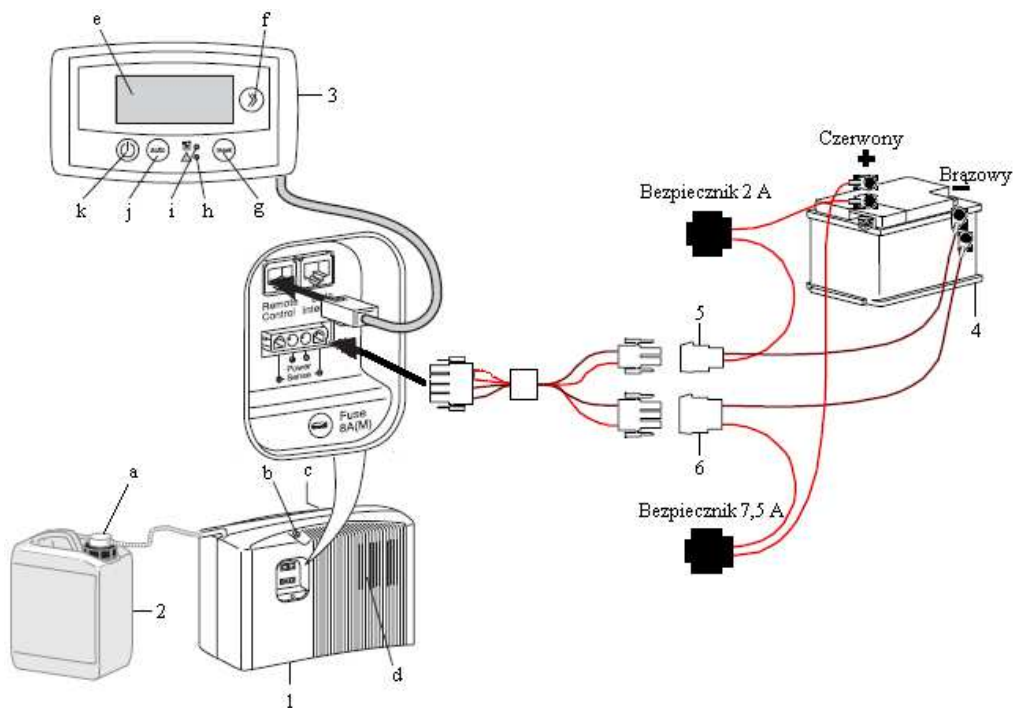
2.1. Parametry badanego ognia paliwowego

Ogniwo EFOY 600 to automatyczny zasilacz podłączony do akumulatora, który stale reguluje jego napięcie. Urządzenie jest zasilane metanolem, a jego praca jest kontrolowana za pomocą urządzenia sterującego z wyświetlaczem (pilot). Gdy napięcie akumulatora spadnie poniżej 12,3V, ogniwo włącza się automatycznie i ładuje akumulator do momentu, gdy napięcie akumulatora przekroczy 14,2V, po czym przechodzi w stan czuwania. W tabeli 2.1 przedstawione są parametry ognia EFOY 600.

Tab. 2.1 Parametry ognia EFOY 600

Ogniwo EFOY 600							
Moc	Wydajność	Napięcie znamionowe	Prąd ładowania (przy 12 V)	Próg załączenia	Próg wyłączenia	Minimalne napięcie startu	Zużycie paliwa
W	Wh/dzień	V	A	V	V	V	l/kWh
25	600	12	2,1	< 12,3	> 14,2	> 10,8	1,1

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów (rys. 2.1):



Rys. 2.1. Budowa stanowiska pomiarowego:

1 – ogniwo paliwowe (a – połączenie ze zbiornikiem paliwa, b – przewód spalinowy, c – wlot powietrza chłodzącego, d – odpływ powietrza ciepłego), 2 – zbiornik z paliwem (metanolem), 3 – urządzenie sterujące-pilot (e – wyświetlacz, f – przycisk przewijania, g – przycisk resetu, h – czerwona kontrolka błędu, i – żółta kontrolka ostrzegawcza, j – przycisk działania automatycznego, k – przycisk włączania/wyłączania), 4 – akumulator, 5 – przewody logiczne, 6 – przewody zasilające.

2.2. Cykl pracy ogniwa paliwowego

Przed uruchomieniem ogniwa należy sprawdzić napięcie akumulatora (powinno wynosić $11 \div 12$ V). Jeśli jest większe, należy rozładować akumulator do wartości podanej przez prowadzącego.

Automatyczna praca ogniwa rozpocznie się w chwili podłączenia go do akumulatora. Gdy na urządzeniu sterującym (pilocie) jest wyświetlany napis „Start phase”, oznacza to, że ogniwo jest uruchamiane (trwa to około 20 minut). Napis „Charging mode” oznacza ładowanie akumulatora. Ogniwo podczas ładowania akumulatora przerywa chwilowo pracę kilka razy. Gdy akumulator jest naładowany, na pilocie jest wyświetlany napis „Standby” i wtedy ogniwo przechodzi w stan czuwania. Używając na pilocie przycisku przewijania, można odczytywać różne dane (m. in. wartość napięcia i prądu).

2.3. Wyznaczenie podstawowych parametrów napięcia w instalacji z inwerterem

Tab. 2.2. Tabela wartości pomiarowych

$U_{\text{pocz.}} \text{ akumulatora} = \dots\dots\dots \text{ V}$				
Lp.	t	U	I	P
	s	V	A	W

- 15 -

Literatura do ćwiczenia 1

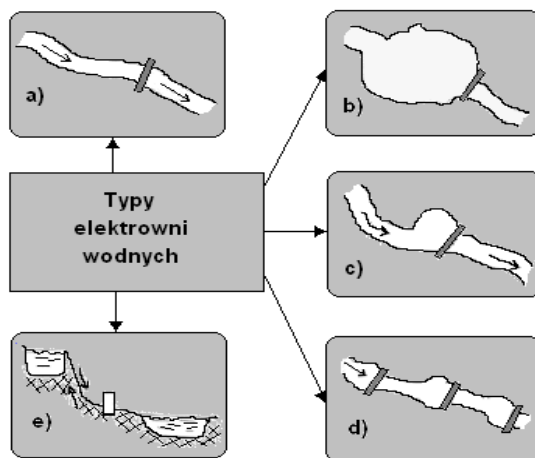
- [1] Włodarczyk R., *Badania właściwości użytkowych materiałów stosowanych na interkonektory ogniw paliwowych typu PEMFC*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2011
- [2] Shekhawat D., Spivey J.J., Berry D., *Fuel Cells: Technologies for Fuel Processing*, Elsevier Science, 2011
- [3] Małek A., Wendeker M., *Ogniwa paliwowe typu PEM: teoria i praktyka*
- [4] Lewandowski W.M., *Proekologiczne Odnawialne Źródła Energii*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne (WNT), 2010
- [5] Ogulewicz W., Węcel D., Wiciak G., Łukowicz H., Kotowicz J., *Pozyskiwanie energii z ogniw paliwowych typu PEM chłodzonych cieczą*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010
- [6] Paska J., *Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2010
- [7] Brzeżański M., Juda Z., *BOSCH Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010
- [8] Chmielniak T., *Technologie Energetyczne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne (WNT), 2008
- [9] Drulis H., *Ogniwa paliwowe Nowe kierunki rozwoju*, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, 2005.

Ćwiczenie 2

Mała energetyka wodna

1.1. Wprowadzenie teoretyczne

Ziemia pokryta jest w 75% wodą (około $1,370 \times 10^9 \text{ km}^3$ powierzchni), przy czym ok. 97,25% hydrosfery stanowią morza i oceany, 2,14% to woda w stanie stałym (lodowce, lądolody, itp.), 0,61% – woda gruntowa, 0,009% – jeziora, 0,005% – jeziora oraz 0,0001% rzeki. Poszczególne wartości ulegają zmianom w związku z zachodzącymi procesami fizykochemicznymi i biochemicznymi, z kolei te są możliwe dzięki energii geotermalnej, słonecznej i grawitacyjnej wpływającym na obieg wody w atmosferze [1].



Rys. 1 Schematy najczęściej występujących dużych elektrowni wodnych:
a) przepływowe bez zbiornika, b) regulacyjne z dużym zbiornikiem wodnym, c) zbiornikowe z małym zbiornikiem, d) kaskadowe, e) szczytowo-pompowe [4, 5]

Pierwsze wzmianki dotyczące wykorzystania energii wody pochodzą z kodeksu Hammurabiego z XX w. p.n.e. W polskiej Łęczycy koło wodne wykorzystywano do napędzania młyna w 1145 roku [2, 3].

Elektrownie wodne możemy podzielić na:

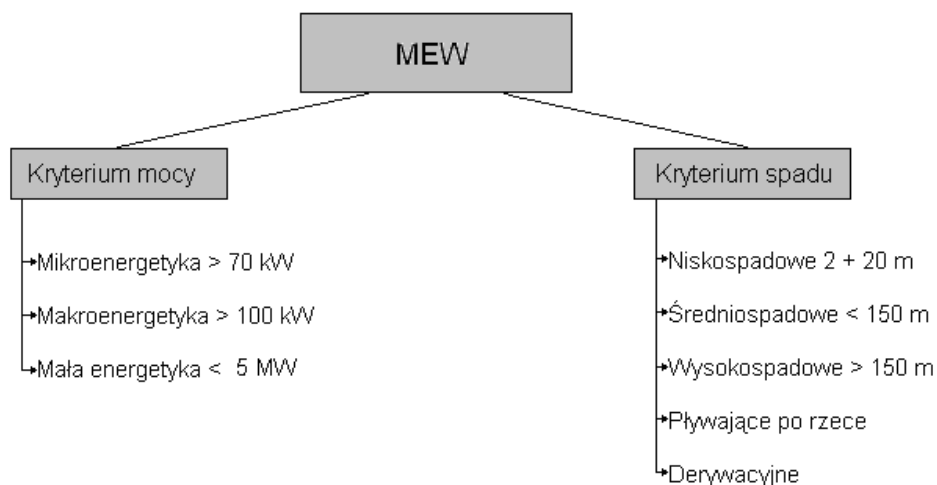
- oceaniczne, które do napędu swoich turbin wykorzystują przemieszczanie masy wody spowodowane pływami, falowaniem powierzchni oraz różnicami gęstości wody;

- śródlądowe, wykorzystujące przepływy i różnice poziomów, które dzielą się na obiekty wielkoskalowe i małe elektrownie wodne. Rys. 1 przedstawia typy najczęściej występujących dużych elektrowni wodnych [4, 5].

Rozróżniamy następujące szczegółowe kryteria podziału elektrowni śródlądowych [4–7]:

- a) sposób przepływu wody:
 - elektrownie wykorzystujące jedynie cieki naturalne
 - elektrownie, w których wytworzono sztuczny obieg wody
 - elektrownie stanowiące połączenie dwóch poprzednich typów
 - elektrownie, które wykorzystują ponownie wodę zużytą do innych celów gospodarczych
- b) współpraca elektrowni z siecią energetyczną:
 - elektrownie podstawowe, które pracują w sposób ciągły, czyli przez cały okres czasu
 - elektrownie podszczytowe, które pracują z przerwami w ciągu doby, gdy zapotrzebowania jest minimalne
 - elektrownie podszczytowe, które pracują w okresie szczytu zapotrzebowania energetycznego
 - elektrownie szczytowo-pompowe lub z członem pompowym, które jednocześnie oddają energię do sieci i pobierają ją, gdy jest potrzebna do pracy pomp
- c) magazynowanie wody:
 - elektrownie zbiornikowe o wyrównaniu długookresowym, to jest umożliwiające wieloletnie magazynowanie przepływów
 - elektrownie zbiornikowe o wyrównaniu krótkookresowym, to jest umożliwiające tygodniowe magazynowanie wody
 - elektrownie przepływowe, w których nie ma możliwości magazynowania wody
- d) metoda pozyskania piętrzenia wody:
 - elektrownie przyzaporowe, które wykorzystują miejsca naturalnych różnic poziomów wody
 - elektrownie derywacyjne, które wykorzystują również sztuczne doprowadzenie wody w celu piętrzenia
- e) wysokość spadu:
 - elektrownie niskospadowe, które sięgają do 15 metrów
 - elektrownie średnispadowe, które zawierają się między 15 a 50 metrami
 - elektrownie wysokospadowe, w których spadek przekracza 50 metrów
- f) moc zainstalowana:
 - elektrownie o mocy równej bądź większej od 1000 kW
 - elektrownie o mocy mniejszej niż 1000 kW.

Na rys. 2 obserwujemy podział małej energetyki wodnej ze względu na kryterium spadów i kryterium mocy [4].



Rys. 2. Podział małej energetyki wodnej [4]

1.2. Warunki hydroenergetyczne

Warunki hydroenergetyczne rzeki określa się za pomocą następujących parametrów [5–7]:

- lokalizacji
- wielkości dorzecza i zlewni (A w km^2 , przy czym dorzeczem nazywamy całkowity teren, z którego woda spływa do systemu danej rzeki, natomiast zlewnia jest to obszar, z którego wody powierzchniowe i podziemne spływają do jednego morza, bądź oceanu)
- przepływu charakterystycznego.

Do podstawowych miar przepływu należą [2, 5–7]:

- objętość odpływu V – ilość wody, jaka odpływa z określonego obszaru w jednostce czasu, jednostka to np. m^3
- natężenie przepływu Q – jest to ilość wody, jaka przepływa przez przekrój cieku w danej jednostce czasu, jednostka to np. l/s
- odpływ jednostkowy q – jest to ilość wody odpływającej w jednostce czasu z jednostki powierzchni zalewni:

$$q = \frac{Q}{A}, \frac{l}{s \cdot m^2}$$

- warstwa odpływu H – wysokość warstwy wody odpływającej w danym czasie z określonego obszaru:

$$H = \frac{V}{A \cdot 10^3}, mm$$

Wody w Polsce zajmują tylko 8313 km², co stanowi 2,7% powierzchni kraju. Panuje tu klimat o słabych, niekorzystnie rozłożonych opadach, gleby posiadają bardzo dużą przepustowość, a także występują tylko niewielkie spadki terenu [5, 8]. Stosunek odpływu do opadu zwany współczynnikiem odpływu wynosi dla Polski 0,27 i jest zdecydowanie mniejszy niż w państwach sąsiadujących potwierdzając niekorzystny wynik bilansu wodnego. Duża zmienność przepływu (1:2000 i 1:100 dla odpowiednio rzek górskich i nizinnych) stwarza wiele problemów w zagospodarowaniu wodnym wymuszając budowę kolejnych zbiorników retencyjnych. Średni odpływ jednostkowy dla naszego kraju to 5,2 l/(s·km²), natomiast średnie niskie odpływy jednostkowe wynoszą od około 0,25 l/(s·km²) do około 6 l/(s·km²). Na rysunku 3 przedstawione zostały zasoby wodne, a także rozmieszczenie i rodzaje elektrowni wodnych na terenie Polski [5-8].

Zwiększone zainteresowanie małymi elektrowniami wynika, między innymi ze zmniejszenia tempa rozwoju hydroenergetyki na rzecz innych OZE, wad dużej energetyki wodnej i dużych nakładów inwestycyjnych. W małych elektrowniach wodnych produkuje się energię elektryczną głównie na potrzeby lokalne. Elektrownie wodne tego typu, ze względu na skalę występowania, mogą mieć istotne znaczenie dla poprawy zdewastowanego środowiska, ponieważ dzięki budowie śluz i stawów zatrzymują dużo wody i w efekcie mogą polepszyć bilans hydrologiczny i hydrobiologiczny kraju [9].

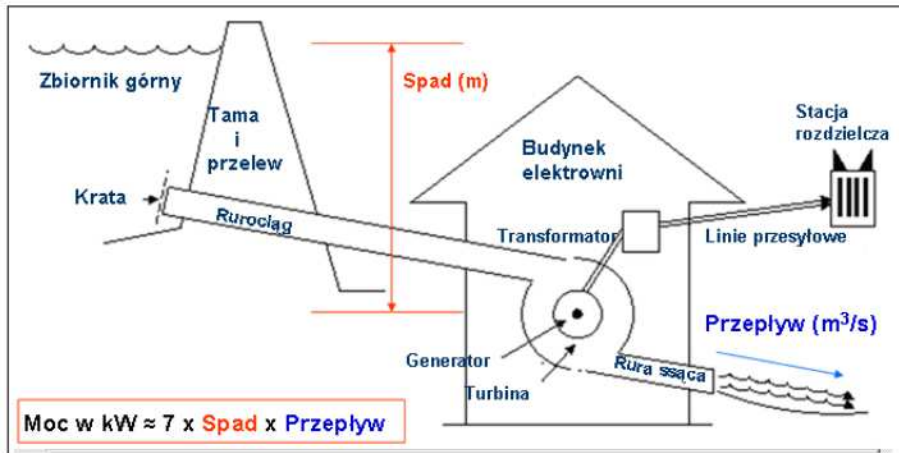


Rys. 3. Zasoby wodne Polski i rozmieszczenie elektrowni
▲ elektrownie zbiornikowe, ▲ elektrownie zbiornikowe z pompowaniem,
▲ elektrownie przepływowe, ▲ elektrownie pompowe [8]

1.3. Zasada działania i podstawowe parametry MEW

Rys. 4. przedstawia uproszczony schemat małej siłowni wodnej. Po wstępnym oczyszczeniu woda płynie specjalnym rurociągiem lub kanałem do budynku elektrowni, gdzie napędza łopatki najczęściej ułożonej pod powierzchnią ziemi turbiny, która z kolei napędza generator wytwarzający energię elektryczną. Następnie woda jest odprowadzana do strumienia, z którego była pobrana. Bardzo często w elektrowniach wodnych stosuje się dwa zespoły hydrogeneratorów. Zabieg ten jest przeprowadzany w celu zwiększenia sprawności układu, gdyż czasami zdarza się, że przepływ wody jest znacznie mniejszy i wymaga on mniejszego generatora, ponieważ umożliwia to lepsze wykorzystanie energii zawartej w wodzie [5, 9]

Kluczowym elementem MEW jest silnik, który przetwarza energię kinetyczną bądź potencjalną wody, za pomocą wirnika z łopatkami, w pracę użyteczną zwany turbiną wodną. Turbiny akcyjne wykorzystują prędkość wody, natomiast reakcyjne wykorzystują także różnicę ciśnień [3, 5, 9]



Rys. 4. Przekrój poprzeczny MEW [9]

Do zasadniczych parametrów turbiny wodnej należą [5, 7, 9, 10, 11]:

- **Przełyk turbiny** – jest to maksymalna objętość strumienia wody doprowadzona do turbiny w danej jednostce czasu. Zalicza się do niej przecieki w dławnicy, lecz nie uwzględnia ilości wody potrzebnej do chłodzenia układu, Q [m^3/s]. Przełykiem nominalnym Q_n nazywamy przełyk turbiny w umownym stanie ruchu (parametry nominalnego stanu ruchu podawane są najczęściej na tabliczkach znamionowych).
- **Przekrój turbiny** – pole przekroju prostopadłe do normalnego kierunku przepływu, F [m^2], przy czym przekrój wlotowy F_1 i przekrój wylotowy F_2 turbiny to odpowiednio pola przekroju na wlocie komory i wylocie rury ssącej turbiny.
- **Prędkość średnia wlotowa** v_1 [m/s] i **prędkość średnia wylotowa** v_2 [m/s] to odpowiednio stosunek przełyku do przekroju wlotowego i wylotowego turbiny:

$$v_1 = \frac{Q}{F_1} \quad , \quad v_2 = \frac{Q}{F_2}$$

- **Ciśnienie wlotowe** p_1 [kG/cm^2] i p_2 [kG/cm^2] to odpowiednio ciśnienia mierzone w punkcie pomiarowym na wlocie i wylocie turbiny z uwzględnieniem poprawki umieszczenia miernika
- **Ciężar właściwy wody** γ [kG/cm^3] – miara ciężkości jednego metra sześciennego wody przepływającego przez turbinę
- **Spad użyteczny** H_u [m] – jest różnicą między wysokością całkowitą na wlocie i na wylocie z turbiny:

$$H_u = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right),$$

gdzie wysokość słupa wody odpowiadająca ciśnieniu w danym punkcie pomiarowym zwana wysokością ciśnienia h_c [m] wynosi:

$$h_c = \frac{p}{\gamma}$$

wysokość słupa wody odpowiadająca ciśnieniu dynamicznemu w danym punkcie pomiarowym zwana wysokością prędkości h_d [m] wynosi:

$$h_d = \frac{v^2}{2g}$$

Zaś wysokość położenia z [m] to wysokość w punkcie pomiarowym ponad danym punktem odniesienia odpowiednio na wlocie z_1 i na wylocie z_2 z turbiny.

- **Straty objętościowe** ΔQ [m³/s] powstające w skutek przecieków przez szczeliny (natężenie przepływu wody niepowodujące pracy turbiny) do których zaliczamy straty hydrauliczne Δh_h [m] spowodowane tarciami wody podczas jej przepływu przez łopatki i kanał kierowniczy turbiny, oraz spowodowane uderzaniem wody o łopatki przy napływie; straty mechaniczne ΔN_m [KM] bądź ΔP_m [kW] powstałe w wyniku tarcia o siebie części wirujących i nieruchomych turbiny, oraz tarcia części wirujących o wodę.
- **Współczynnik sprawności** n_t , w którym bierze się pod uwagę wszystkie straty w turbinie, jest to stosunek mocy użytecznej P_u [kW], N_u [KM] do mocy teoretycznej P_{th} [kW], N_{th} [KM].

$$n_t = \frac{P_u}{P_{th}} = \frac{N_u}{N_{th}} = n_m n_h n_v,$$

gdzie

n_v – współczynnik sprawności, w którym bierze się pod uwagę jedynie straty objętościowe:

$$n_v = \frac{Q - \Delta Q}{Q}$$

n_h – współczynnik sprawności, w którym bierze się pod uwagę jedynie straty hydrauliczne:

$$n_h = \frac{H_u - \Delta h_h}{H_u}$$

n_m – współczynnik sprawności, w którym bierze się pod uwagę jedynie straty mechaniczne:

$$n_m = \frac{P_h - \Delta P_m}{P_h} = \frac{N_h - \Delta N_m}{N_h}$$

- **Moc turbiny** przy czym moc teoretyczna turbiny P_{th} [kW], N_{th} [KM] wynika z przełyku Q oraz ze spadu użytecznego H_u :

$$P_{th} = \frac{\gamma Q H_u}{102} = 9,81 Q H_u$$

$$N_{th} = \frac{\gamma Q H_u}{75} = 13,3 Q H_u$$

zaś moc użyteczna P_u [kW], N_u [KM] to moc oddawana na wale turbiny:

$$P_u = \eta_m P_{th} = \eta_t P_{th} = 9,81 \eta_t Q H_u$$

$$N_u = \eta_m N_{th} = \eta_t N_{th} = 13,3 \eta_t Q H_u$$

Moc rzeczywista generatora P [kW] to moc turbozespołu, moc na zaciskach generatora gdzie η_g określa sprawność generatora:

$$P = \eta_g P_u$$

zaś moc pozorna generatora S [kVA] to moc będąca podstawą obliczeń elektrycznych generatora, przy czym $\cos \varphi$ to współczynnik mocy

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}$$

- **Prędkość obrotowa** turbiny n_t mówiąca o liczbie obrotów, jaką wykonuje wał turbiny w czasie jednej minuty. Prędkością rozbiegową n_r nazywamy największą prędkość obrotową osiąganą przez turbinę przy nieobciążonym turbozespołe oraz przy maksymalnym spadzie.
- **Średnica charakterystyczna turbiny** D [m], czyli średnica wirnika stanowiąca podstawową wielkość wyznaczającą jej gabaryty.

2. INSTRUKCJA WYKONANIA ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z podstawowymi zasadami działania małej elektrowni wodnej. Pomiary realizowane będą w Laboratorium Odnawialnych Zasobów Energii należącym do IPEiE Politechniki Lubelskiej.

Przed badaniami należy zapoznać się z instrukcją stanowiskową BHP oraz instrukcjami obsługi badanych urządzeń i mierników. O wszelkich nieprawidłowościach w pracy przyrządów należy natychmiast powiadomić prowadzącego zajęcia.

Stanowisko do badania MEW zostało wykonane przez mgr inż. Sylwię Mrugałę w ramach realizacji pracy magisterskiej „Mała hydroenergetyka projekt i charakterystyka stanowiska laboratoryjnego”, promotor: Joanna Pawłat, Lublin 2011.

2.1. Zasada działania stanowiska laboratoryjnego

Głównymi elementami stanowiska są dwa zbiorniki o pojemności 200 l umieszczone na różnych poziomach, komora turbinowa, prądnica, oraz urządzenia monitoringu i akwizycji danych.

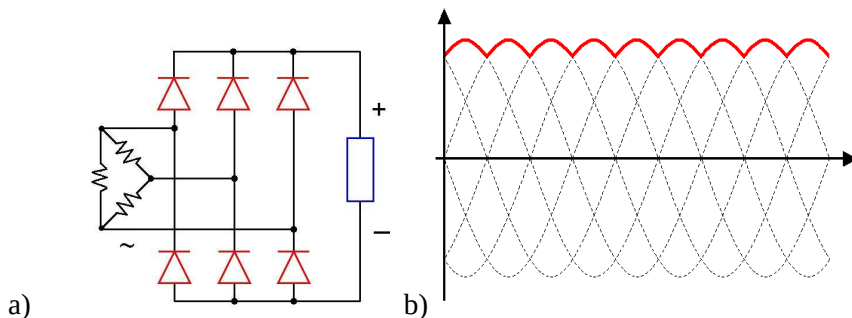
Woda opadająca z górnego zbiornika przepływa do komory turbinowej z mieszczoną w niej turbiną Kaplana przez rurę dopływową. W komorze natrafia na kierownicę, gdzie łopatki pod odpowiednim kątem kierują jej strumień na turbinę, która w ten sposób zostaje wprowadzona w ruch. Kąt wpływu wynosi $58^{\circ}30'$. Ruch obrotowy turbiny poprzez wał przekłada się na prądnicę i tarczę licznika.

Do budowy licznika użyto częstotściomierza panelowego kit AVT-321 współpracującego z tarczą i elementem optoelektrycznym [5, 13].

Woda z komory turbinowej trafia przez rurę ssącą do dolnego zbiornika. W celu maksymalnego wykorzystania turbiny rura musi tworzyć ścięty stożek, którego kąt nachylenia krawędzi bocznej wynosi $3,5^{\circ}$. Długość rury ssawnej zależy od wykorzystwanego spadu.

Zwiększenie poziomu wody w zbiorniku dolnym powoduje unoszenie pływaka ku górze. Podczas unoszenia się pływaka umieszczony na nim załącznik stycznika trafia na wyznacznik wysokości. W tym momencie następuje załączenie pompy. Woda z poziomu dolnego poprzez wąż przepompowywana jest do zbiornika górnego. Kiedy odpowiednia jej ilość zostanie przetransportowana, pływak opada na dół rozłączając pompę i cykl się zamyka.

W celu wyprostowania napięcia przy projektowaniu stanowiska, w którym w charakterze prądnicy wykorzystano trójfazowy silnik od napędu wideo zastosowano trójfazowy mostek Graetza (Rys.6).



Rys. 6 a) Schemat mostka Graetza, b) zasada działania mostka [5]

Na sterownik poziomu wody składają się pompa o wydajności 360 l/min, pływak oraz wyznacznik poziomu wody.

Panel sterowania składa się z wodoodpornej skrzynki elektrycznej i wmontowanych w nią elementów: amperomierza, woltomierza, licznika, stycznika, transformatora, dziesięciu żarówek i dziesięciu włączników. Przy budowie stanowiska w celu odpowiedniego zmniejszenia mocy, aby przy załączeniu pojedynczych żarówek nie powodować natychmiastowego ich zniszczenia zastosowano dodatkowo układ składający się z dwóch kondensatorów po 100 μ F i stabilizatora napięcia.

2.2. Badanie modelu laboratoryjnego MEW

Badania przeprowadzone na stanowisku polegają na obserwacji prędkości obrotowej n , napięcia U i prądu I w zależności od otrzymanego spadku wody H i załączonego obciążenia. Ponadto wiedząc, że przy projektowaniu stanowiska użyto mostka Graetza w celu wyprostowania napięcia, co spowodowało, że $\cos\varphi=1$ należy obliczyć i zaobserwować przebieg mocy układu.

Uwaga!

Pomiary należy wykonywać przy odpowiedniej ilości wody. Na dolnym zbiorniku jest zaznaczony dokładny poziom, dla którego przyjęto skalę pomiarową. Zmiana ilości wody w dolnym zbiorniku wiąże się z brakiem odpowiedniego wskazywania spadku przez wyznacznik wysokości.

Moc układu obliczamy ze wzoru:

$$P=UI\cos\varphi \text{ [W]}$$

Dla rozważanego przypadku gdzie $\cos\varphi=1$:

$$P=UI \text{ [W]}$$

W sprawozdaniu należy sporządzić schemat stanowiska oraz zestawić otrzymane wyniki pomiarów dla kolejnych obciążeń i min. 6 spadów (55–120 cm) w tabeli (Tab.1).

Tab. 1. Przykładowe zestawienie wyników otrzymanych pomiarów

H	n	U	1 żarówka			2 żarówki		
			I	U	P	I	U	P
cm	obr/min	V	A	V	W	A	V	W
55	120	5,0	0,050	5,0	0,250			
65	130	7,0	0,050	5,5	0,275	0,100	4,7	0,470
73	142							
82	146							
90	152							

Następnie należy sporządzić wykresy zależności prędkości obrotowej od spadu oraz napięcia, natężenia prądu i mocy od spadu dla poszczególnych obciążeń. Sprawozdanie powinno zawierać wnioski.

Literatura do ćwiczenia 2

- [1] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, *Cykl hydrologiczny*, dostępny w Word Wide Web: ga.water.usgs.gov/edu/watercyclepolish.html
- [2] Koło wodne, www.mt.com.pl/kolo-wodne
- [3] Hoffman M., *Małe elektrownie wodne – poradnik*, Wydawnictwo Nabba, Warszawa, 1992
- [4] Lewandowski W., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 2007
- [5] Mrugała S., *Mała hydroenergetyka- projekt i charakterystyka stanowiska laboratoryjnego*, praca magisterska wykonana na Politechnice Lubelskiej, promotor: Joanna Pawłat, Lublin, 2011
- [6] Hoffmann M., *Małe elektrownie wodne – poradnik*, Towarzystwo Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych, Gdańsk, 1992
- [7] Łaski A., *Elektrownie wodne. Rozwiązania i dobór parametrów*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne. Warszawa 1971.
- [8] Podwysocki Ł., *Hydroenergetyka w Polsce*, Warszawa 2006, dostępny w Word Wide Web: www.ekoportal.eu/Artykuly/Hydroenergetyka_w_Polsce.html
- [9] Stryczewska H., Nalewaj K., Goleman R., Ratajewicz-Mikołajczak E., Pawłat J., *Energie odnawialne Przegląd technologii i zastosowań*, Politechnika Lubelska, 2012
- [10] Jackowski K., *Elektrownie wodne – turbozespoły i wyposażenie*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa, 1971
- [11] Karolewski B., Ligocki P., *Wyznaczanie parametrów malej elektrowni wodnej*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004
- [12] *Mikroelektrownia wodna*, Młody Technik, Vol.1/2, 1987, dostępny w Word Wide Web: <http://darmowa-energia.eko.org.pl/pliki/woda/turbina.html>
- [13] Surowiński S., *Częstościomierz panelowy kit AVT-321*, Elektronika praktyczna, Vol. 12, 1996.

Ćwiczenie 3

Wytwarzanie energii elektrycznej za pomocą materiałów piezoelektrycznych

1.1. Wprowadzenie teoretyczne

Pierwsze eksperymentalne wykazanie związku między zjawiskiem piezoelektrycznym i strukturą krystalograficzną zostało opublikowane w 1880 roku przez braci Pierre'a i Jaques'a Curie. Ich eksperyment polegał na ostatecznym pomiarze ładunków powierzchniowych, pojawiających się na specjalnie przygotowanych kryształach, które były poddane sile mechanicznej. Użyli do tego eksperymentu kryształów turmalinu, kwarcu, topazu, cukru trzcinowego i soli Rochelle. Efekt ten został uznany za odkrycie i szybko został nazwany mianem „piezoelektryczność” w celu odróżnienia go od innych dziedzin naukowych takich jak elektryczność kontaktowa (tarcie generowało elektryczność statyczną) i piroelektryczność. Bracia Curie nie przewidzieli jednak, że kryształy, które wykazują bezpośredni efekt piezoelektryczny wykazują również efekt piezoelektryczny odwrotny. Ta właściwość została matematycznie wyprowadzona z podstawowych zasad matematyki przez fizyka Gabriela Lippmanna [1–3].

Piezoelektrykami są materiały wykazujące zjawisko piezoelektryczne, które polega na degradacji pola elektrycznego pod wpływem przyłożonego naprężenia mechanicznego. W technice piezoelektrykami określa się te materiały, w których zjawisko piezoelektryczne występuje w stopniu nadającym się do praktycznego wykorzystania.

Proste zjawisko piezoelektryczne, polega na indukowaniu się ładunków elektrycznych na powierzchni kryształu i jego polaryzowaniu się pod wpływem zewnętrznych naprężeń mechanicznych. W zjawisku piezoelektrycznym związek pomiędzy siłą a indukowanym przez tę siłę ładunkiem elektrycznym oraz natężeniem pola elektrycznego i indukowaną tym polem deformacją jest liniowy. Zjawisko piezoelektryczne obserwowane jest tylko w materiałach niemających środka symetrii [1, 3-5].

Proste zjawisko piezoelektryczne, polegające na indukowaniu się ładunków elektrycznych na powierzchni kryształu i jego polaryzowaniu się pod wpływem zewnętrznych naprężeń mechanicznych, można przedstawić w postaci [6]:

$$P_m = d_{mij} \cdot \sigma_{ij}$$

gdzie:

$m, i, j = 1, 2, 3..$

P_m – zmiana składowej polaryzacji elektrycznej,

σ_{ij} – składowe tensora naprężenia mechanicznego,

d_{mij} – współczynnik proporcjonalności, nazywany współczynnikiem piezoelektrycznym, który określa w sposób ilościowy własności piezoelektryczne kryształów [5].

Gdy kierunek zmian składowej polaryzacji P_m w prostym zjawisku piezoelektrycznym jest prostopadły do kierunku działania zewnętrznych naprężeń mechanicznych σ_{ij} , zjawisko nazywamy poprzecznym zjawiskiem piezoelektrycznym. Natomiast, gdy kierunek zmian składowej polaryzacji P_m jest równoległy do kierunku działania zewnętrznych naprężeń σ_{ij} to obserwowane zjawisko nazywane jest podłużnym zjawiskiem piezoelektrycznym [6].

Dla zjawiska piezoelektrycznego słuszna jest zależność wiążąca polaryzację P , z naprężeniami mechanicznymi T [7]:

$$P = dT$$

gdzie:

d – moduł piezoelektryczny

Efekt piezoelektryczny prosty może być zaprezentowany przy pomocy równania wiążącego polaryzację z odkształceniem [8]:

$$P = eS$$

gdzie:

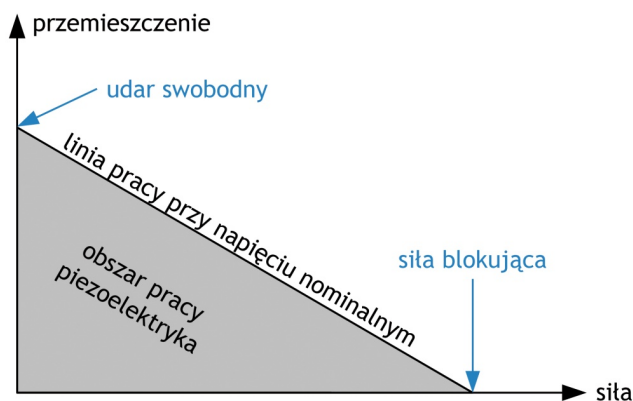
e – współczynnik piezoelektryczny

Zjawisko piezoelektryczne odwrotne można przedstawić za pomocą zależności [7]:

$$S = dE \quad \text{lub} \quad T = eE$$

gdzie

E – natężenie pola elektrycznego



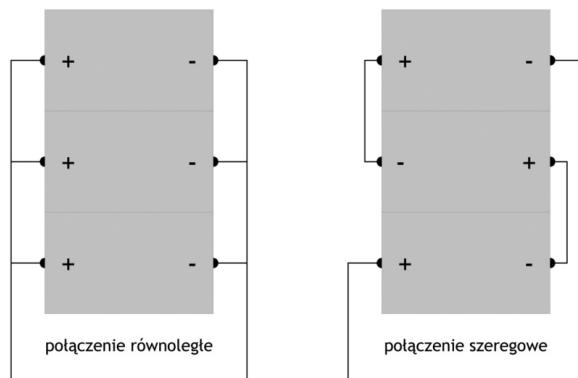
Rys. 1. Pole pracy elementu piezoelektrycznego [9]

Przeważnie stosowanymi wielkościami fizycznymi prezentującymi piezoelektryk są: siła blokująca oraz uderzenie swobodne, na bazie których można dostosować odpow-

wiedni element do danej aplikacji [9]. Wartości te ustala się po doprowadzeniu maksymalnego napięcia pracy danego piezoelementu. Uderem swobodnym określa się maksymalne zniekształcenie mechaniczne piezoelementu przy danym napięciu bez żadnego mechanicznego obciążenia. Siła blokująca to siła wymagana do odtworzenia pierwotnego kształtu piezoelektryka pod maksymalnym napięciem pracy. W praktyce piezoelektryk pracuje w obszarze określonym przez charakterystykę uder-siła (Rys. 1) dla zastosowanego napięcia pracy, materiału oraz wymiarów piezoelementu. Maksymalne wykorzystanie elementu ma miejsce dla połowy wartości siły blokującej i przesunięcia równego połowie uderu swobodnego.

W sytuacji, gdy parametry pracy i możliwości pojedynczego elementu piezoelektrycznego nie spełniają danych wymagań aplikacyjnych to istnieje możliwość zestawienia i sklejania kilkunastu elementów piezoelektrycznych w jeden stos piezoelektryczny. W aplikacjach, gdzie piezoelektryk ma pracować, jako aktuator piezoelementy łączy się równolegle, aby osiągnąć zwielokrotnione przemieszczenie. Stosy (Rys. 2.) wykorzystuje się w procesie odzyskiwania energii. W tym przypadku możliwe są dwa połączenia [9]:

- Szeregowe – mniejszy ładunek, większe napięcie
- Równoległe – większy ładunek, mniejsze napięcie



Rys. 2. Stos piezoelektryczny [9]

Obie te konfiguracje dostarczają jednakową ilość energii według wzoru [9]:

$$E = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

gdzie:

E – energia

Q – ładunek wygenerowany przez stos

U – potencjał pomiędzy elektrodami stosu

C – pojemność stosu.

Materiały piezoelektryczne znajdują zastosowanie w wielu urządzeniach. Gdy energia elektryczna jest przetwarzana na działanie mechaniczne (wydłużanie,

zginanie, skręcanie) wykorzystane są wspomniane wcześniej aktulatory lub gdy oddziaływanie mechaniczne rejestrowane jest przez powstanie efektu elektrycznego to wykorzystuje się sensory. Najczęstszymi obszarami zastosowań materiałów piezoelektrycznych są automatyzacja, mikromanipulacja, różnego rodzaju techniki pomiarowe i medyczne. Bardzo szybko rozwija się dziedzina zastosowań piezoelektryków w systemach monitorujących stan konstrukcji i materiałów [10].

Zastosowanie materiałów piezoelektrycznych możemy podzielić w zależności od wykorzystanego zjawiska piezoelektrycznego. W przypadku efektu piezoelektrycznego prostego materiały piezoelektryczne znalazły wykorzystanie w odbiornikach dźwięku, mikrofonach, generatorach energii elektrycznej, generatorach iskry, sensorach drgań, ciśnienia. Zjawisko efektu piezoelektrycznego odwrotnego znalazło użycie w budowie nadajników dźwięku, silnikach piezoelektrycznych, piezoelektrycznych transformatorach, serwomechanizmach oraz w aktuatorach. Rezonans piezoelektryczny wykorzystywany jest w rezonansowych stabilizatorach częstotliwości, sensorach ciśnienia, wilgoci i temperatury a także w filtrach piezoelektrycznych. Elektrostrykcja (zmiana wymiarów, deformacja materiału pod wpływem pola elektrycznego, przy czym deformacja względna η jest proporcjonalna do kwadratu natężenia pola elektrycznego) znajduje zastosowanie w filtrach piezoelektrycznych i we wzmacniaczach [11].

2. INSTRUKCJA WYKONANIA ĆWICZENIA

Celem ćwiczeń jest zapoznanie studentów z metodami wytwarzania energii elektrycznej za pomocą materiałów piezoelektrycznych. Pomiary realizowane będą w Laboratorium Odnawialnych Zasobów Energii należącym do IPEiE Politechniki Lubelskiej.

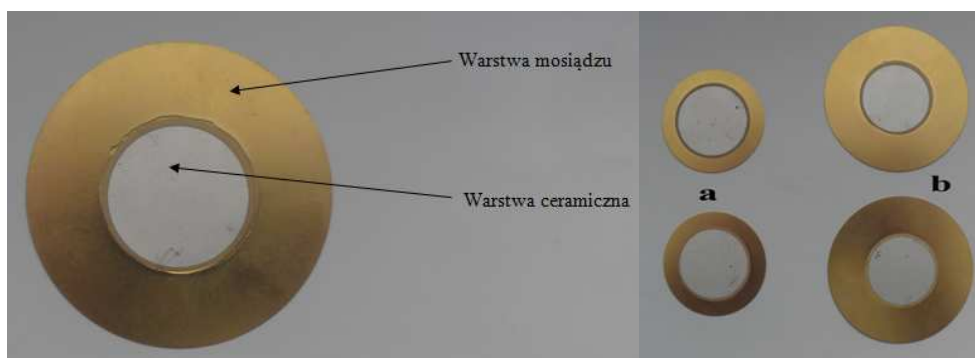
Przed badaniami należy zapoznać się z instrukcją stanowiskową BHP oraz instrukcjami obsługi badanych urządzeń i mierników. O wszelkich nieprawidłowościach w pracy przyrządów należy natychmiast powiadomić prowadzącego zajęcia.

Stanowisko laboratoryjne i szczegółowe instrukcje zostały wykonane przez mgr inż. Pawła Ciupę w ramach realizacji pracy magisterskiej „Wytwarzanie energii elektrycznej za pomocą materiałów piezoelektrycznych”, promotor: Joanna Pawłat, Lublin 2011 [1, 12].

2.1. Zasada działania stanowiska laboratoryjnego

Do generowania energii wykorzystano dwie płytki piezoelektryczne producenta Height Piezoelectric (Rys. 3). Zewnętrzną, większą warstwę stanowi płytka z mosiądzu, na której umieszczona jest płytka wykonana z ceramiki piezoelektrycznej o średnicach 35 lub 50 mm. Parametry płytek piezoelektrycznych zostały przedstawione w tab. 1.

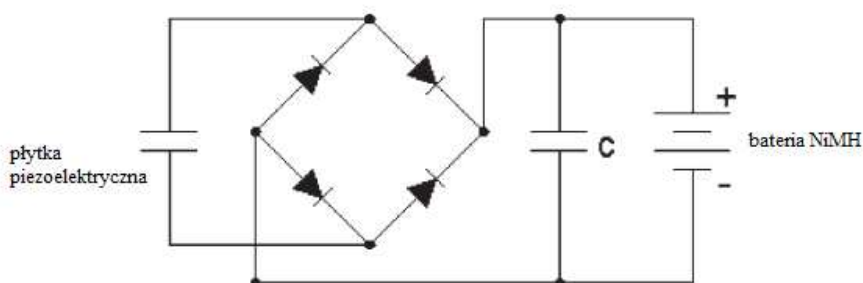
Do budowy układu został wykorzystany mostek prostowniczy oraz kondensator o pojemności $1000\mu\text{F}$, które umieszczono na płytce uniwersalnej. Do mostka doprowadzone są zaciski wejściowe, do których podłączana jest płytka piezoelektryczna. Zaciski wyjściowe wyprowadzone zostały w celu możliwości zasilania diod LED oraz napięcia, jakie jest wytwarzane, gdy diody są zasilane bezpośrednio z płytki piezoelektrycznej (pominięcie układu prostowniczego), a także wyprowadzone zostało gniazdo do ładowania akumulatorów NiMH. Za pomocą przełączników hebelkowych możliwy jest wybór ładowania akumulatora lub świecenia listwy LED.



Rys. 3. Płytki piezoelektryczne: a) 35mm b) 50mm

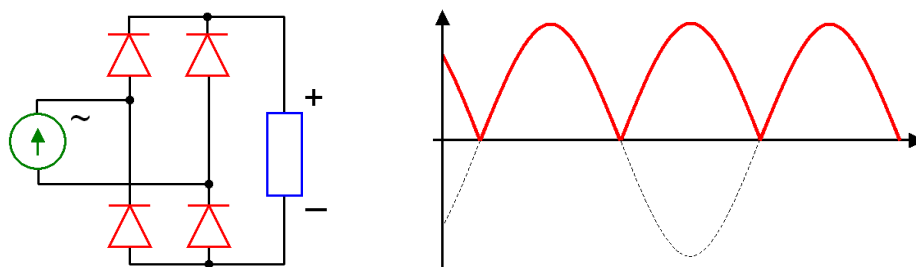
Tab. 1. Parametry płytek piezoelektrycznych.

Średnica płytki	35mm	50mm
Średnica ceramiki	25mm	25mm
Grubość płytki	0,58mm	0,38mm
Częstotliwość rezonansowa	$2,9 \pm 0,5 \text{ kHz}$	$1,02 \pm 0,3 \text{ kHz}$
Impedancja	200Ω	$1 \text{ k}\Omega$
Pojemność	$25 \pm 30\%$	$60 \pm 30\%$
Napięcie max. V_{pp}	30V	30V

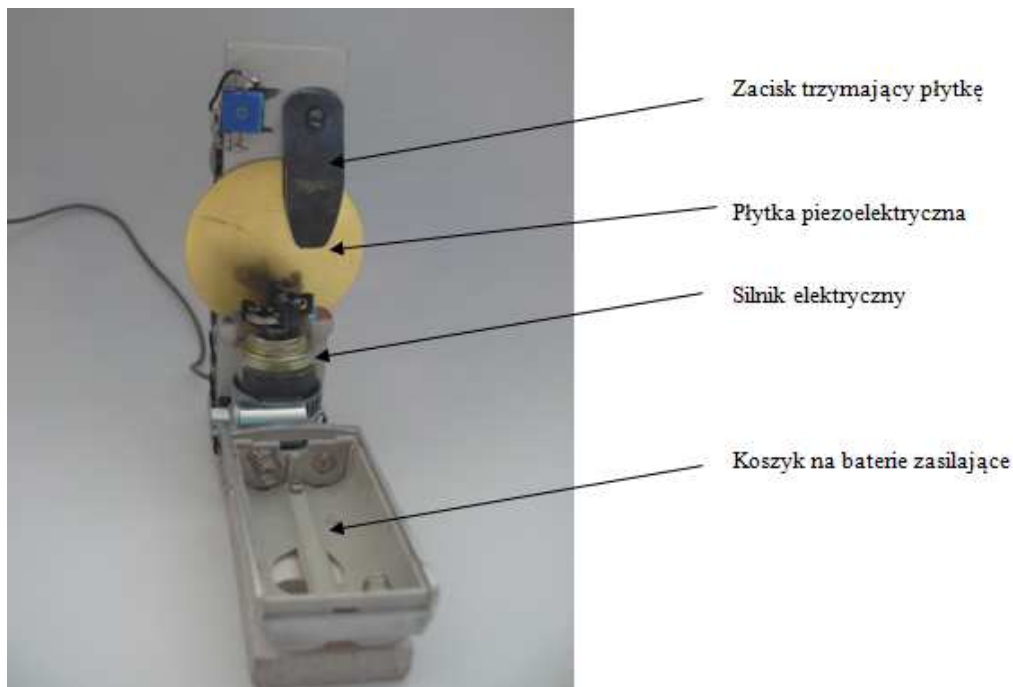


Rys. 4. Schemat układu prostującego

Zgięcie lub nacisk na płytkę powodują generowanie przemiennego napięcia, które jest następnie prostowane w układzie prostującym (Rys. 4.) – przechodzi przez mostek Graetza (Rys.5.) a dalej przesyłane jest do kondensatora i służy do ładowania akumulatora.



Rys.5. Schemat mostka Graetza i zasada jego działania



Rys. 6. Układ regulujący

Drugim sposobem generowania napięcia jest umieszczenie płytek w układzie regulującym (Rys. 6), w którym drgania płytki są generowane poprzez równomierne uderzenia w nie dwóch lub jednej podkładki ($\phi = 9\text{mm}$, grubość 2mm). Podkładki te są zamontowane na małym silniku elektrycznym, który posiada regulację obrotów i ma możliwość zmiany wartości siły uderzenia o płytkę. Zwiększenie prędkości obrotowej silnika powoduje wzrost liczby uderzeń o płytkę i zwiększenie generowanego napięcia. Do pomiaru prędkości obrotowej silnika elektrycznego został wykorzystany tachometr cyfrowy

2.2. Wytwarzanie energii elektrycznej za pomocą materiałów piezoelektrycznych

Do pomiarów należy wykorzystać dwie zalaminowane płytki piezoelektryczne o różnych średnicach. Płytki należy podłączyć do gniazda oznaczonego, jako wejście. Przełączniki należy ustawić na LED WŁ oraz na LED. Ćwiczenie polega na pomiarze prądu i napięcia w zależności od stopnia zgięcia płytki piezoelektrycznej. Wyniki pomiarów należy zanotować w tab. 2. W ćwiczeniu należy wykorzystać mikroamperomierz.

Tab. 2. Wyniki pomiarów

Średnica płytki	Pozycja	I	U
		A	V
35mm	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
50mm	1		
	2		
	3		
	4		
	5		

W sprawozdaniu należy zamieścić charakterystyki prądowo-napięciowe dla dwóch różnych płytek. Charakterystyki powinny zostać umieszczone na jednym wykresie.

2.3. Badanie stanu ładowania akumulatora NiMH

W drugim ćwiczeniu należy podłączyć układ sterujący do układu prostującego oraz umieścić akumulator w odpowiednim gnieździe. Pierwszy przełącznik należy nastawić na pozycję LED WYŁ a drugi na pozycję BAT.

Dla dwóch prędkości zadanych przez prowadzącego, co 5 minut należy dokonać pomiarów napięcia na zaciskach akumulatora i zanotować je w tab. 3. Należy umieścić wartość początkową napięcia akumulatora.

Liczbę obrotów silnika należy zmierzyć za pomocą tachometru cyfrowego. Pomiar obrotów odbywa się po skierowaniu sensora miernika na wirujące podkładki. Uzyskany wynik należy podzielić przez 4.

UWAGA!

1. Pomiarów napięcia należy dokonać po wyjęciu akumulatora z gniazda (nie w czasie ładowania). Podczas pomiaru prędkości obrotowej silnika należy osłonić układ od góry, w przeciwnym wypadku nie będzie możliwe zmierzenie prawidłowej liczby obrotów.
2. Warstwa ceramiczna znajduje się po wewnętrznej stronie układu, gdyż uderzenia podkładek mogłyby spowodować szybkie wytarcie się ceramiki w miejscu uderzeń i zmniejszenie właściwości piezoelektrycznych płytki.

Tab. 3. Wyniki pomiarów

Prędkość obrotowa silnika	Czas	U
	min	V
	0	
	5	
	10	
	15	
	20	
	25	
	30	
	0	
	5	
	10	
	15	
	20	
	25	
	30	

2.3. Pomiar napięcia diod LED

W ćwiczeniu należy zanotować minimalną wartość napięcia, dla którego następuje zaświecenie się diod LED oraz pomiar maksymalnego napięcia, jakie może zostać wytworzone. Układ należy podłączyć jak punkcie pierwszym ćwiczenia. Wyniki należy wykonać dla 2 płytek piezoelektrycznych o różnych rozmiarach.

Układ należy zestawić zgodnie ze schematem (Rys. 4). Przełączniki należy ustawić na LED WYŁ oraz na BAT. Pomiary wykonywane są dla płytek o średnicach 35 i 50mm oraz dla 3 prędkości obrotowych silnika elektrycznego zadanych przez prowadzącego zajęcia. Woltomierz cyfrowy należy podłączyć do zacisków w gnieździe służącym do ładowania akumulatorów. Wyniki pomiarów należy umieścić w Tab. 4.

UWAGA!

1. Warstwa ceramiczna znajduje się po wewnętrznej stronie układu, gdyż uderzenia podkładek mogłyby spowodować szybkie wytarcie się ceramiki w miejscu uderzeń i zmniejszenie właściwości piezoelektrycznych płytki.
2. Po skończeniu każdej serii pomiarów należy poczekać na rozładowanie się kondensatora lub umieścić w gnieździe akumulator na 10 sekund.

Sprawozdania do poszczególnych ćwiczeń powinny zawierać: tabelę uzyskanych wyników, charakterystyki prądowo napięciowe dla poszczególnych pomiarów, wykresy napięć dla różnych prędkości obrotowych, wnioski dotyczące wykonanego ćwiczenia i wykresów.

Tab.4. Wyniki pomiarów

Średnica płytki	Prędkość	Czas	U
	Obr/min	s	V
35mm		10	
		20	
		30	
		40	
		50	
		10	
		20	
		30	
		40	
		50	
		10	
		20	
		30	
		40	
		50	
50mm		10	
		20	
		30	
		40	
		50	
		10	
		20	
		30	
		40	
		50	
		10	
		20	
		30	
		40	
		50	

Literatura do ćwiczenia 3

- [1] Ciupa P., *Wytwarzanie energii elektrycznej za pomocą materiałów piezoelektrycznych*, promotor: Joanna Pawłat, Lublin, 2011
- [2] Kapiszewski S., *Życie i działalność Piotra Curie*, Zakład Fizyki WSR w Lublinie
- [3] Soluch W. et al., *Wstęp do piezo elektroniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1980.
- [4] Kacprzyk R., *Wybrane zagadnienia badań ładunku i jego zaniku w dielektrykach stałych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
- [5] Krajewski T., *Zagadnienia fizyki dielektryków*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1970
- [6] Poprawski R., *Badanie prostego i odwrotnego zjawiska piezoelektrycznego*, Politechnika Wrocławska
- [7] *Pomiary i wyznaczanie parametrów ceramiki piezoelektrycznej*. Laboratorium, Politechnika Wrocławska
- [8] Nowacki W., *Mechanika teoretyczna stosowana*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1968
- [9] *Krótką teoria piezoelektryczności*, dostępny w Word Wide Web: www.ec-ndt.pl
- [10] *Materiały piezoelektryczne*, dostępny w Word Wide Web: www.matint.pl
- [11] Kaszuwara W., *Ceramiczne materiały piezoelektryczne*, Inżynieria materiałowa 2, 2004
- [12] Sodano A., Inman D. *Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting. Devices for Re-charging Batteries*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16(10), s. 799-807, 2005.

Ćwiczenie 4

Badanie modelu pompy ciepła

1.1. Wprowadzenie teoretyczne

W XXI wieku około 70% energii elektrycznej jest pozyskiwana z paliw kopalnych. Pozostałe 30% to głównie energia jądrowa oraz hydroelektrownie. Światowe zasoby paliw kopalnych, które stanowią ok. 2/3 energii pozyskiwanej przez ludzi są ograniczone. Fakt ten coraz bardziej staje się częścią świadomości ekologicznej społeczeństw, dlatego też wzrasta rola zastosowania energii odnawialnych do zaopatrzenia w ciepło. Ekologiczne postawy wykorzystywania energii odnawialnych są coraz bardziej popularne i akceptowane przez użytkowników. Światowe tendencje coraz większego wykorzystania energii odnawialnej zbiegły się z rozwojem pozyskiwania ciepła. W tym aspekcie pompy ciepła stanowią jedno z najciekawszych i zarazem najpopularniejszych rozwiązań. Po szeregu nieudanych próbach wprowadzenia pomp ciepła na szeroką skalę w latach osiemdziesiątych z powodu technologicznych niedoskonałości, dzisiejsze urządzenia charakteryzują się niezawodnym i oszczędnym systemem grzewczym. Rozwój tych rozwiązań jest bardzo obiecujący co wynika z niewielkiej ingerencji w środowisko. Pompa ciepła jest również rozwiązaniem szczególnie wydajnym energetycznie, co ma również znaczenie w aspekcie ekonomicznym i praktycznym przedsięwzięcia.

Unia Europejska już od przeszło dwudziestu lat prowadzi politykę sprzyjającą rozwojowi energetyki odnawialnej wprowadzając różne dokumenty wspólnotowe takie, jak np.: Biała Księga Komisji Europejskiej „Energia dla przyszłości – odnawialne źródła energii” z grudnia 1997 r., Zielona Księga „O bezpieczeństwie energetycznym” z 2000 r., czy też Dyrektywa 2009/28/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych z dnia 23 kwietnia 2009 r. W celu wypełnienia zobowiązań tej ostatniej, państwo Polskie przygotowało Krajowy plan działania w zakresie energii ze źródeł odnawialnych, który w dniu 7 grudnia 2010r. został przyjęty przez Radę Ministrów. Plan ten zakłada, że W 2020 r. w Polsce 15,5 proc. energii końcowej brutto będzie pochodziło ze źródeł odnawialnych, przy czym przyspieszony rozwój źródeł odnawialnych nastąpi w latach 2013–2020.

Pierwsze publikacje dotyczące pomp ciepła ukazały się już pod koniec XIX wieku, gdzie brytyjski fizyk William Thomson opracował w 1852 teorię pompy ciepła umożliwiającą podgrzewanie i chłodzenie powietrza wykorzystując zmianę jego stanu fizycznego oraz skonstruował pierwsze na świecie urządzenie tego rodzaju, służące do ważenia soli (Szpil, 2004). Wyniki badań tego uczonego opublikowano w 1898r. w Blasberg. Z biegiem czasu instalacje wykorzystujące pompy ciepła cieszyły się

coraz większym zainteresowaniem. W 1914 r. takie urządzenie wykorzystano w farbiarni. Po raz pierwszy do ogrzewania budynku pompę ciepła skonstruował Anglik T.G. Haldane w 1931 r. (Szpil, 2004). W kolejnych latach powstawało wiele instalacji z użyciem pomp ciepła o mocach do kilku megawatów. W 1931 r. wykonano instalację z pompą ciepła o mocy 1,05 MW, ogrzewającą biurowiec w Los Angeles w Stanach Zjednoczonych. Kilka lat później w 1938 r. zastosowano omawiane urządzenie o mocy 175 kW, którym ogrzewano budynek Ratusza Miejskiego w Zurychu, w tym samym roku zbudowano pompę ciepła, która pracuje do dnia dzisiejszego (Rubik, 2008 a).

Podczas II wojny światowej wykonano instalacje z wykorzystaniem pomp ciepła na statkach podwodnych, które ogrzewały i osuszały powietrze.

Po 1945 r. pompy ciepła były najbardziej rozpowszechnione w Stanach Zjednoczonych, gdzie wykorzystywane były do chłodzenia i ogrzewania domów mieszkalnych. Popyt na pompy ciepła wzrósł po kryzysie energetycznym w 1973 r. W 1976 r. powołano Komitet do spraw Pomp Ciepła, który zajmował się koordynowaniem prac z zakresu badawczo rozwojowego. W latach 80-tych XX wieku w Stanach Zjednoczonych około 30 % nowo budowanych domów jednorodzinnych zostało wyposażonych w instalacje grzewcze lub grzewczo-chłodnicze wykorzystujące pompy ciepła. Pod koniec lat 80-tych (1987 r.) Międzynarodowa Agencja Energetyki wprowadziła program propagujący pompy ciepła. Program ten zakładał, że pompy ciepła powinny być głównym systemem instalacji budowlanych łączącym ogrzewanie, chłodzenie, klimatyzację i wentylację pomieszczeń (Rubik, 2008 a). Obecnie najwięcej instalacji z wykorzystaniem pomp ciepła działa w Niemczech i Szwecji, ze względu na fakt wspierania przez rządy tych państw działań proekologicznych.

W Polsce pierwsze instalacje wykorzystujące pompy ciepła wykonano dopiero w 1995 roku. W 2002 r. w Polsce zostało powołane do życia Polskie Stowarzyszenie Pomp Ciepła, które uruchomiło Punkt Konsultacyjny Pomp Ciepła. Jednym z głównych zadań PKPC jest tworzenie bazy danych wykorzystania pomp ciepła w Polsce (Rubik, 2008 a). Obecnie trudno jest oszacować ilość energii uzyskiwanej za pomocą pomp ciepła, gdyż przeważająca ilość instalacji wykonywana jest w domach jednorodzinnych.

Systemy wykorzystujące pompy ciepła mają duże szanse na popularyzację i rozwój ze względu na fakt, iż w ostatnim czasie stworzono wiele dokumentów stawiających na rozwój tej technologii. Dyrektor Departamentu Energetyki Ministerstwa Gospodarki zaprezentował artykuł, w którym zakłada stworzenie sprawnie działającego systemu promowania technologii wykorzystującej pompy ciepła.

European Heat Pump Association opublikowała plan rozwoju pomp ciepła, gdzie założono że do 2020 r. w Europie będzie działać do 70 milionów takich instalacji. Szacuje się, że produkcja energii cieplnej przez systemy wykorzystujące pompy ciepła może wynosić 8167 TJ, co związane jest z planem budowy do 2020 r. 600 instalacji dużej mocy (50–100kW) oraz 3800 małej mocy (10–20 kW) (Cholewa, Siuta-Oлча, 2010).

1.2. Zasada działania pompy ciepła

Pompa ciepła jest urządzeniem, umożliwiającym przekazanie „przepompowanie” energii cieplnej ze źródła niskotemperaturowego, czyli tzw. „dolnego źródła ciepła”, na wyższy poziom energetyczny, który nazywamy „górnym źródłem ciepła”.

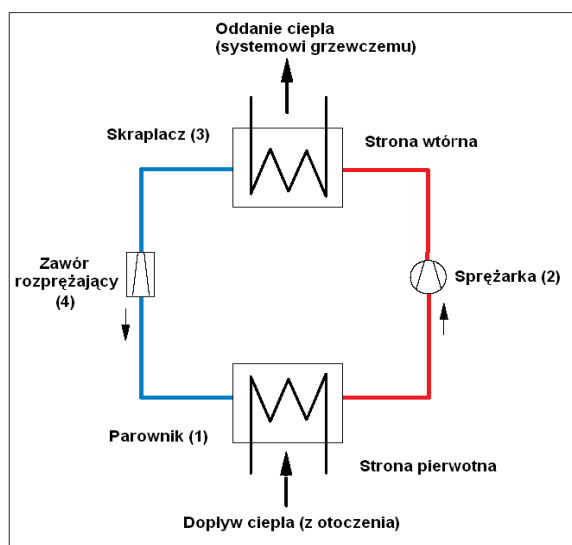
Pompy ciepła możemy podzielić ze względu na sposób podnoszenia ciśnienia i temperatury czynnika roboczego:

- sprężarkowe pompy ciepła,
- sorpcyjne pompy ciepła,
- termoelektryczne pompy ciepła,
- pompy ciepła Vuilleumiera.

Najbardziej ze wszystkich pomp ciepła rozpowszechnione są sprężarkowe pompy ciepła, ze względu na najdłuższy czas funkcjonowania, co pozwoliło na eliminację ich wad technologicznych. Obecnie producenci gwarantują ich bezawaryjną pracę.

W omawianych pompach ciepła transport ciepła odbywa się z wykorzystaniem czynnika roboczego (woda, solanka), który krąży w obiegu zamkniętym w oparciu o bieg Lindego rys. 1. (Rubik, 2008b).

Zasadę działania sprężarkowej pompy ciepła przedstawia na rysunek 1.



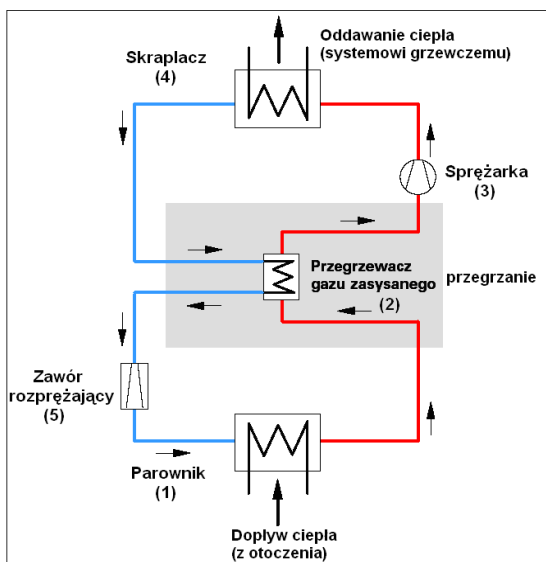
Rys.1. Schemat działania sprężarkowej pompy ciepła [6]
1–parownik, 2–sprężarka, 3–skraplacz, 4–zawór rozprężny

Podczas pobierania ciepła z dolnego źródła energii, czynnik roboczy występuje pod postacią niskiego ciśnienia po stronie pierwotnej układu, w parowniku (1). Wysokość temperatury w otoczeniu parownika (1) przekracza temperaturę wrzenia czynnika będącego w obiegu przy panującym w parowniku ciśnieniu. Wtedy właśnie czynnik roboczy zaczyna parować, kosztem ciepła pobranego z otoczenia. Wysokość

temperatury w takim przypadku może być nawet niższa od 0 [°C]. Następnie sprężarka (2) zasysa odparowany czynnik roboczy z parownika (1) i spręża go. W czasie tego właśnie sprężania wzrasta ciśnienie i temperatura par czynnika. Kolejnym etapem działania pompy ciepła jest przetłaczanie przez sprężarkę (2) pary czynnika na stronę wtórną do skraplacza (3). Skraplacz ten jest umieszczony w wodzie centralnego ogrzewania. Temperatura skraplania czynnika roboczego w stanie gazowym jest znacznie wyższa od temperatura wody grzewczej. Dzięki temu procesowi, pary te schładzają się i ponownie skraplają. Całe ciepło pobrane w parowniku (1) i dodatkowa energia doprowadzona w czasie sprężania zostaje automatycznie oddana wodzie grzewczej. Następnie skroplony czynnik roboczy wraca do parownika (1) przez zawór rozprężny (4). W zaworze tym czynnik roboczy rozpręża się z wysokiego ciśnienia panującego w skraplaczu (3) do niskiego ciśnienia występującego w parowniku (1). W czasie zmiany ciśnienia z wysokiego na niskie czynnik roboczy obniża swoją temperaturę i w ten oto sposób obieg się zamyka.

Zastosowany w pompie ciepła czynnik chłodniczy R407C jest mieszaniną trzech składników. Każdy z nich posiada własną temperaturę parowania. Z tego też względu w pompach ciepła stosuje się specjalny przegrzewacz gaz zasysanego, który gwarantuje odparowanie każdego składnika występującego w czynniku chłodniczym. Zastosowanie takiego rozwiązania eliminuje efekt zasysania cieczy do sprężarki co poprawia współczynnik efektywności obiegu termodynamicznego.

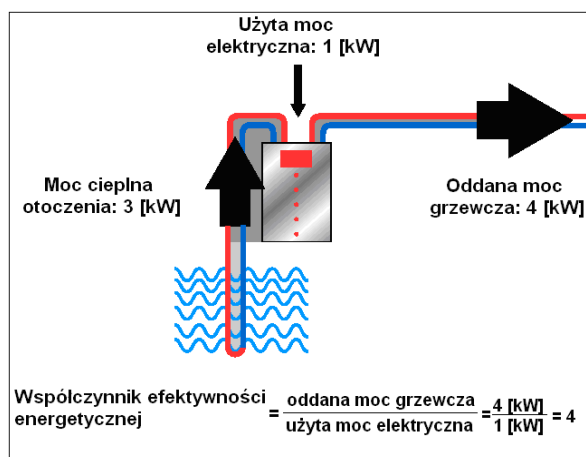
Schemat działania pompy ciepła z przegrzewaczem gazu zasysanego został przedstawiony na rysunku 2.



Rys.2. Schemat działania pompy ciepła z przegrzewaczem gazu zasysanego [6], 1–Parownik, 2–Przegrzewacz gazu zasysanego, 3–Sprężarka, 4–Skraplacz, 5–Zawór rozprężny

Rozwiązanie przedstawione na rys. 2. polega na przekazaniu pozostałego ciepła występującego w czynniku roboczym za skraplaczem (4) na stronę par czynnika przed sprężarką (3). Takie przekazanie ciepła odbywa się przy pomocy specjalnego wymiennika ciepła i powoduje po stronie zimnej wzrost ciśnienia a po stronie ciepłej spadek. Zmniejszenie się różnicy ciśnień między stronami (zimna i ciepłą) powoduje zmniejszenie pracy jaką musi wykonać sprężarka (3)

Przykład obliczania współczynnika efektywności energetycznej został przedstawiony na rys. 3.



Rys.3. Obliczanie współczynnika efektywności energetycznej [6]

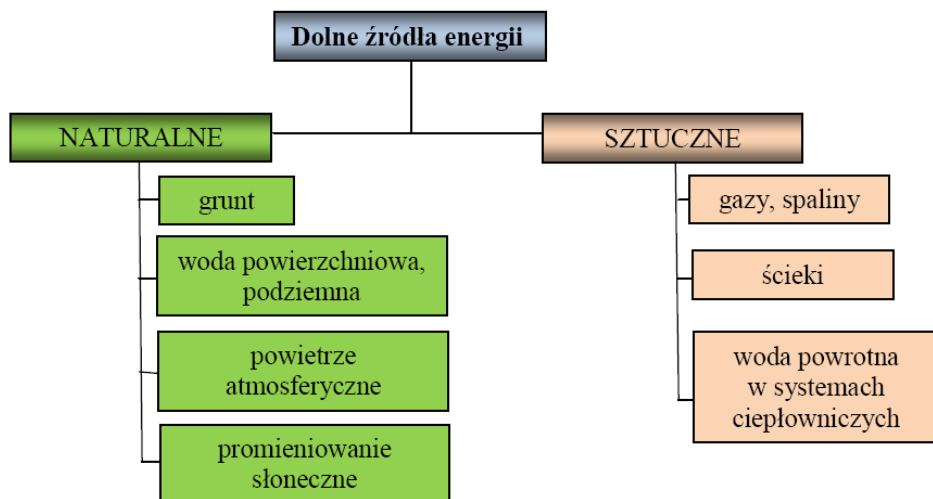
1.3. Dolne źródła ciepła niskotemperaturowego dla pomp ciepła

Źródła ciepła niskotemperaturowego podzielić można na dwie główne grupy; ciepło odpadowe, ciepło uzyskiwane ze środowiska.

Ciepło odpadowe możemy uzyskać m.in. ze ścieków, wody chłodniczej pochodzącej z procesów przemysłowych i spalin, natomiast ciepło ze środowiska można pobierać z powietrza zewnętrznego, wód gruntowych i powierzchniowych, gruntu oraz promieniowania słonecznego.

Dolne źródło ciepła niskotemperaturowego powinno cechować się m.in.;

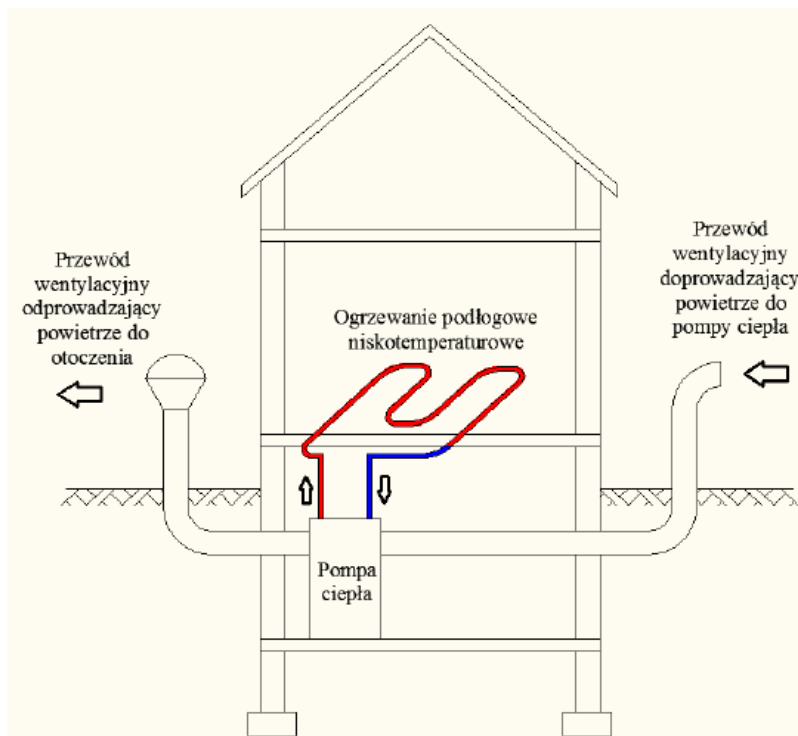
- dużą pojemnością cieplną,
- wysoką i stałą temperaturą
- być neutralne wobec instalacji – nie wywoływać procesu korozji,
- koszty wykonania w źródle instalacji powinny być możliwie jak najmniejsze, źródło to powinno być łatwo dostępne.



Rys. 4. Klasyfikacja dolnych źródeł energii dla pomp ciepła

Źródła ciepła niskotemperaturowego mogą funkcjonować pojedynczo lub w układzie dwóch różnych źródeł, w przypadku, gdy jedno ze źródeł ma za małą moc lub zbyt dużą zmienność temperatury w czasie. Temperatura źródła w sposób istotny wpływa na sprawność pompy ciepła i im jest wyższa tym osiąga większą sprawność urządzenia. Temperatura źródeł, gdzie ciepło uzyskiwane jest ze środowiska charakteryzuje się sezonową zmiennością czyli zależy od pór roku. Temperatura źródeł ciepła odpadowego zależy natomiast od przebiegu procesu przemysłowego, a pory roku zazwyczaj nie mają na nią wpływu. Ze względu na sezonową zmienność temperatury źródeł, gdzie ciepło uzyskiwane jest ze środowiska w przypadku pomp ciepła występujących w instalacjach centralnego ogrzewania istotnym czynnikiem powodującym spadek sprawności urządzenia, jest fakt, że temperatura źródła jest niższa zimą w okresie największego zapotrzebowania na moc cieplną. Najmniejszym spadkiem sprawności charakteryzują się pompy uzyskujące ciepło z wód gruntowych, zaś największy spadek sprawności uzyskują urządzenia odzyskujące ciepło z powietrza zewnętrznego.

Badana na ćwiczeniach laboratoryjnych pompa ciepła wykorzystuje jako dolne źródło ciepła powietrze atmosferyczne. Powietrze atmosferyczne jest najłatwiej dostępnym źródłem ciepła, a jego jest zaletą zdecydowanie najmniejszy koszt inwestycyjny, który należy ponieść aby odzyskać z niego ciepło. Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu pompy ciepła pozyskującej ciepło z powietrza.



Rys. 5. Schemat układu pozyskiwania ciepła z powietrza

Powietrze zewnętrzne jest często wykorzystywane jako źródło ciepła niskotemperaturowego do przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz w instalacjach centralnego ogrzewania małej i średniej mocy do ogrzewania domów jednorodzinnych. Wadą takiego źródła ciepła jest niewątpliwie fakt wykorzystywania przez pompy ciepła powietrza przy niskich temperaturach panujących na zewnątrz - rzędu -20°C i nie jest więc w stanie pokryć całkowitego zapotrzebowania na ciepło potrzebne do ogrzewania budynku, z tego względu niezbędnym staje się dodatkowe dogrzewanie wody grzewczej za pomocą innego urządzenia, jakim może być np. kocioł gazowy czy dodatkowa grzałka elektryczna. Kolejną wadą tego systemu jest powstający w instalacji szum. Ze względu na dość duży przepływ powietrza zewnętrznego przez urządzenie może powstać uciążliwy hałas. Szum powstaje również w parowniku, gdy temperatura powietrza pobieranego z zewnątrz spada poniżej 0°C . Na powierzchni parownika powstaje wówczas warstwa szronu, która powoduje wzrost oporów przepływu, a w konsekwencji zwiększona emisję hałasu. W bardzo niskich temperaturach szron może uniemożliwić przepływ powietrza przez parownik, aby temu zapobiec stosuje się urządzenia odszraniające. Parownik może być odszraniany za pomocą nagrzewnicy elektrycznej ogrzewającej zasysane powietrze lub poprzez okresowe skierowanie gorącej pary czynnika roboczego poprzez zawór czterodrożny zamiast do skraplacza na zaszniony parownik.

Niekorzystną cechą powietrza jest również mała pojemność cieplna, dlatego należy przetłaczać przez parownik duży strumień powietrza, co powoduje wzrost zużycia energii poprzez wentylator i przez to obniża się sprawność pompy ciepła. Wadą powietrza jako źródła powietrza niskotemperaturowego jest fakt, iż cechuje się ono dużą zmiennością temperatury zarówno sezonową jak i dobową.

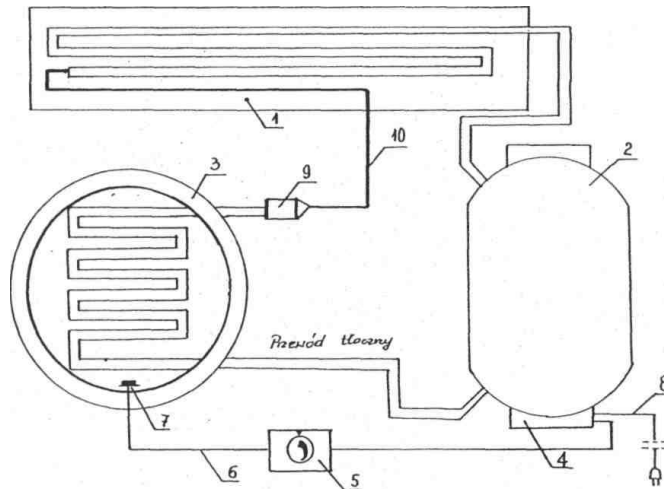
2. BADANIA LABORATORYJNE

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z budową i zasadą działania sprężarkowej pompy ciepła. Pomiary realizowane będą przy wykorzystaniu modelu pompy ciepła, który został zbudowany w Instytucie podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii w ramach realizowanej pracy dyplomowej.

2.1. Budowa modelu pompy ciepła

W skład stanowiska wchodzi: parownik, sprężarka hermetyczna napędzana silnikiem o mocy 150W skraplacz umieszczony w zbiorniku z wodą chłodzącą. Czynnikiem roboczym jest freon R-12 w ilości 0,15kg, co zapewnia nadciśnienie przy pracującej sprężarce rzędu 0,08 MPa. Schemat modelu pompy ciepła przedstawia rys.6. Przed badaniami zapoznać się z instrukcją stanowiskową BHP oraz instrukcjami obsługi badanych urządzeń i mierników.

O wszelkich nieprawidłowościach w pracy przyrządów należy natychmiast powiadomić prowadzącego zajęcia.



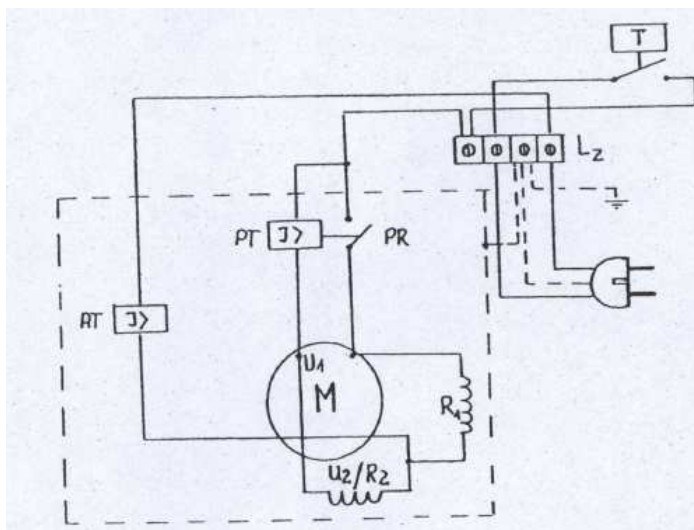
Rys. 6. Schemat modelu pompy ciepła:

- 1 - parownik (źródło dolne), 2 – sprężarka hermetyczna, 3 – skraplacz (zbiornik wody), węzeł elektryczny, 5 – termostat, 6 – kapilara termostatu, 7 – czujnik termostatu, 8 – przewody zasilające, 9 – filtr mechaniczny freonu, 10 – rurka kapilarna

2.2. Zasada działania układu modelowego

Sprężarka spręża pary freonu i tłoczy do węzownicy zanurzonej w zbiorniku z wodą ($p=0,7$ MPa). Para oddaje ciepło wodzie, skrapla się i w postaci cieczy przepływa przez filtr mechaniczny i rurkę kapilarną, która spełnia rolę zaworu rozprężnego.

W parowniku wskutek przejścia z rurki kapilarnej do rurki skraplaczu o ponad dziesięciokrotnie większej średnicy następuje efekt rozprężenia ciekłego freonu w pary gazu ($p=0,08$ MPa). Freon w postaci gazowej, ogrzany w parowniku wraca do sprężarki i cykl się powtarza. Schemat elektryczny modelu pompy ciepła przedstawia rys.7.



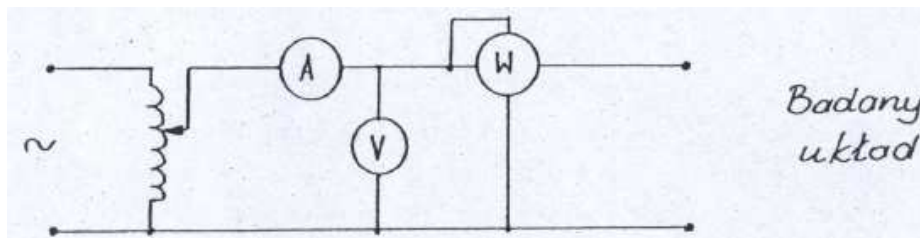
Rys. 7. Schemat elektryczny pompy ciepła

M – silnik jednofazowy sprężarki, PR – przełącznik rozruchowy, PT – przełącznik termiczny, T – termostat, R1-R2 – uzwojenie rozruchowe, U1-U2 – uzwojenie robocze

2.3. Badanie pompy ciepła

Należy zestawić układ pomiarowy według rysunku nr 8, a następnie przeprowadzić badania podczas nagrzewania wody w zbiorniku w układzie:

- grzanie wody w zbiorniku za pomocą pompy ciepła
- grzanie wody w zbiorniku za pomocą grzałki elektrycznej
- grzanie wody w zbiorniku za pomocą pompy ciepła z nawiewem gorącym powietrzem na parownik.



Rys.8. Schemat układu pomiarowego

W każdym z pomiarów należy zapewnić identyczne warunki tzn: moc na zasilaniu układu $P=150\text{W}$, początkowa temperatura wody $t_p \approx 15^\circ\text{C}$, czas grzania wody $\tau=30\text{min}$, $V=2,5\text{dm}^3$.

Wykonać obliczenia energii cieplnej akumulowanej w wodzie (ciepło użyteczne)

$$Q_u = cm\Delta t = P_u\tau$$

Gdzie: Q_u – energia cieplna zakumulowana w wodzie

c – ciepło właściwe wody

m – masa wody

Δt – przyrost temperatury, $\Delta t = t_k - t_p$, t_k – temperatura końcowa grzanej wody

t_p – temperatura początkowa wody

P_u – moc użyteczna

τ – czas grzania.

Dokonać pomiarów temperatury wody w czasie jej grzania, wykreślić przebieg temperatury w funkcji czasu $t_w(\tau)$.

Tab. 1.1. Wyniki pomiarów temperatury

$t_p =$										
τ	min.	3	9	12	15	18	21	24	27	30
t	$^\circ\text{C}$									

Następnie obliczyć współczynnik efektywności pompy ciepła (układ a i c)

$$\varepsilon = \frac{Q_u}{Q_{el}} = \frac{P_u}{P_{el}}$$

oraz sprawność grzałki (układ b)

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{el}} = \frac{P_u}{P_{el}}$$

Literatura do ćwiczenia 4

- [1] Rubik M., *Pompy ciepła – poradnik*, wydanie III rozszerzone, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie” Warszawa 2006
- [2] Raczkowski A., Matczuk J., Mitura T., Białach M., *Możliwości rozwoju energetyki odnawialnej w województwie lubelskim*, publikacja wydana w związku z realizacją projektu „Czysta energia dla Lubelszczyzny” 2011
- [3] Rubik M., 2008 a, *Pompy ciepła – część 1, Zarys historyczny, informacje ogólne i sytuacja rynkowa*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 4/2008, 17–20
- [4] Rubik M., 2008 b, *Pompy ciepła - część 3, Rzeczywiste obiegi sprężarkowych pomp ciepła, czynniki robocze, klasyfikacja i budowa pomp ciepła*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 6/2008, 3–6
- [5] Rubik M., 2008 c, *Pompy ciepła – część 4, Dolne źródła ciepła - budowa i wymiarowanie gruntowych wymienników ciepła*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 7–8/2008, 6–10
- [6] Rubik M., 2008 d, *Pompy ciepła – część 5, Dolne źródła ciepła - budowa i wymiarowanie gruntowych wymienników ciepła (c.d.)*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, nr 9/2008, 3-7
- [7] Stiebel eltron, *Pompy Ciepła – wytyczne projektowe*, 2/2006
- [8] Szpil Z., 2004, *Pompy ciepła i ich praktyczne zastosowanie*, Aura, nr 1/2004, 15–16
- [9] Viessmann, *Wytyczne projektowe*, 4/2008
- [10] Zeszyty fachowe Pompy ciepła Viessmann, 2008
- [11] Czechowska-Kosacka A. : *Projekt niskotemperaturowego źródła ciepła w postaci pompy ciepła typu solanka/woda dla budynku jednorodzinnego*, Lublin 2011 – praca dyplomowa
- [12] Bodziak K., Nalewaj K. : *Badanie modelu pompy ciepła*. IV Sympozjum nt. Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii Białystok 27– 30 września, 1995, s. 39–46.

Ćwiczenie 5

Badanie ogrzewacza wody z pompą ciepła typu OW-120PC

1.1. Wprowadzenie teoretyczne

Podstawowym czynnikiem decydującym o wykorzystywanym w danym kraju typie pomp ciepła są warunki klimatyczne. Np. w Japonii, gdzie technika klimatyzacyjna jest szeroko stosowana, prawie wszystkie typy pomp ciepła są produkowane i pracują w cyklu odwracalnym. Podobna sytuacja obserwowana jest w Stanach Zjednoczonych, w Europie we Francji, gdzie tradycyjnie stosowane jest powietrzne ogrzewanie i chłodzenie pomieszczeń.

W przeciwieństwie do geotermii wykorzystującej źródła wysokotemperaturowe, geotermia niskiej entalpii (niskotemperaturowa), po długim okresie stagnacji w latach 80-tych i na początku lat 90-tych XX wieku, przeżywa obecnie na świecie prawdziwy rozkwit i jest jedną z najszybciej rozwijających się dziedzin w zakresie wykorzystania energii odnawialnych.

Średni roczny wzrost liczby instalowanych pomp ciepła jest oceniany na około 10% w ciągu ostatnich 10 lat (Lund, 2003) i z roku na rok wyraźnie się zwiększa. Według „EurObserv'ER” (XII/2005), na koniec 2004 r. łączna moc zainstalowanych na świecie pomp ciepła wynosiła około 13 815 MWth wobec 5275 MWth w 2000 r., wzrosła więc 2,6 raza.

USA jest krajem o najdłuższych tradycjach i doświadczeniu w stosowaniu pomp ciepła do odzysku ciepła zgromadzonego w skałach i wodach podziemnych. Pierwsze instalacje grzewcze wykorzystujące pompy ciepła powstały w USA w latach 40-tych XX wieku. Dopiero jednak od lat 70-tych możemy mówić o stałym i dynamicznym rozwoju tej technologii. W latach 90-tych postęp technologiczny w zakresie pomp ciepła był już tak zaawansowany, że ich stosowanie do celów grzewczych stało się bardzo konkurencyjne ekonomicznie w stosunku do konwencjonalnych źródeł energii. Dostrzegając zalety nowej technologii, rząd USA w ustawie Prawo Energetyczne z 1992 r. (ang. Energy Policy Act) zawarł postanowienia o wspieraniu rozwoju geotermii niskotemperaturowej jako alternatywnego, odnawialnego źródła energii.

W latach 1994 i 1999 prezydent Clinton podpisał specjalne rozporządzenia wykonawcze do tej ustawy dotyczące zwiększenia efektywności energetycznej w budynkach publicznych i obniżenia kosztów ich ogrzewania oraz klimatyzacji, głównie przez upowszechnienie systemów pomp ciepła. Cele, jakie zostały nakreślone w tych rozporządzeniach, to zmniejszenie o 35% zużycia energii i zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 30% w 2010 r. w stosunku do roku 1990.

Dla ich osiągnięcia EPA - Environmental Protection Agency i DOE - U.S. Department of Energy opracowały specjalny narodowy program rozwoju geotermalnych pomp ciepła o nazwie FEMP (ang. Federal Energy Management Program). Dzięki programowi FEMP Federal Energy Management ponad 20% wszystkich nowo instalowanych systemów pomp ciepła wykonywanych jest na zlecenie instytucji państwowych, w tym głównie armii. Według najnowszych danych publikowanych przez GHPC (Geothermal Heat Pump Consortium, Inc., Washington), na koniec 2004 r. w USA było zainstalowanych około 900000 instalacji pomp ciepła, głównie w południowo-zachodnich i wschodnich stanach.

Z doświadczeń amerykańskich korzystały i cały czas korzystają kraje europejskie rozwijające własne programy rozwoju systemów z pompami ciepła. Europa jako kontynent, z rocznym przyrostem nowych instalacji pomp ciepła rzędu 70 000 w roku 2004, szybko nadrabia zaległości w stosunku do USA.

W krajach o wyjątkowo korzystnych warunkach występowania wód termalnych, umożliwiających ich łatwe, bezpośrednie wykorzystanie (Islandia, Węgry, Słowacja, w mniejszym stopniu także Włochy, Grecja, Słowenia) zainteresowanie tego typu urządzeniami jest niewielkie lub prawie zerowe. W przypadku krajów skandynawskich; Niemiec, Austrii, Holandii, Litwy i Estonii oraz Belgii, Irlandii, Czech, Szwajcarii, energia geotermalna odzyskiwana jest głównie lub wyłącznie za pomocą instalacji pomp ciepła [Kapuściński, Rodzoch; Geotermia nisko temperaturowa].

W Europie, od wielu już lat liderem w zakresie wykorzystania GPC jest Szwecja, na którą przypada około połowa wszystkich zainstalowanych na kontynencie urządzeń i około 37% łącznej ich mocy. Jednocześnie w kraju tym utrzymuje się cały czas bardzo wysoki wskaźnik wzrostu rynku sięgający około 27% w 2004 r. Spośród pozostałych krajów europejskich, duży i mniej więcej porównywalny udział w rynku, rzędu 12–14% zainstalowanej mocy, mają 4 kraje: Niemcy, Francja, Austria i Szwajcaria, ich łączny udział sięga 54% [Kapuściński, Rodzoch; Geotermia nisko temperaturowa]

1.2 Polskie pompy ciepła – rys historyczny

W Polsce pierwsze pompy ciepła zaczęto instalować na początku lat dziewięćdziesiątych. Były to urządzenia importowane i bardzo kosztowne, uruchomiona produkcja krajowa spowodowała znaczną obniżkę ceny tych urządzeń. Jako pierwsza podjęła się tego zadania firma EDA S.A. z Poniatowej, wypuszczając na rynek w 1992 r. ogrzewacze wody z pompą ciepła typ OW 120 PC. Ogrzewacze te spotkały się z dość dużym zainteresowaniem, gdyż w pełni zastępują tradycyjne ogrzewacze wody (np. gazowe lub z grzałką elektryczną – bojler) i dają jednocześnie wymierne korzyści ekonomiczne.

Ogrzewacze wody użytkowej OW 120PC są wyposażone w pompy ciepła typu powietrze-woda i wykonane są w wersji kompakt (urządzenie stanowi jedną całość).

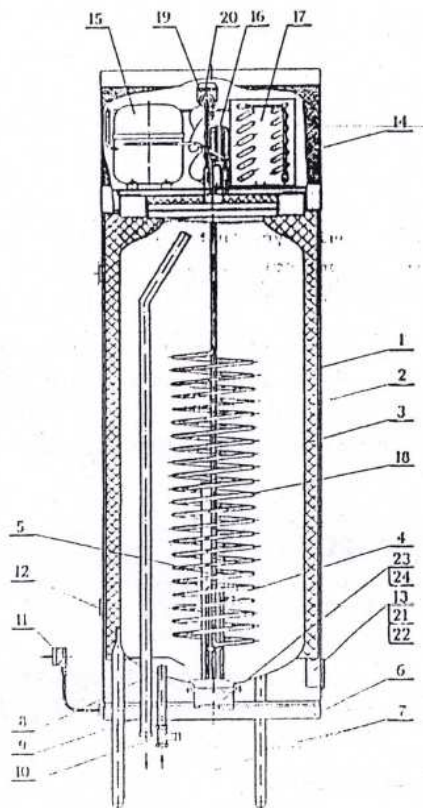
Ciepło pobierane jest przez parownik z powietrza otaczającego ogrzewacz i następnie przepompowywane przez agregat pompy ciepła do skraplacza, który przekazuje je do wody. Urządzenie pracuje w temperaturze otoczenia (powietrza) od 5 do 35 °C. Ogrzewacz ten zbudowany został na bazie zbiornika wody wykonanego z blachy stalowej, zabezpieczonej cynkową powłoką antykorozyjną. Obudowa zewnętrzna pokryta jest emalią piecową, co zabezpiecza przed korozją oraz nadaje estetyczny wygląd. W celu uniknięcia strat ciepła zastosowano izolację z poliuretanu twardego. Dodatkowo zainstalowana anoda magnezowa zwiększa trwałość zbiornika. Urządzenie wyposażone jest w grzałkę elektryczną o mocy 1,5 kW wspomagającą pompę ciepła, gdy wymagane jest szybkie uzyskanie ciepłej wody lub ogrzanie jej do wyższej temperatury (ponad 45 °C).

Użytkownik ma możliwość wyboru sposobu grzania wody, lecz podstawowym i zalecanym jest grzanie wody do temperatury 45 °C przy pomocy pompy ciepła. Zużywa się wówczas trzy razy mniej energii elektrycznej w stosunku do ogrzewania grzałką elektryczną. Możliwe jest także jednoczesne grzanie wody pompą ciepła i grzałką elektryczną, zależy to tylko od potrzeb i wyboru korzystającego z urządzenia. Wybranie sposobu ogrzewania wody jest proste i sprowadza się do załączenia odpowiednich łączników umieszczonych na płycie czołowej ogrzewacza. Ogrzewanie wody pompą ciepła od 15 do 45 °C trwa około 6 h, a zużycie energii elektrycznej wyniesie około 2 kWh. Budowę ogrzewacza OW 120 PC przedstawia rysunek nr 1.

Duże zapotrzebowanie rynku spowodowało że, uruchomiono produkcję nowych, ulepszonych ogrzewaczy wody z pompą ciepła, o większej pojemności zbiornika – 150 i 300 litrów (typ OW 150 PC i OW 300 PC). Wprowadzono do nich szereg zmian poprawiających ich funkcjonalność (zbiornik stalowy – stal St3 SX, wewnątrz podwójnie emaliowany emalią ceramiczną, z magnezową anodą antykorozyjną, izolacja z poliuretanu miękkiego – 80 mm grubości). Osiągnięto dzięki temu zmniejszenie zużycia energii elektrycznej i zwiększenie trwałości zbiornika wody. Agregaty nowych pomp ciepła wykorzystują ekologiczny czynnik chłodniczy – R134a.

Również inne polskie firmy rozpoczęły w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia produkcję pomp ciepła. W Tarnowie – Zakłady Mechaniczne "TARNÓW" S.A. i w Gdańsku – "SeCeS-Pol" Sp. z o.o, firmy te produkują pompy ciepła przeznaczone do ogrzewania pomieszczeń. Produkowane przez ZM "Tarnów" pompy ciepła przeznaczone były do ogrzewania takich obiektów jak: domki jednorodzinne, hotele, szkoły, małe bloki mieszkalne, obiekty sportowe i sakralne, we współpracy z kotłem co. lub samodzielnie w przypadku dużej powierzchni wymienników ciepła (co.) oraz wystarczająco wysokiej temperatury źródła dolnego. Pompy te wykonywane są w dwóch systemach: system: A – z czynnikiem pośredniczącym (woda–woda) oraz system B – czynnik roboczy odparowywany jest bezpośrednio w kolektorze (ziemia–woda). W ich skład wchodzi trzy podstawowe układy: układ chłodniczy, układ grzejny (skraplacz) i układ kolektorowy (parownik). W lutym 1995 roku firma SeCeS-Pol (producent wymienników ciepła) rozpoczęła seryjną produkcję

pomp ciepła opartych na własnej technologii. Oferowane pompy ciepła posiadają możliwość grzania lub chłodzenia oraz wykorzystania tych dwóch funkcji naraz.



Rys. 1. Ogrzewacz typu OW 120PC

1-obudowa, 2-izolacja cieplna, 3-zbiornik, 4-grzałka, 5-anoda antykorozyjna, 6-dno obudowy, 7-nóżki, 8-rura odprowadzająca wodę, 9-rura doprowadzająca wodę, 10-zawór bezpieczeństwa, 11-przewód przyłączeniowy, 12-wspornik obudowy, 13-regulator temperatury, 14-osłona agregatu, 15-sprężarka, 16-wentylator, 17-parownik, 18-skrapłacz, 19-zawór rozprężny, 20-odwadniacz, 21-łącznik klawiszowy, 22-łącznik klawiszowy podświetlany, 23-ogranicznik temperatury, 24-przełącznik

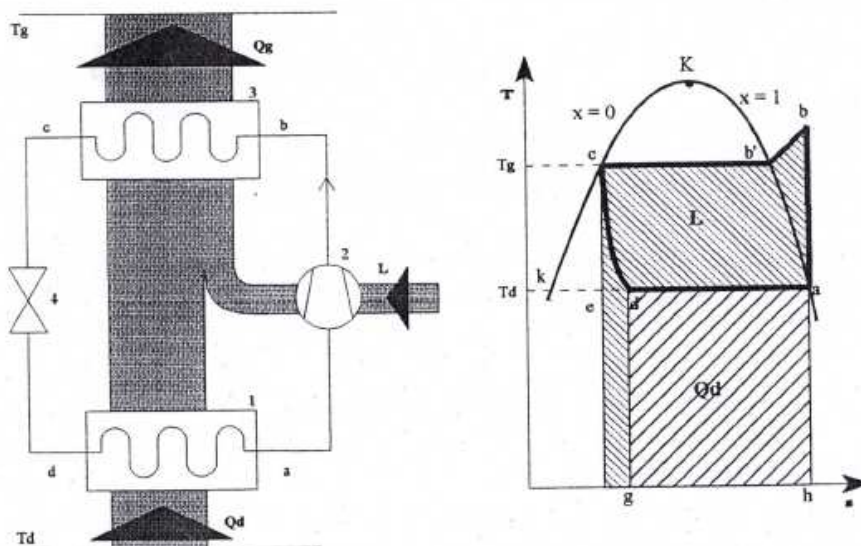
Budowa pomp ciepła firmy SeCeS-Pol pozwala na wykorzystanie różnych źródeł energii cieplnej. Mogą one pracować w układzie woda-woda (woda studzienna o temperaturze powyżej 5°C) oraz glikol-woda (wymyennik gruntowy lub instalacja powietrzna), co daje możliwość korzystania ze wszystkich dolnych źródeł ciepła poprzez zewnętrzne wymienniki ciepła. Pompy te można podzielić na urządzenia małej mocy 6–30 kW i średniej mocy 30–70 kW. Pompy dużej mocy do kilku MW wykonywane są na zamówienie.

1.3. Zasada działania pompy ciepła

W pompie ciepła zachodzi podnoszenie potencjału cieplnego, tj. proces przekazywania ciepła z ośrodka o temperaturze niższej (zwane źródłem dolnym) do ośrodka o temperaturze wyższej (zwane źródłem górnym).

Zgodnie z II zasadą termodynamiki wymaga to doprowadzenia energii napędowej, przy czym podnoszenie potencjału cieplnego odbywa się za pośrednictwem czynnika termodynamicznego, który krążąc w układzie pompy ciepła wykonuje obieg termodynamiczny wstecz. Schemat działania pompy ciepła oraz odpowiadający mu obieg termodynamiczny Lindego przedstawia rys.2.

Zasada pracy pompy ciepła polega na wykorzystaniu jako ciepła użytecznego ciepła skraplania pary czynnika termodynamicznego w warunkach wysokiej temperatury. Ciekły czynnik termodynamiczny odpływający ze skraplacza zostaje zdławiony w zaworze rozprężnym i odparowuje w parowniku w warunkach obniżonego ciśnienia i temperatury pobierając energię cieplną. Para odpływająca z parownika zostaje, kosztem energii napędowej dostarczanej z zewnątrz, sprężona do wymaganego ciśnienia skraplania.



Rys. 2. Schemat sprężarkowej pompy ciepła oraz obieg Lindego
 1 – Parownik; 2 – Sprężarka; 3 – Skraplacz; 4 – Zawór rozprężny; T_d – Temperatura źródła dolnego;
 T_g – Temperatura źródła górnego; Q_d – Ciepło pobrane ze źródła dolnego; Q_g – Ciepło oddane do
 źródła górnego; L – Energia zużyta na sprężanie pary czynnika

Czynnik znajdujący się w parowniku pobiera ciepło ze źródła dolnego (przemiana izobaryczno-izotermiczna), którego temperatura wynosi T_d . Pobrane ciepło powoduje intensywne parowanie czynnika, który w postaci pary o stanie "a" dostaje się do sprężarki, gdzie ulega mechanicznemu sprężeniu i podnosi swoją temperaturę (przemiana adiabatyczna). Po sprężeniu, para o stanie "b" wpływa do skraplacza, stanowiącego ujęcie źródła górnego pompy ciepła. Para ta kondensuje przy stałym ciśnieniu oraz przy stałej temperaturze (przemiana izobaryczno-izotermiczna) oddając ciepło. Po kondensacji ciecz o stanie "c" ulega rozprężeniu w zaworze rozprężnym (przemiana adiabatyczna), Rozprężona do stanu "d" mieszanina dwufazowa, o przeważającej zawartości cieczy, płynie do parownika, gdzie znów odparowuje w warunkach izobaryczno-izotermicznych, a następnie para o stanie "a" wpływa do sprężarki, zamykając w ten sposób obieg czynnika.

Bilans energetyczny pompy ciepła ma postać:

$$Q_g = Q_d + L$$

gdzie:

Q_g – ciepło oddane w źródle górnym,

Q_d – ciepło pobrane ze źródła dolnego,

L – energia zużyta na sprężanie pary czynnika (praca sprężarki).

Do oceny przydatności pompy ciepła służy współczynnik efektywności grzewczej " ε ", który wyrażona jest poprzez iloraz uzyskanej w źródle górnym energii cieplnej i zużycia energii na pracę sprężarki:

$$\varepsilon = \frac{Q_g}{L} = \frac{L + Q_d}{L} = 1 + \frac{Q_d}{L}$$

Analizując powyższą zależność można stwierdzić, że współczynnik efektywności grzewczej pompy ciepła nigdy nie jest mniejszy od jedności, gdy tymczasem sprawność innych urządzeń grzewczych nie przekracza 1.

Teoretyczna maksymalna wartość współczynnika efektywności grzewczej pompy ciepła zależy jedynie od temperatury źródeł i zdefiniowana jest wzorem:

$$\varepsilon_T = \frac{T_g}{T_g - T_d}$$

gdzie:

T_g – temperatura źródła górnego (temp. skraplania czynnika)

T_d – temperatura źródła dolnego (temp. parowania czynnika)

Ze wzoru tego wynika, że efektywność grzewcza jest tym wyższa, im mniejsza jest różnica temperatur źródeł ($T_g - T_d$). Wartości współczynnika efektywności grzewczej pomp ciepła zawierają zwykle w granicach od 2 do 4.

Do źródeł dolnych pomp ciepła należą:

a) źródła naturalne:

- powietrze atmosferyczne,
- wody powierzchniowe,
- wody podziemne,

- grunt,
- energia słoneczna.
- b) źródła sztuczne:
 - ciepło odpadowe procesów echnologicznych.

Czynnik roboczy jest nośnikiem energii w pompie ciepła. Krążąc w zamkniętym obiegu pompy ulega przemianom termodynamicznym, podczas których może przenosić, odbierać o oddawać energię ze źródła dolnego do źródła górnego (Rubik, 2008b). Czynnikami tymi są związki chemiczne występujące w przyrodzie w postaci gazu lub otrzymywane syntetycznie. Czynniki robocze powinny charakteryzować się stabilnością chemiczną w całym zakresie temperatury roboczej, być niepalne, niewybuchowe oraz być obojętnymi w stosunku do materiałów, z których zbudowana jest pompa ciepła. Ponad to czynnik roboczy nie powinien negatywnie oddziaływać na środowisko naturalne, poza tym musi charakteryzować się niskim ciśnieniem skraplania, korzystnym przebiegiem krzywych nasycenia oraz posiadać wysoką objętościowa wydajność grzewczą, co wpływa na zmniejszenie objętości czynnika i rozmiaru sprężarki.

Najczęściej stosowanymi czynnikami roboczymi pomp ciepła są hlory fluorowcopochodne węglowodorów alifatycznych, wśród których dominującą rolę odgrywają w ostatnim czasie freony: R 290, R 22 i R 134a (dzięki ich znikomej szkodliwości dla ozonu i dość dobrym właściwościom termodynamicznym).

1.4. Systemy i sposoby eksploatacji pomp ciepła

Systemy pomp ciepła dzieli się ze względu na rodzaj nośników ciepła źródła dolnego i górnego.

Wyróżniamy cztery podstawowe systemy: woda-woda (W/W), woda-powietrze (W/P), powietrze-woda (A/W) oraz powietrze-powietrze (A/A).

1.4.1 System woda – woda

System woda-woda realizowany może być przy użyciu w obiegu dolnego źródła jako nośnika ciepła nie tylko wody, ale również solanki czy glikolu. Dlatego występuje dodatkowy podział systemu woda-woda (W/W) oraz solanka/glikol-woda (B/W). Ze względu na duże współczynniki przejmowania ciepła wody, glikolu i solanki, czynniki te stanowią grupę dobrych nośników ciepła. W systemie tym nośnikiem ciepła jest ujęta woda powierzchniowa, gruntowa lub głębinowa może być tłoczona do parownika po uprzednim spełnieniu wymogów jakościowych zawsze podawanych przez producenta. W przypadku, gdy woda nie spełnia wymagań producenta, należy zastosować obieg pośredni z dodatkowym wymiennikiem ciepła.

System solanka/glikol – woda wykorzystywany jest najczęściej przy odzyskiwaniu ciepła ze źródła niskotemperaturowego, jakim jest grunt. Glikol lub solanka pracuje w obiegu zamkniętym z kolektora gruntowego do parownika i schłodzony

z powrotem spływa do wymiennika gruntowego. W tym układzie górne źródło ciepła wysokotemperaturowego stanowi woda grzewcza.

1.4.2 System woda – powietrze

System woda-powietrze można zrealizować poprzez zastosowanie w obiegu dolnego źródła jako nośnika ciepła nie tylko wody, ale również solanki lub glikolu. Dlatego system woda-powietrze można podzielić na system woda-powietrze oraz solanka/glikol-woda.

Odbieranie ciepła w tym systemie z dolnego źródła ciepła niskotemperaturowego (wody powierzchniowe, podziemne i głębinowe oraz grunt) odbywa się analogicznie jak w układzie woda-woda. Górnym źródłem wysokotemperaturowym jest powietrze.

1.4.3 System powietrze – woda

W systemie tym odzysk z dolnego źródła niskotemperaturowego jakim jest powietrze, realizowany jest w sposób prosty, dlatego nie wymaga dużych nakładów finansowych. Wadą powietrza jako nośnika energii cieplnej jest słaby współczynnik przejmowania ciepła, a w konsekwencji również i niski współczynnik przenikania ciepła, co wpływa na gorszy odbiór energii cieplnej z powietrza w parowniku pompy ciepła. Górnym źródłem wysokotemperaturowym jest woda grzewcza.

1.4.4 System powietrze – powietrze

W tym systemie zarówno w dolnym jak i górnym źródle nośnikiem ciepła jest powietrze. Systemy powietrze-powietrze wykorzystują energię cieplną zawartą w powietrzu atmosferycznym jako źródło energii do produkcji ciepła. Ciepło następnie transferowane jest do budynku w formie strumienia ciepłego powietrza. Jest to jeden z najpopularniejszych typów pomp ciepła stosowanych głównie w krajach z umiarkowanym klimatem. Ich moc może się wahać od 3kW do 100kW. Niektóre modele są zdolne równocześnie chłodzić te pomieszczenia, w których jest to wymagane i transferować ciepło do pomieszczeń, które wymagają ogrzewania.

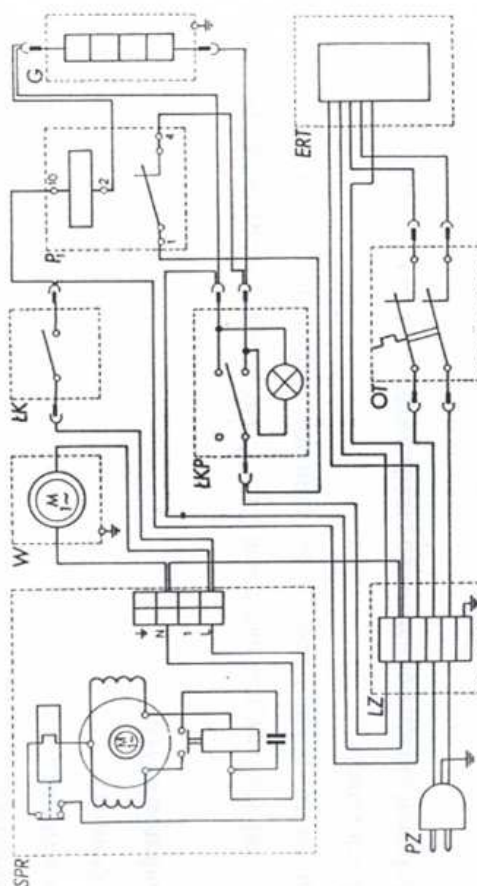
3. Badanie ogrzewacza OW 120 PC

Ogrzewacz OW 120 PC przeznaczony jest do ogrzewania i przechowywania ciepłej wody użytkowej. Składa się on z dwóch zasadniczych podzespołów:

- zbiornika wody w obudowie z osprzętem,
- pompy ciepła z osłoną.

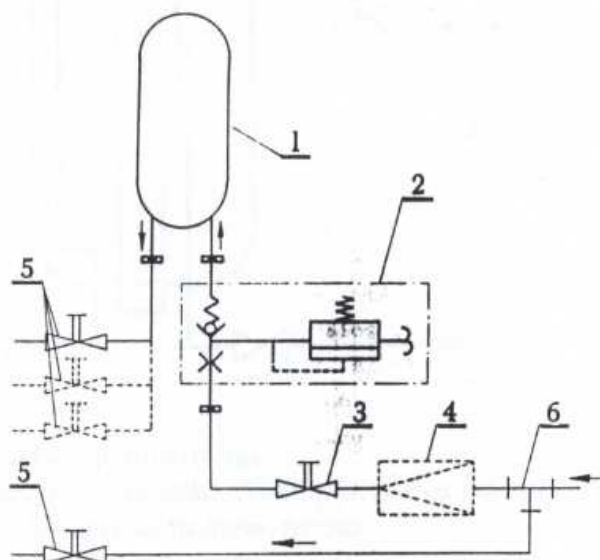
Budowę ogrzewacza oraz poszczególne jego elementy przedstawiono na rysunku 1.

Schemat połączeń elektrycznych oraz sposobu podłączenia ogrzewacza OW 120 PC przedstawiają rysunki 3 i 4, zaś w tabeli nr 2.1 zamieszczono podstawowe parametry techniczne ogrzewacza.



Rys.3. Schemat połączeń elektrycznych ogrzewacza OW 120 PC.

SPR – sprężarka, W – wentylator, ŁK – łącznik klawiszowy, P – przekaźnik, G – grzałka, ŁKP – łącznik klawiszowy podświetlany, ERT – elektroniczny regulator temperatury, PZ – przewód przyłączeniowy, LZ – złączka gwintowa, OT – ogranicznik temperatury



Rys. 4. Schemat podłączenie ogrzewacza do sieci wodociągowej.

1 – ogrzewacz, 2 – zawór bezpieczeństwa, 3 – zawór odcinający, 4 – zawór redukcyjny, 5 – zawory pompowe, 6 – trójnik

Tab. 2.1. Podstawowe parametry techniczne ogrzewacza OW 120 PC

1.	Zasilanie	230V/50Hz
2.	Pojemność zbiornika	120dm ³
3.	Ciśnienie wody zasilającej	Max. 0,6MPa
4.	Max. Temperatura wody	80 ⁰ C
5.	Temperatura wody uzyskiwana z pompy ciepła	45 ⁰ C
6.	Wymagana temperatura otoczenia dla pompy ciepła	5÷35 ⁰ C
7.	Moc pompy ciepła	520W
8.	Moc grzałki	1500W
9.	Współczynnik efektywności pompy ciepła	min. 2
10.	Czynnik chłodzący	R 12
11.	Przyłącze wodne	G ½"
12.	Wymiary (średnica/wysokość)	470/1660 mm
13.	Masa	90kg

2.1 Eksploatacja ogrzewacza

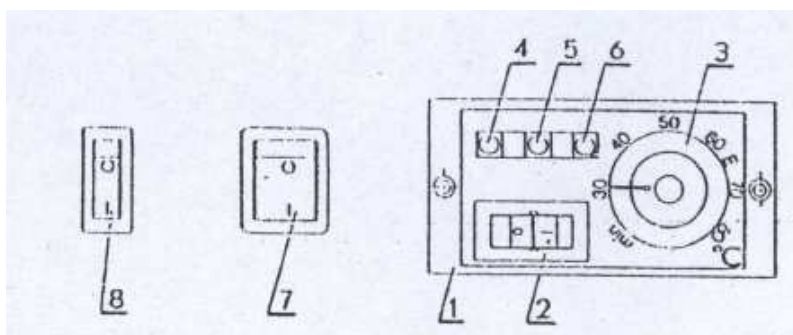
Układ regulacyjny ogrzewacza przedstawiony jest na rys. 5. Poprzez odpowiednie załączenie łączników i ustawienie pokręć regulatora temperatury, wodę ogrzewaczu można ogrzewać:

- pompą ciepła (max. do 45 °C)
- grzałką elektryczną (max. do 80 °C)

- pompą ciepła, a następnie grzałką
- pompą ciepła i grzałką jednocześnie.

Grzanie wody pompą ciepła

Na elektronicznym regulatorze temperatury (1) wcisnąć klawisz wyłącznika (2) na pozycję "I" – zaświecą się lampki: zielona, pomarańczowa i czerwona. Pokrętko regulatora (3) ustawić na żadaną temperaturę (nie wyższą niż 45 °C). Klawisz łącznika podświetlanego (7) wcisnąć na pozycję "0" (nie świeci). Klawisz łącznika pompy (8) wcisnąć na pozycję "I". Po osiągnięciu przez wodę w zbiorniku ogrzewacza żądanej temperatury, ogrzewacz samoczynnie się wyłączy (zgaśnie lampka pomarańczowa). Ponowne załączenie ogrzewacza nastąpi automatycznie przez elektroniczny regulator temperatury.



Rys. 5. Układ regulacyjny ogrzewacza OW 120 PC, 1 – elektroniczny regulator temperatury, 2 – wyłącznik regulatora temperatury, 3 – pokrętko regulatora temperatury, 4 – lampka sygnalizacyjna (kolor zielony), 5 – lampka sygnalizacyjna (kolor pomarańczowy), 6 – lampka sygnalizacyjna (kolor czerwony), 7, 8 – łączniki podświetlane

Grzanie wody grzałką elektryczną

Na elektronicznym regulatorze temperatury (1) wcisnąć klawisz wyłącznika (2) na pozycję "I" – zaświecą się lampki: zielona, pomarańczowa i czerwona. Pokrętko regulatora (3) ustawić na żadaną temperaturę. Klawisz łącznika podświetlanego (7) wcisnąć na pozycję "I" (zaświeci się lampka czerwona w łączniku). Klawisz łącznika pompy (8) wcisnąć na pozycję "0". Po osiągnięciu przez wodę w zbiorniku ogrzewacza żądanej temperatury, ogrzewacz samoczynnie się wyłączy (zgaśnie lampka czerwona, lampka pomarańczowa zgaśnie po osiągnięciu przez wodę w zbiorniku temp. 45 °C). Ponowne załączenie ogrzewacza nastąpi automatycznie przez elektroniczny regulator temperatury.

Grzanie wody pompą ciepła, a następnie grzałką elektryczną

Na elektronicznym regulatorze temperatury (1) wcisnąć klawisz wyłącznika (2) na pozycję "I" – zaświecą się lampki: zielona, pomarańczowa i czerwona. Pokrętko regulatora (3) ustawić na żadaną temperaturę (powyżej 45°C). Klawisz łącznika

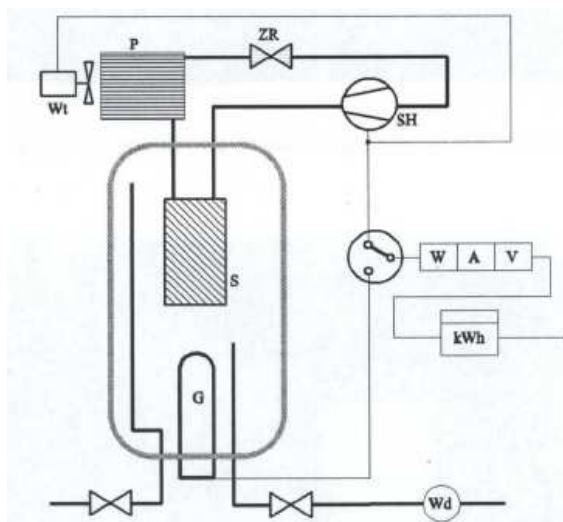
podświetlanego (7) wcisnąć na pozycję "0" (nie świeci). Klawisz łącznika pompy (8) wcisnąć na pozycję "1". Po osiągnięciu przez wodę w zbiorniku ogrzewacza temperatury 450°C , zgaśnie lampka pomarańczowa i automatycznie zostanie odłączona pompa ciepła, a załączona zostanie grzałka elektryczna (zaświeci się lampka w łączniku podświetlanym). Woda do żądanej temperatury grzana jest grzałką elektryczną, a gdy osiągnie nastawioną temperaturę ogrzewacz samoczynnie się wyłączy (zgaśnie lampka czerwona). Ponowne załączenie grzałki nastąpi automatycznie przez elektroniczny regulator temperatury po obniżeniu się temperatury wody o ok. 3°C .

Grzanie wody jednocześnie pompą ciepła i grzałką

Na elektronicznym regulatorze temperatury (1) wcisnąć klawisz wyłącznika (2) pozycję "I" - zaświecą się lampki: zielona, pomarańczowa i czerwona. Pokrętko regulatora (3) ustawić na żadaną temperaturę. Klawisz łącznika podświetlanego (7) wcisnąć na pozycję "I". Klawisz łącznika pompy (8) wcisnąć na pozycję "I". Po osiągnięciu przez wodę w zbiorniku ogrzewacza żądanej temperatury, ogrzewacz samoczynnie się wyłączy. Ponowne załączenie ogrzewacza nastąpi automatycznie przez elektroniczny regulator temperatury.

2.2. Przebieg ćwiczenia

Układ pomiarowy składa się z wodomierza, watomierza, woltomierza, amperomierza i termometrów. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Schemat układu pomiarowego, Wd – wodomierz, G – grzałka, S – skraplacz, P – parownik, Wt – wentylator, ZR – zawór rozprężny, SH – sprężarka hermetyczna

W ramach ćwiczenia należy przeprowadzić:

a) Ogrzewanie wody pompą ciepła

Przy realizacji ćwiczenia wykonujemy następujące czynności:

- Odkręcić kurek zimnej wody i mierzyć jej temperaturę w przepływie, gdy temperatura wody przestanie się zmieniać należy zakręcić kurek wody zimnej i odkręcić kurek wody ciepłej (wychodzącej z ogrzewacza).
- Odczekać, aż przez ogrzewacz przepłynie ok. 150 l wody, wlać ok. 1 litra wody z ogrzewacza do naczynia i zmierzyć jej temperaturę (temperatura początkowa wody T_p).
- Odczytać wskazanie licznika energii elektrycznej (W_p).
- Załączyć ogrzewacz, a następnie pompę ciepła (łącznik podświetlany lewy), odczytać wskazania mierników.
- Po zadanych czasie 60÷90 minutach wyłączyć pompę ciepła.
- Wylać litr wody ciepłej do umywalki, a następny litr wody wlać do naczynia i zmierzyć jej temperaturę (temperatura końcowa wody T_k).
- Odczytać wskazania licznika energii elektrycznej (W_k) i zmierzyć temperaturę otoczenia (T_o).

Podczas procesu grzania dokonujemy pomiaru innych wielkości elektrycznych – napięcia prądu i mocy

b) ogrzewanie wody grzałką elektryczną

Czynności wykonywane przy grzaniu wody grzałką elektryczną są takie same jak przy realizacji punktu a), przy czym zamiast pompy ciepła załączamy grzałkę (punkt 4, łącznik podświetlany prawy). Realizując punkt 5 możemy już po 30min wyłączyć grzałkę i dokonać pomiarów temperatury i odczytać wskazania licznika energii elektrycznej.

Po wykonaniu badań ogrzewacza OW 120PC obliczamy:

a) wartość współczynnika efektywności pompy ciepła z zależności:

$$\varepsilon = \frac{mc_w(T_p - T_k)}{\Delta W}$$

gdzie:

m – masa wody (120kg),

c_w – ciepło właściwe wody $\Delta W = W_k - W_p$

W_p – wskazania licznika energii elektrycznej w momencie załączenia ogrzewacza,

W_k – wskazania licznika energii elektrycznej po wyłączeniu ogrzewacza.

b) podobną postać ma wzór na sprawność grzałki:

$$\eta = \frac{mc_w(T_p - T_k)}{\Delta W}$$

Ogrzewając wodę pompa ciepła zużywa się n - razy mniej energii elektrycznej niż w przypadku zastosowania grzałki. Wartość n wyznaczamy ze wzoru:

$$n = \frac{\varepsilon}{\eta}$$

Wyniki pomiarów oraz obliczone wartości współczynnika efektywności pompy ciepła i sprawności grzałki elektrycznej zamieścić w tabeli nr 2.2.

Tab. 2.2. Pomierzone i obliczone parametry układu grzejnego z pompa ciepła

Rodzaj grzania	W_p [kWh]	W_k [kWh]	I [A]	U [V]	P [W]	ΔW [kWh]	T_p [°C]	T_k [°C]	T [h]	ε i η [-]
Pompa ciepła										$\varepsilon =$
Grzałka										$\eta =$

Literatura do ćwiczenia 5

- [1] Rubik M., *Pompy ciepła – poradnik*, wydanie III rozszerzone, Ośrodek Informacji Technika instalacyjna w budownictwie, Warszawa 2006
- [2] Raczkowski A., Matczuk J., Tomasz Mitura, Marek Białach, *Możliwości rozwoju energetyki odnawialnej w województwie lubelskim*, publikacja wydana w związku z realizacją projektu „Czysta energia dla Lubelszczyzny” 2011
- [3] Durka P., *Ogrzewacz wody użytkowej z pompą ciepła* Lublin 1996 – praca dyplomowa
- [4] Bodziak K., Nalewaj K., *Badanie modelu pompy ciepła*. IV Sympozjum nt. Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii, Białystok 27– 30 września, 1995, s. 39–46
- [5] Nalewaj K. Wójcicka-Migasiuk D., Złonkiewicz Z., *Heat Pump System Supply in the Aspect of Application to Solar Laboratory*, Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection ELMECO, Nałęczów, 04 – 06 czerwca 2000, s. 138–143.

Ćwiczenie 6

Badanie paneli fotowoltaicznych

1.1. Wprowadzenie teoretyczne

Pierwsze fotoogniwo zostało wynalezione przez D. M. Chapin, C. S. Fuller, G. L. Pearson w 1954 roku w Bell Laboratories. Naukowcy zademonstrowali możliwość bezpośredniej konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną dzięki płytce monokrystalicznego krzemu, ze sprawnością dochodzącą do 6%. W związku z pierwszym kryzysem naftowym w 1973r. i rosnącymi cenami energii uzyskiwanej w tradycyjny sposób, coraz więcej uwagi poświęcano wykorzystaniu alternatywnych źródeł energii. Szereg badań oraz duże nakłady finansowe sprawiły, że technologia ta szybko się rozwijała, a tworzone ogniwa miały coraz większą wydajność.

Innym powodem przyczyniającym się do rozwoju badań nad fotoogniwami, stała się prężnie rozwijająca, po Drugiej Wojnie Światowej, kosmonautyka. Konieczność znalezienia autonomicznych źródeł energii w sztucznych satelitach okołoziemskich, była z racji niemożności wykorzystania innych zasobów, jedną z głównych przyczyn rozwoju technologii fotowoltaicznej. Z kolei niekorzystny wpływ zanieczyszczeń, związany z rozwojem cywilizacyjnym i przemysłowym zmusił bogate kraje do podjęcia działań w celu poszukiwania i stosowania nowych alternatywnych źródeł energii. Działania te znacząco przyczyniły się do rozwoju techniki fotowoltaicznej w Europie i na świecie.

Obecnie tworzone są ciągle nowe rozwiązania, w wyniku czego na rynku pojawia się szereg podobnych paneli, różniących się jednak osiąganymi. Nie bez znaczenia jest także wpływ różnych czynników zewnętrznych na pracę fotoogniw oraz wartości parametrów. W związku z bogactwem technologii fotowoltaicznej ważne jest poznanie zasad działania różnych typów fotoogniw oraz czynników mogących mieć wpływ na jego parametry.

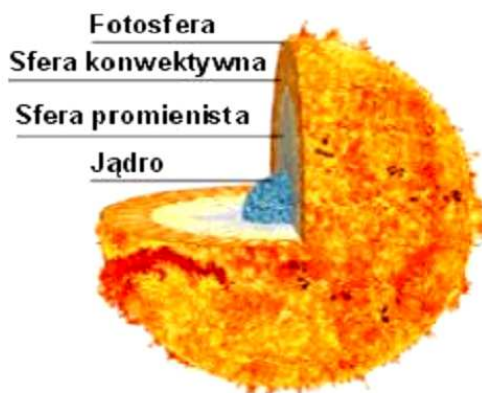
1.2. Słońce

Słońce jest naszą najbliższą gwiazdą. Jego promieniowanie wpływa na całą naszą przyrodę. Bez Słońca nie byłoby planet ani nie powstałoby życie na Ziemi. Pod względem rozmiarów i promieniowania Słońce należy do przeciętnych gwiazd typu widmowego G2V. Masa Słońca jest równa $1,989 \times 10^{30}$ kg, średnica 1 391 960 km.

W porównaniu z Ziemią masa Słońca jest 335 000 razy większa. Przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni Słońca wynosi $274,96 \text{ m/s}^2$.

Słońce charakteryzuje się budową warstwową jednakże granice pomiędzy kolejnymi warstwami są rozmyte a to ze względu na jego gazową budowę (rys. 1.)

Budowa Słońca



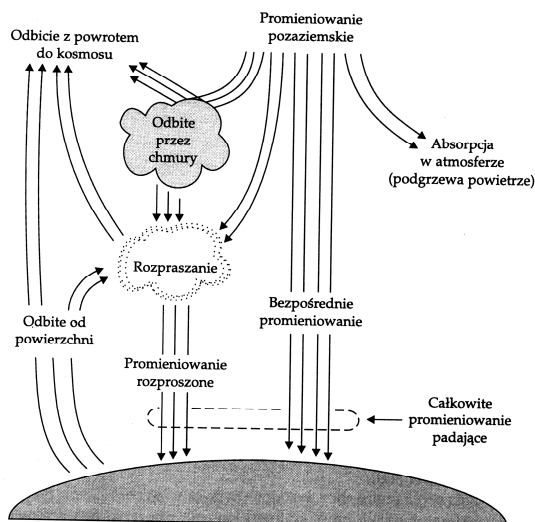
Rys. 1. Budowa Słońca

We wnętrzu Słońca znajduje **jądro**, to tutaj w temperaturze 15 mln °C zachodzą reakcje termojądrowe (reakcje syntezy jąder wodoru w hel). Tuż po jądrze występuje **strefa promieniowania**, inaczej **strefa radiacji** – gruba warstwa, w której dzięki promieniowaniu następuje przeniesienie energii uwolnionej w jądrze do obszarów zewnętrznych. Kolejną warstwą jest **strefa konwekcji**, o grubości około 100000 km. W tej warstwie energia przenoszona jest w procesach mieszania się materii głównie przez konwekcję (krążenie materii) Po niezbyt grubej strefie konwekcji występuje – **fotosfera** (nazywana powierzchnią Słońca lub tarczą słoneczną), która jest widoczna gołym okiem z Ziemi. Jej grubość jest bardzo niewielka, zaledwie 350 km.

Przeciętna gęstość jego materii wynosi $1,410 \text{ g/cm}^3$, a zatem tylko niewiele więcej niż gęstość wody (1 g/cm^3). Temperatura we wnętrzu Słońca sięga $19 \times 10^6 \text{ K}$, a gęstość aż 130 kg/m^3 . Tak duża gęstość w centrum Słońca powstaje na skutek olbrzymiego ciśnienia górnych warstw słonecznych, wynoszącego $4 \times 10^{10} \text{ MPa}$ (około 400 miliardów atmosfer). Gęstość w miarę oddalania się od środka spada i przy powierzchni wynosi już tylko $0,001 \text{ kg/m}^3$.

W miarę oddalania się od środka Słońca temperatura, ciśnienie i gęstość gazu maleją. Jedną z warstw zwana fotosferą, znajdująca się tuż za konwekcyjną ma stosunkowo niewielką grubość ok. 500 km. Z niej właśnie wysyłane w Kosmos prawie całe promieniowanie słoneczne w ostatecznym rozkładzie energetycznym, takim jaki możemy obserwować z Ziemi. Mimo że, średnia odległość Słońca od

Ziemi wynosi 149,6 mln km, promieniowanie słoneczne dostarcza olbrzymiej ilości energii od kilku miliardów lat, stanowiąc główne źródło energii. Całkowita moc promieniowania słonecznego wynosi $3,83 \cdot 10^{20}$ MW i można przyjąć, że jeszcze przez 6 miliardów lat moc ta niewiele się zmieni, gdyż w czasie miliarda lat Słońce „chudnie” tylko o 1%, pomimo, że w każdej sekundzie około 600 mln ton wodoru w głębi Słońca przemienia się w hel w rezultacie reakcji termojądrowych. Promieniowanie padające na górne warstwy atmosfery ziemskiej – egzosferę, jak wykazały bezpośrednie pomiary satelitarne, dostarcza $1,36 \text{ kW/m}^2$ gęstości powierzchniowej strumienia energii. Znaczna część promieniowania dociera do powierzchni Ziemi.



Rys. 2. Składniki promieniowania słonecznego

1.3. Warunki słoneczne dla polski i regionu wschodniego (Lubelszczyzna)

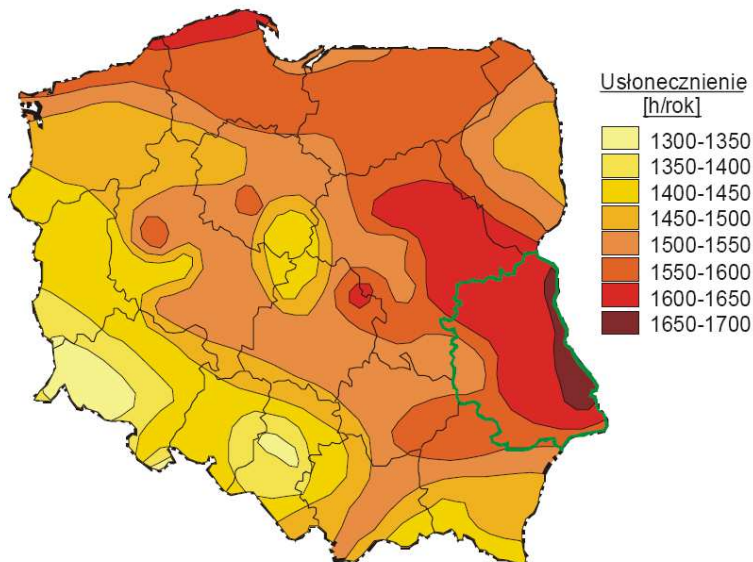
Z warunków solarnych kluczowe znaczenie w aspekcie możliwości wykorzystania energii posiadają: usłonecznienie i natężenie promieniowania słonecznego. Usłonecznienie jest to czas bezpośredniego dopływu promieniowania słonecznego w ciągu roku do powierzchni ziemi. Suma usłonecznienia rzeczywistego na Lubelszczyźnie kształtuje się na poziomie 1500 – 1700 h.

Warunki usłonecznienia województwa lubelskiego na tle kraju prezentuje rys.3, zaś wielkości rocznego promieniowania całkowitego w województwie lubelskim na tle kraju rys. 4. W poszczególnych porach roku średnie sumy dziennego usłonecznienia przedstawiają się następująco: wiosna (III–V) ~ 5 h, lato (VI–VIII) ~7 h, jesień (IX–XI) ~3,5 h i zima (XII–II) ~1,5 h. Średnie promieniowanie słoneczne całkowite na Lubelszczyźnie wynosi $10,0\text{--}10,25 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ i zmienia się w ciągu roku

w zakresie $1 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ w grudniu do $23 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ w czerwcu i lipcu (Puławy). We wschodniej części Lubelszczyzny średnie roczne całkowite promieniowanie przekracza 3800 MJ/m^2 (rys.2.4.).

Najbardziej nasłonecznione obszary kuli ziemskiej znajdują się między 30° szerokości geograficznej północnej a 30° szerokości południowej. Znaczący jest tu także kąt pochylenia osi ziemi w stosunku do płaszczyzny ekliptyki. Dlatego na tym samym obszarze „zimowe słońce” dostarcza dziennie około 20% mniej energii niż „słońce letnie”, ponieważ jest niżej na niebie i dni są krótsze. Znaczna absorpcja promieniowania występuje szczególnie wtedy, gdy atmosfera jest wilgotna i zapyłona, a Słońce znajduje się nisko nad horyzontem. A tej sytuacji promieniowanie przechodzi dłuższą drogę w atmosferze zanim i dotrze do kuli ziemskiej.

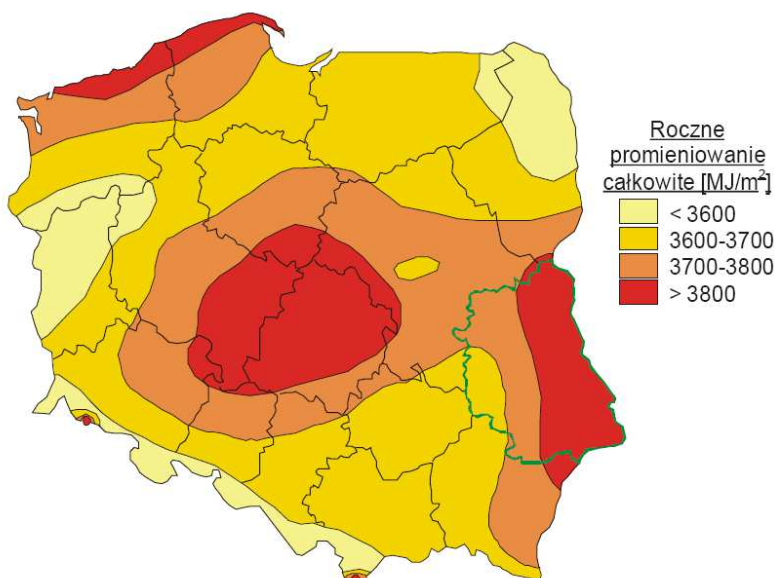
Polska położona jest w strefie klimatu umiarkowanego między 49° a $54,5^\circ$ szerokości geograficznej północnej. W zimie południowe krańce Polski mają dzień dłuższy o prawie jedną godzinę od krańców północnych, natomiast w lecie jest odwrotnie. Nasłonecznienie zależy od długości dnia, zachmurzenia i przezroczystości atmosfery. Najdłuższy nieprzerwany okres dopływu energii promieniowania słonecznego w ciągu dnia waha się od 7,2 h w zimie (ok. 30% doby) do 15,5h w lecie (65% doby). W 1992 r. zanotowano w Polsce na Helu ponad 2000 h usłonecznienia. Najwyższe natężenie promieniowania słonecznego stwierdzono na Kasprowym Wierchu (ok. 1200 W/m^2).



Rys. 3. Średnie roczne sumy usłonecznienia w godzinach

Najkorzystniejsze warunki solarne obserwujemy w pasie nadmorskim, gdzie od kwietnia do września występują najwyższe sumy promieniowania całkowitego

i najwięcej godzin nasłonecznienia. Wyróżniającym się też regionem jest Podlasko-Lubelski ze względu na częsty napływ suchych mas powietrza znad Ukrainy. Najmniej korzystne warunki obserwujemy w regionach Podgórskim, Suwalskim, Warszawskim i Górnośląskim.



Rys. 4. Roczne promieniowanie całkowite w Polsce

Średnie roczne zachmurzenie nieba na Lubelszczyźnie jest najniższe w kraju i kształtuje się na poziomie poniżej 65 %. W omawianym aspekcie na korzyść województwa przemawia również duży udział promieniowania bezpośredniego w całkowitym, wynoszący średniorocznie 52–54 %, a w okresie zimowym 40–44 % [40]. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 7,3°C (Lublin). Czas trwania zimy wynosi średnio 80–100 dni. Początek zimy termicznej (średnia temperatura dobową = 0°C) przypada średnio na okres 30 XI–10 XII, natomiast koniec zimy termicznej (średnia temperatura dobową > 0°C) na okres 5–15 III.

Ze względu na potencjalną energię użyteczną prawie całe województwo lubelskie znajduje się w rejonie, gdzie roczne sumy promieniowania słonecznego kształtują się na poziomie 950–1020 kWh/m². W rejonie tym w półroczu letnim potencjalna energia użyteczna wynosząca 821 kWh/m² jest porównywalna z wybrzeżem (881 kWh/m²), natomiast zimą (260 kWh/m²) porównywalna z górami (280 kWh/m²). Obszar ten oprócz pasa nadmorskiego jest uznawany za uprzywilejowany (o najlepszych warunkach do wykorzystania energii słonecznej w Polsce).

1.4. Zjawisko fotoelektryczne i budowa fotoogniwa

Omawiając zasadę działania fotoogniw należy przedstawić mechanizm, dzięki któremu jest w ogóle możliwe powstanie nośników energii elektrycznej. Zjawisko fotoelektryczne przedstawia mechanizm absorpcji światła padającego na dane ciało stałe, przy czym dzielimy je na dwa rodzaje – zewnętrzne i wewnętrzne. Pierwsze z nich mówi o wybijaniu elektronów z powierzchni ciała pod wpływem padającego promieniowania świetlnego. W procesie tym wybite fotoelektrony pochłaniają całkowicie kwant światła (foton) i wydostają się na powierzchnię, mechanizm ten ma miejsce głównie w metalach. Einstein wyjaśniając to zjawisko założył dodatkowo, że tylko część energii jest przekazywana fotoelektronowi, pozostała energia zostaje wykorzystywana na wydostanie się elektronu z powierzchni. Nazywana jest ona pracą wyjścia i jest charakterystyczna dla różnych ciał stałych. Dodatkowo, jeśli przy wyjściu elektronu nie będzie dochodziło do zderzeń z innymi elektronami, to emitowaniu fotoelektronu nie będą towarzyszyły żadne straty, a jego energia kinetyczna będzie maksymalna. Zależność tą opisuje wzór Einsteina:

$$h \cdot \nu = A_0 + E_{k \max} \quad (1.1)$$

lub

$$h \cdot \nu = A_0 + \frac{mV_m^2}{2} \quad (1.2)$$

gdzie:

h – stała Plancka

ν – częstotliwość fali

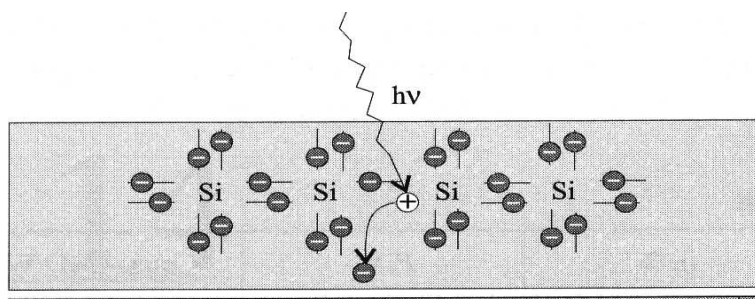
A_0 – praca wyjścia elektronu

m – masa elektronu

$E_{k \max}$ – maksymalna energia kinetyczna

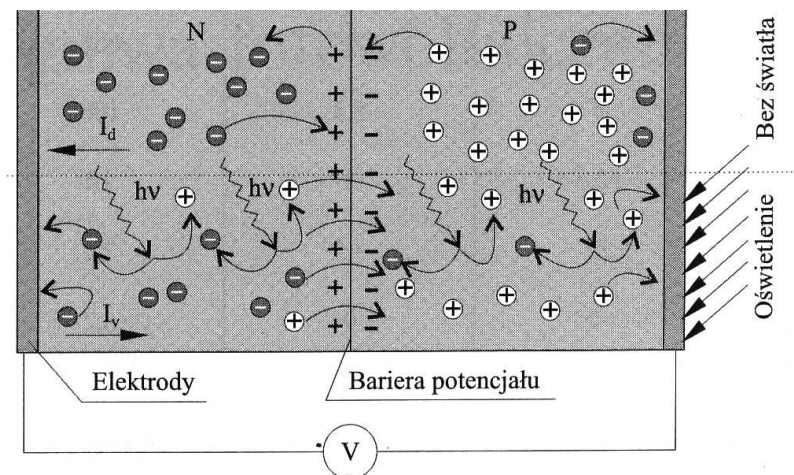
V_m – prędkość swobodnego elektronu.

Energia promieniowania elektromagnetycznego, głównie w zakresie światła widzialnego, powoduje wybijanie w półprzewodnikach elektronów z pasma walencyjnego na poziom przewodnictwa. W miejscu wybitego z wiązania sieci krystalicznej elektronu (-) powstaje dziura (+) (rys.5).



Rys. 5. Mechanizm powstawania dziury

Dziura ta jest rekombinowana elektronem z sąsiadującego węzła sieci krystalicznej, w którym powstaje nowa dziura. Materiał, w którym jest przewaga dziur nazywa się półprzewodnikiem typu p, natomiast, gdy jest przewaga elektronów typu n. W celu obniżenia potencjału energetycznego koniecznego do wybicia elektronu z pasma walencyjnego, do struktury krystalicznej materiału bazowego, np. krzemu, wprowadza się atomy o charakterze donorów (np. fosfor – typ n) lub akceptorów elektronów (np. bor typ p). Na styku tych dwóch półprzewodników tworzy się, w wyniku pierwotnej rekombinacji, bariera zaporowa – ujemna w obszarze typu p i dodatnia w obszarze typu n. Zasada działania tej bariery jest różna w zależności od tego czy półprzewodnik jest naświetlony, czy nie. Bez światła dziury wędrują na lewo i płynie niewielki wsteczny prąd dyfuzyjny I_d (rys. 6a). Padające na złącze p-n fotony, o energii większej niż szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika, powodują powstanie w tym miejscu pary elektron-dziura ((-) i (+)). Pole elektryczne wewnątrz półprzewodnika (bariera potencjału), związane z obecnością złącza p-n, przesuwają nośniki różnych znaków w przeciwnych stronach: elektrony do obszaru n, a dziury do obszaru p. Powoduje to powstawanie na złączu zewnętrznego napięcia elektrycznego (efekt fotowoltaiczny). Ponieważ rozdzielone ładunki są nośnikami nadmiarowymi (mają nieskończony czas życia), a napięcie na złączu pn jest stałe, złącze działa jako ogniwo elektryczne. Mechanizm tego zjawiska przedstawia (rys 6-b).



Rys. 6. Mechanizm fotowoltaiczny: a) wsteczny szczątkowy prąd zaporowy (brak oświetlenia), b) przepływ prądu (oświetlenie)

Przy oświetleniu półprzewodnika ze złączem p-n, fotony o dostatecznej energii wywołują elektrony związane, które przechodzą do pasma przewodnictwa. Powstają dodatkowe pary elektron – dziura, polepszające przewodność.

Dodatkowy prąd wywołany światłem:

$$I_f = eg_f (L_p + L_n) \quad (1.3)$$

gdzie:

e – ładunek elektronu

g_f – liczba par elektron – dziura

L_p, L_n – droga dyfuzji dziur i elektronów.

Jeśli do oświetlonego półprzewodnika nie ma przyłożonego napięcia, złącze p–n wytwarza siłę elektromotoryczną. przy zwartym obwodzie złącza popłynie prąd I_f równy sumie prądów nośników mniejszościowych przechodzących przez złącze. Przy rozwartym obwodzie i oświetlonym złączu wytwarza się na nim siła elektromotoryczna równa:

$$U_f = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_f}{I_0} \right) \quad (1.4)$$

gdzie:

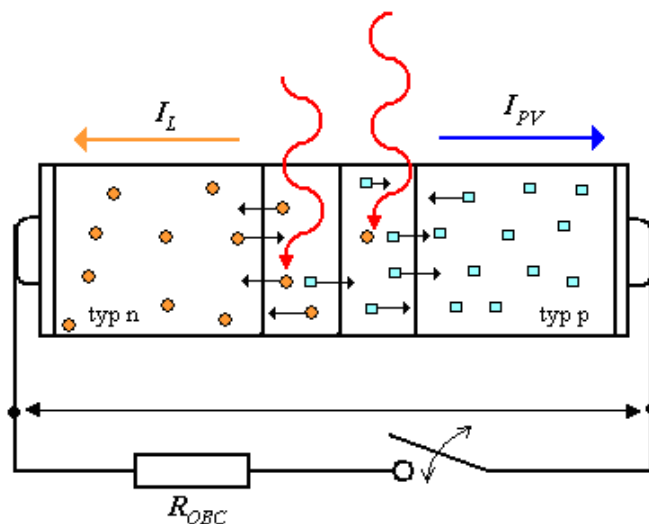
U_f – siła elektromotoryczna

k – stałą Boltzmanna

T – temperatura bezwzględna

I_f – prąd fotoelektryczny

I_0 – prąd nasycenia.

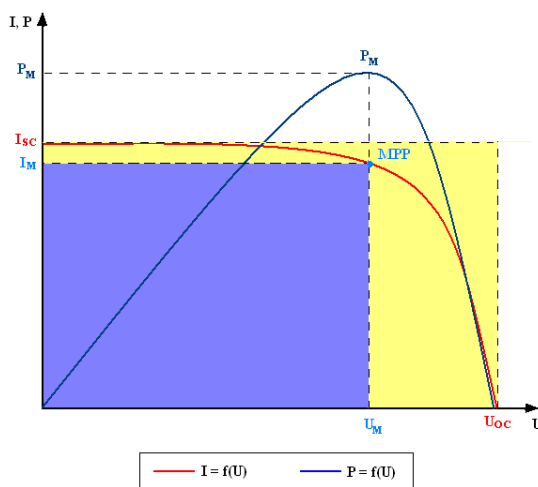


Rys. 7. Schemat oświetlonego fotoogniwa oraz ruch wygenerowanych w nim nośników ładunku

1.5. Podstawowe parametry pracy fotoogniwa

1.5.1. Moc maksymalna

Ważnym parametrem fotoogniw jest moc wyjściowa, dla której obciążenie musi być dopasowane w ten sposób, aby moc na nim uzyskana, była maksymalna. Wiąże się to ze znalezieniem optymalnego punktu pracy, łączącego prąd i napięcie z zaistniałym obciążeniem. Nazywa się go punktem maksymalnej mocy i oznacza MPP (ang. MPP – Maximum Power Point)



Rys. 8. Przykładowa charakterystyka mocy wyjściowej oraz charakterystyka prądowo-napięciowa fotoogniwa oświetlonego fotoogniwa

Jak widać na rys. 8 współrzędne punktu MPP nie odpowiadają wartościom maksymalnym charakterystyki prądowo-napięciowej (I_{SC} – prąd zwarcia, U_{OC} – napięcie rozwarcia). Przy dalszym wzroście prądu bądź napięcia ponad wartości współrzędnych MPP, moc fotoogniwa będzie się zmniejszać. Wartość napięcia U_M zależy głównie od temperatury, natomiast prądu I_M od wartości natężenia promieniowania padającego na ogniwo.

Rezystancję optymalną obciążenia można wyznaczyć graficznie, przedstawiając moc w funkcji zmieniającego się obciążenia, przy czym pomiary muszą być wykonywane przy stałej wartości natężenia promieniowania. W różnych warunkach oświetlenia to samo ogniwo będzie miało bowiem inną wartość rezystancji optymalnej.

1.5.2. Współczynnik wypełnienia

Kolejnym parametrem mówiącym o jakości fotoogniwa jest współczynnik wypełnienia FF (ang. FF – Filling Factor). Określa on, jak bardzo charakterystyka prą-

dowo-napięciowa zbliżona jest do prostokąta o długościach boków odpowiadających I_{SC} , U_{OC} (rys. 3.3). Współczynnik ten wyliczyć można ze wzoru :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (1.5)$$

gdzie:

$P_{\max}$ – maksymalna wyjściowa moc elektryczna fotoogniwa.

Wartość współczynnika FF zależy od rodzaju materiału z jakiego wykonane jest fotoogniwo, koncentracji domieszek i temperatury złącza. Duży wpływ wywierają także rezystancje szeregową R_S i równoległą R_{SH} . Dlatego powinno się zwracać uwagę nie tylko na dane katalogowe podawane przez producenta, ale również wartości współczynników temperaturowych napięcia otwartego obwodu, prądu zwarcia, rezystancji szeregowej, które poprzez współczynnik F_F rzutują na wartość mocy wyjściowej ogniwa.

1.5.3 Sprawność

Parametrem najlepiej opisującym jakość fotoogniwa jest jego sprawność, wyrażona za pomocą zależności (24). Osiąga ona różne wartości głównie z powodu rodzaju fotoogniwa, ale na jego wartość mogą mieć wpływ również inne czynniki: temperatura, natężenie światła, czy charakterystyka spektralna promieniowania. Sprawność jest wielkością charakterystyczną dla danego fotoogniwa, która mierzona jest w określonych warunkach – STC (Standard Test Conditions). Wprowadzenia powyższego standardu wymusiło na producentach informowanie użytkownika o wartości sprawności w konkretnych warunkach. Dzięki temu możliwe jest porównanie parametrów różnych fotoogniw i wybranie tych, które charakteryzują się najlepszymi parametrami. Tabela 3.1 zawiera przykładowe sprawności określone w warunkach: $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W/m}^2$, $A_M=1,5$.

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot U_{OC} \cdot FF}{E \cdot S} \cdot 100\% \quad (1.6)$$

gdzie:

E – natężenie oświetlenia [W/cm^2]

S – pole powierzchni czynnej fotoogniwa.

Sprawność fotoogniw jest zmniejszona w znaczny sposób poprzez straty spowodowane:

- odbiciem światła
- absorpcją w wierzchnich warstwach ogniwa (warstwa przeciwo odbiciowa, warstwa ochronna)
- wszelkimi defektami sieci krystalicznej ogniwa powodującymi zwiększony proces rekombinacji

Tab. 3.1. Sprawność ogniw i modułów fotowoltaicznych

Technologia	Ogniwa cienkowarstwowe				Ogniwa Krystaliczne	
	Amorficzne (a-Si)	Tellurek kadmu (CdTe)	Ci(G)S	a-Si/m-Si	Mono-krystaliczne	Multi-krystaliczne
Sprawność ogniw w STC*	5-7%	8-11%	7-11%	8%	16-19%	14-15%
Sprawność modułów					13-15%	12-14%

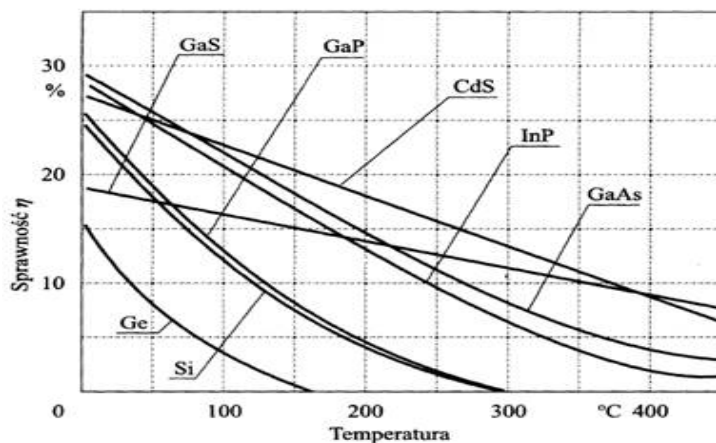
*STC (Standard Testing Conditions): T=25°C, G=1000W/m², AM=1,5

1.6. Czynniki mające wpływ na pracę ogniw

1.6.1. Temperatura

Jednym z czynników mających największy wpływ na pracę fotoogniwa jest niewątpliwie temperatura. Możemy przy tym wyróżnić trzy charakterystyczne obszary, w których mogą one pracować. Pierwszym przedziałem jest zakres zbyt wysokich temperatur, powodujący wydatny spadek sprawności ogniw. Drugi to ten, w którym wartości wyjściowe ogniw są optymalne. Trzeci przedział zawiera temperatury dużo niższe od tych, które przeznaczone są dla normalnej pracy. Zakresy te nie mają wartości stałych, lecz zmieniają się w zależności od materiałów bazowych stosowanych do produkcji ogniw, a także ich konstrukcji – fotoogniwa jednozłoczowe, wielozłoczowe, organiczne. Granice te, choć różne, wywołane są przez te same zjawiska fizyczne, powodujące podział na trzy zakresy temperatur.

Biorąc pod uwagę charakterystyczne zakresy temperatur, szerokości geograficzne, oraz rzeczywiste miejsca (powierzchnie dachów i ścian o dużym nasłonecznieniu), w których przychodzi pracować panelom słonecznym, można dojść do wniosku, że głównym przedziałem wpływającym na pogorszenie sprawności fotoogniw jest zakres wysokich temperatur. W miesiącach letnich temperatura ogniw słonecznych może wzrosnąć do 70 lub 80°C.

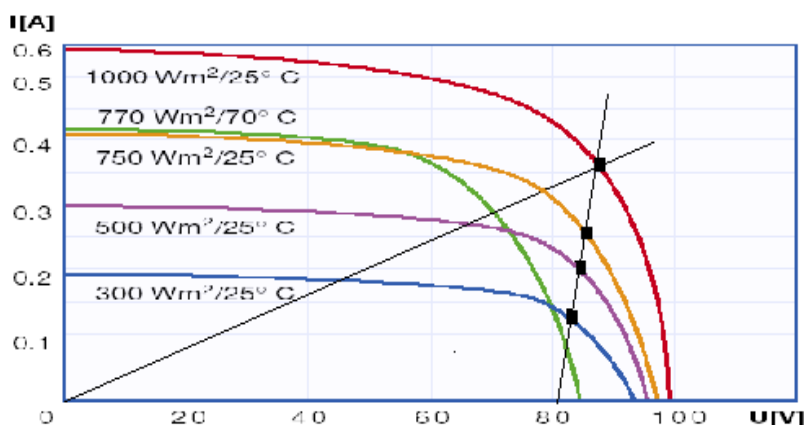


Rys. 9. Wpływ temperatury na sprawność fotoogniw

Podjmuje się próby chłodzenia modułów oraz budowy komercyjnych paneli fotowoltaicznych z systemem chłodzenia za pomocą powietrza lub wody. Energia uzyskana dzięki chłodzeniu ogniw może być wykorzystana do ogrzewania domów lub pomieszczeń gospodarczych, albo stanowić wstępny etap ogrzewania wody w systemach centralnego ogrzewania budynków.

1.6.2. Natężenie promieniowania

Na rys. 10 przedstawiono wpływ natężenia promieniowania na zmianę charakterystyki I-U



Rys. 10. Wpływ natężenia promieniowania na zmianę charakterystyki I-U, charakterystyka przy zwiększonej temperaturze ogniw

Podobnie jak temperatura, istotny wpływ na pracę fotoogniwa wykazuje natężenie promieniowania. Energia promieniowania słonecznego docierająca do powierzchni panelu często nie jest maksymalną, lecz jest zmniejszona na skutek absorpcji części promieniowania w atmosferze ziemskiej. Szacuje się, że do Ziemi dochodzi około 1000W/m^2 mocy promieniowania, podczas gdy przed wejściem do atmosfery wynosi ona 1367W/m^2 . Ilość energii, która dociera do danego miejsca uzależniona jest od szerokości geograficznej, warunków pogodowych, pory roku.

1.6.3. Kąt padania promieniowania

Czynnikiem mającym wpływ na pracę panelu fotowoltaicznego jest kąt nachylenia padającego promieniowania. Fotoogniwa osiągają największą sprawność, gdy światło pada prostopadłe na ich powierzchnie. Dzieje się tak, ponieważ do obszaru złącza przechodzi wówczas największa liczba fotonów. Pozostała część wytraca energię w zderzeniach z atomami sieci, bądź jest odbijana od powierzchni ogniwa. Wraz ze zmniejszaniem kąta padania promieniowania coraz większa liczba fotonów ulega odbiciu, przez co znacznie pogarsza się sprawność konwersji.

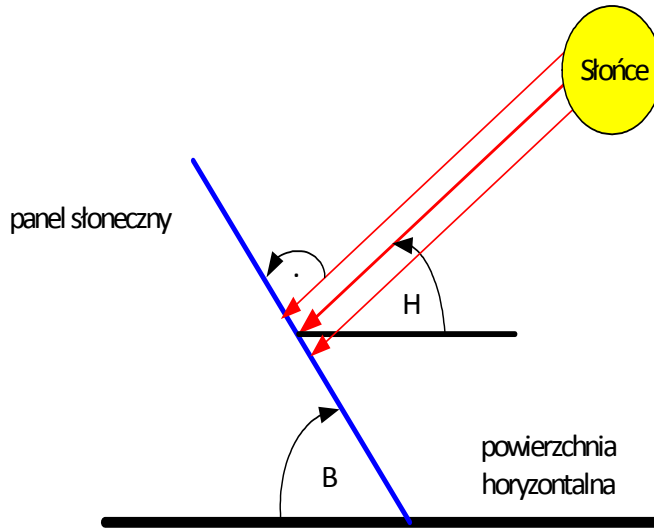
W celu zmniejszenia tego niekorzystnego zjawiska używa się specjalnych, przezroczystych warstw przeciwoodbiciowych. Najczęściej stosowanymi materiałami są TiO_2 , SiO , SiO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 . Niektóre z tych związków mogą być również warstwami pasywacyjnymi, zmniejszającymi prędkość rekombinacji powierzchniowej. Materiały te pełnią także funkcję ochronną przed korozją atmosferyczną. Poza stosowaniem warstwy antyrefleksyjnej często stosowanym zabiegiem jest teksturyzacja powierzchni fotoogniwa. Proces ten polega na wytrawianiu powierzchni materiału półprzewodnikowego i nadaniu jej struktury piramidalnej. Dzięki temu fotony odbite od fotoogniwa, mają ponowną szansę na zabsorbowanie ich przez warstwę powierzchniową.

Inną metodą poprawienia sprawności jest zmiana kąta nachylenia i położenia modułu wraz ze zmianą położenia słońca. W tym celu niezbędne jest wyposażenie panelu fotowoltaicznego w układ sterowania, śledzący najjaśniejszy punkt na nieboskłonie. Dzięki temu promieniowanie słoneczne jest niemal stale prostopadłe do powierzchni ogniwa, a sprawność panelu w ciągu dnia jest maksymalna. Dokonajmy obliczenia kąta pochylenia kolektora do horyzontu (umownie podłoża równoległego do ziemi) dla początku wiosny, czyli kiedy słońce jest nad równikiem a kąt deklinacji $\delta=0^\circ$, zaś kąt szerokości geograficznej dla Lublina $\varphi=51^\circ14'\approx51,23^\circ$. Wówczas kąt wysokości Słońca nad horyzontem wynosi:

$$H=90^\circ-\varphi=90^\circ-51,23^\circ=38,77^\circ$$

a kąt pochylenia paneli wynosi:

$$\beta=90^\circ-H=51.23^\circ$$



Rys. 11. Ustawienie paneli fotowoltaicznych prostopadle do padających promieni słonecznych.

Dlatego panele ustawiamy w kierunku południowym pod wyliczonym kątem β . Oczywiście trzeba mieć na uwadze, że obliczenia te dotyczą tylko początku wiosny, jesieni, kiedy Słońce jest nad równikiem w innym przypadku obliczenia są dużo bardziej skomplikowane i trzeba brać pod uwagę deklinację, w którym kierunku jest największa ilość godzin dziennych, natężenie promieniowania rozproszonego i odbitego, aby ustawić optymalny kierunek i kąt paneli.

Przy powierzchniach nachylonych pewne trudności sprawia określenie dopływu promieniowania rozproszonego. Przyjęcie założenia izotropowości tego promieniowania nie zawsze jest słuszne. Dla okresu od kwietnia do września najkorzystniej jest ustawiać odbiornik promieniowania pod kątem 20° , a dla całego roku pod kątem 30° do poziomu.

2. STANOWISKO LABORATORYJNE

Stanowisko do badania paneli fotowoltaicznych zbudowane jest z komory, wewnątrz której umieszczona jest konstrukcja z aluminiowych profili (rys. 12), służąca do mocowania paneli fotowoltaicznych. Jako źródło światła użyta została lampa halogenowa o mocy regulowanej za pomocą ściemniacza. Dla zapewnienia stałej temperatury wewnątrz komory wyposażono ją w wentylator, a do odczytu temperatury panelu użyto układów DS1820. Układy te przyłączone zostały do komputera z zainstalowanym oprogramowaniem umożliwiającym odczyt i rejestrację danych z dokładnością $0,5^{\circ}\text{C}$. W skład układu wchodzi także rezystancja obciążenia (rezystor dekadowy) oraz przyrządy pomiarowe: miliamperomierz, woltomierz. Do pomiaru natężenia światła użyte zostało oddzielne fotoogniwo wyskalowane względem piranometru CM 3 II klasy 9060 nr 981996.

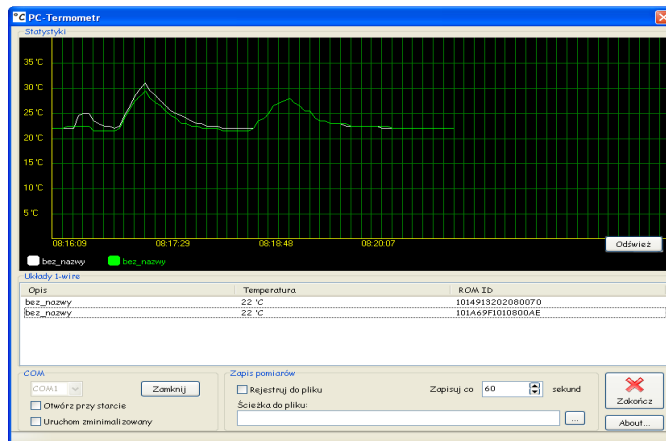


Rys. 12. Komora do badania paneli fotowoltaicznych

2.1. Pomiar temperatury

Pomiaru temperatury dokonujemy za pomocą dwóch układów DS1820 (maksymalnie ośmiu) przyłączonych do komputera poprzez wtyczkę magistrali szeregową RS232. Czujniki powinny być przymocowane z tyłu panelu fotowoltaicznego za pomocą taśmy tak, aby można je było przyłączać wraz ze zmianą panelu. Wartość temperatury powinien być średnią wskazań odczytaną ze wszystkich czujników.

Odczyt możliwy jest dzięki programowi PC-Termometr, którego okno przedstawione jest na rys. 13. W części „Układy 1-wire” możemy zobaczyć aktualną temperaturę oraz wszystkie przyłączone układy, których nazwy możemy zmienić (domyślnie „bez_nazwy”) w celu identyfikacji. Dzięki programowi możemy zapisywać dane do pliku w celu ich dalszego przetwarzania.



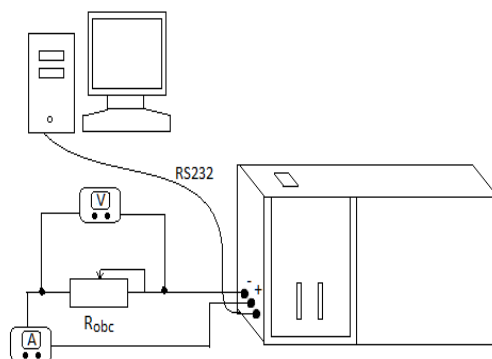
Rys. 13. Okno programu PC-Termometr

2.2. Instrukcja wykonania ćwiczenia

Na obudowie od strony zewnętrznej i wewnętrznej znajdują się tabliczki z zaciskami do przyłączenia fotoogniów badanego oraz ogniwa służącego do pomiaru natężenia promieniowania. Zainstalowane są tam również gniazda do transmisji szeregowej między układami DS1820, a komputerem.

W celu wykonania pomiarów należy przyłączyć do zacisków wyjściowych badanego fotoogniwa szeregowo połączony rezystor dekadowy oraz miliamperomierz. Jeden z woltomierzy łączymy równolegle z rezystancją obciążenia, natomiast drugi przyłączamy za pomocą zacisków do oddzielnego fotoogniwa. Ogniwo to służy do pomiaru natężenia promieniowania i jest wyskalowane względem piranometru używanego do pomiaru natężenia światła przy generatorze fotowoltaicznym na dachu budynku ASPPECT. Przy użyciu taśmy przyklejamy czujniki temperatury z tyłu panelu i łączymy z gniazdem do transmisji szeregowej. Za pomocą programu PC-Termometr należy monitorować wartość temperatury modułu podczas wszystkich pomiarów.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy włączyć lampę halogenową i wentylator, a następnie odczekać pewien czas w celu ustabilizowania warunków pracy panelu. Pierwszymi wielkościami, które mierzymy przed przystąpieniem do pomiarów są wartość natężenia padającego promieniowania oraz temperatura panelu. Natężenie światła mierzymy za pomocą fotoogniwa, który przykładamy do czoła panelu w kilku miejscach. Wartość natężenia promieniowania jest wartością uśrednioną. Temperaturę odczytujemy z programu zainstalowanego na komputerze. Należy pamiętać, aby kontrolować temperaturę panelu podczas pomiarów. W razie jej wzrostu chłodzić ogniwo przy użyciu wentylatora. W przypadku nadmiernego wzrostu temperatury chwilowo wyłączać lampę halogenową, do czasu jej zmniejszenia.



Rys. 14. Schemat stanowisko pomiarowego do badania paneli fotowoltaicznych

Wyznaczenie charakterystyk prądowo-napięciowych rozpoczynamy od zmierzenia wartości prądu zwarcia I_{sc} i napięcia rozwarcia U_{oc} . Następnie, zmieniając obciążenie na oporniku dekadowym odczytujemy wartości prądów i napięć. Podczas pomiarów należy zwrócić uwagę na odpowiedni dobór kroku pomiarowego oraz zagęścić go w pobliżu kolana charakterystyki. Pomiary wykonujemy dla wybranych fotoogniw.



Rys. 15. Lampa halogenowa oraz wentylator używane podczas pomiarów

2.3. Badanie wpływu natężenia światła

Badanie wpływu natężenia światła na parametry fotoogniw polega na wyznaczeniu charakterystyk prądowo-napięciowych dla kilku wartości natężenia promieniowania. Pomiary należy przeprowadzić dla fotoogniw mono- i polikrystalicznego. Zmierzone wartości prądów i napięć zamieścić w tabeli 1 i 2

Tab. 1. Wyniki pomiarów prądowo–napięciowych przy różnych wartościach natężenia promieniowania dla fotoogniwa monokrystalicznego

$E=$			$E=$			$E=$			$E=$		
U	I	P	U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
$P=UI$											

Tab. 2. Wyniki pomiarów prądowo–napięciowych przy różnych wartościach natężenia promieniowania dla fotoogniwa polikrystalicznego

$E=$			$E=$			$E=$			$E=$		
U	I	P	U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
$P=UI$											

Wykreślić charakterystyk prądowo–napięciowych przy różnych wartościach natężenia promieniowania dla ogniwa mono i polikrystalicznego.

Pomierzyć wartości prądu zwarcia I_{SC} i napięcia rozwarcia U_{OC} przy zmieniającym się natężenia promieniowania (tabela 3), a następnie przedstawić charakterystyki I_{SC} i U_{OC} w funkcji natężenia promieniowania dla fotoogniwa monokrystalicznego i polikrystalicznego.

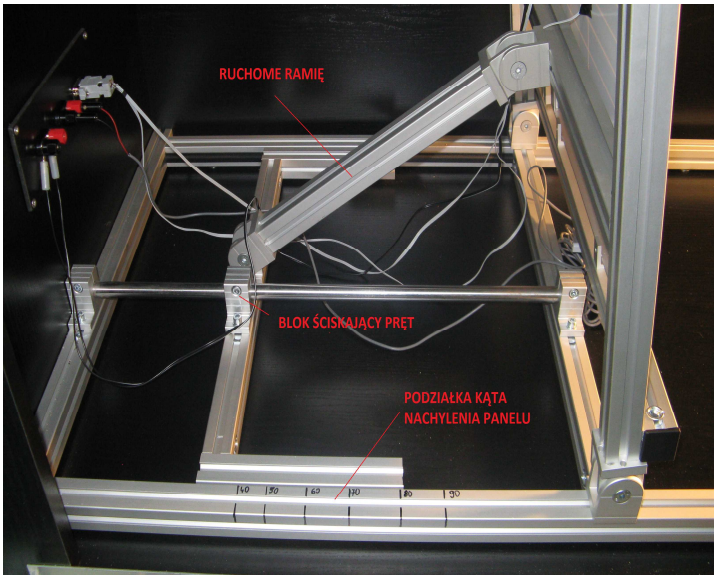
Tab. 3. Wyniki pomiarów prądu zwarcia i napięcia rozwarcia w funkcji natężenia promieniowania dla fotoogniwa monokrystalicznego i polikrystalicznego

Panel monokrystaliczny			Panel polikrystaliczny		
E	U_{OC}	I_{SC}	E	U_{OC}	I_{SC}
[W/m ²]	[V]	[mA]	[W/m ²]	[V]	[mA]

2.4. Badanie wpływu kąta nachylenia panelu fotowoltaicznego

Zmianę kąta nachylenia panelu dokonujemy przez przesunięcie ruchomego ramienia wzdłuż prowadnicy. Kąt położenia panelu odczytujemy z podziałki naniesionej na podstawie ramy. Należy pamiętać o dobrym przykręceniu śruby bloku ściskającego ruchomego ramienia, aby zapobiec powstawaniu ewentualnych uszkodzeń modułu oraz aby nie dopuścić do zmiany położenia panelu podczas

pomiarów. Zdjęte w ten sposób charakterystyki przedstawiamy na wspólnym wykresie.



Rys. 16. Regulacja położenia ramienia

Tab. 4. Wyniki pomiarów prądowo–napięciowych fotoogniwa monokrystalicznego dla kilku kątów nachylenia panelu

E =

Kąt nachylenia $\alpha_1=90^0$			Kąt nachylenia $\alpha_2=80^0$			Kąt nachylenia $\alpha_3=60^0$			Kąt nachylenia $\alpha_4=40^0$		
U	I	P	U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
P=UI											

Tab. 5. Wyniki pomiarów parametrów prądowo–napięciowych fotoogniwa polikrystalicznego dla kilku kątów nachylenia panelu

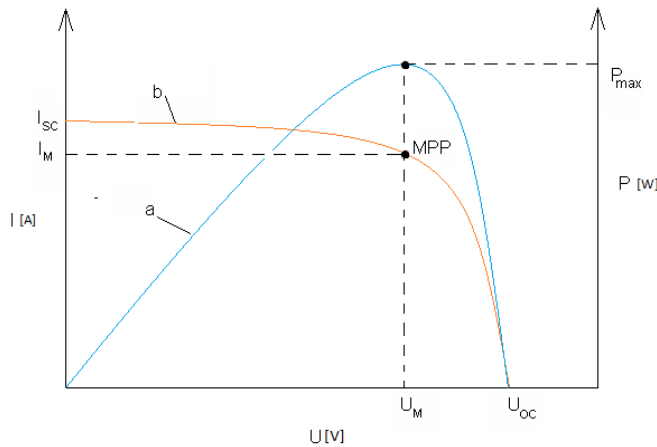
E =

Kąt nachylenia $\alpha_1=90^0$			Kąt nachylenia $\alpha_2=80^0$			Kąt nachylenia $\alpha_3=60^0$			Kąt nachylenia $\alpha_4=40^0$		
U	I	P	U	I	P	U	I	P	U	I	P
V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW	V	mA	mW
P=UI											

2.5 Punkt maksymalnej mocy

W celu określenia punktu maksymalnej mocy korzystamy z wartości obliczonej mocy podanych w tabelach 1-2 i 4-5.

Wyznaczenie punktu maksymalnej mocy polega na znalezieniu na charakterystyce prądowo-napięciowej punktu, którego współrzędne będą odpowiadały maksymalnej mocy wydzielanej na obciążeniu.



Rys. 17. Metoda graficzna wyznaczania współrzędnych punktu maksymalnej mocy MPP:
a – moc wydzielana na obciążeniu, b – charakterystyka prądowo-napięciowa

Korzystając z tabel 1-5 sporządzić charakterystyki prądu i mocy w funkcji napięcia dla kilku różnych natężeń promieniowania dla panelu mono i polikrystalicznego (jak na rys.17). Na ich podstawie określić punkt maksymalnej mocy.

2.6 Współczynnik wypełnienia i sprawność fotoogniwa

Parametrem, który najlepiej opisuje jakość fotoogniwa jest jego sprawność. Obliczyć możemy ją za pomocą następującej zależności

$$\eta = \frac{I_{SC} \cdot U_{OC} \cdot FF}{E \cdot S} \cdot 100\%$$

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} \cdot U_{OC}}$$

gdzie: I_{SC} – prąd zwarcia, U_{OC} – napięcie rozwarcia, FF – współczynnik wypełnienia, E – natężenie promieniowania padającego na fotoogniwo, S – pole powierzchni czynnej fotoogniwa.

Dane znamionowe fotoogniw:

Panel monokrystaliczny – Model type SLO20-12

Moc maksymalna $P_M = 20W$

Napięcie w punkcie maksymalnym $U_M = 16,8V$

Prąd w punkcie maksymalnym $I_M = 1,19A$

Napięcie rozwarcia $U_{OC} = 21 V$

Prąd zwarcia $I_{SC} = 1,35A$

Wymiary 633x276x25mm

Masa 3,5kg

Standard test condition: 1000W/m²; AM1,5; 25°C

Panel polikrystaliczny

Peak Power (P_m) – 20W

Napięcie rozwarcia $U_{OC} = 21,6 V$

Prąd zwarcia $I_{SC} = 1,22A$

Napięcie w punkcie maksymalnym $U_M = 17,6V$

Prąd w punkcie maksymalnym $I_M = 1,29A$

Temperatura pracy - -45 do 85°C

Obliczyć sprawność teoretyczną fotoogniwa monokrystalicznego ($S=0,13518m^2$) i polikrystalicznego ($S=0,14415 m^2$), korzystając z danych znamionowych oraz sprawność ogniw wynikającą z pomiarów

Literatura do ćwiczenia 6

- [1] Kamler J., Mańk A., *Odbiorniki fotoelektryczne i ich zastosowanie*, WNT, Warszawa, 1966
- [2] Marciniak W., *Przrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, WNT, 1987
- [3] Klugmann-Radziemska E., *Efekty termiczne konwersji energii w krzemowych ogniwach fotowoltaicznych*, PG, Gdańsk, 2005
- [4] Lisik Z., *Zjawiska w strukturach półprzewodnikowych – metody ich modelowania*, WpŁ, Łódź 2005
- [5] Rudden M.N., Wilson J., *Elementy fizyki ciała stałego*, PWN, Warszawa 1975
- [6] Klugmann E., Klugmann-Radziemska E., *Alternatywne źródła energii. Energetyka fotowoltaiczna*, WEŚ, Białystok, 1999
- [7] Pluta Z., *Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej*, WNT Warszawa 2000
- [8] Rodacki T., Kandyba A., *Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
- [9] Gogół W., *Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych – Ekspertyza*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993
- [10] Lewandowski W. M., *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*, WNT, Warszawa 2001
- [11] Dybczyński W., *Przetwarzanie energii słonecznej na elektryczną*, Przegląd Elektrotechniczny, Kwiecień 1989;
- [12] Smolec W., *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, PWN, Warszawa 2000
- [13] Nowicki J., *Promieniowanie słoneczne jako źródło energii*, Arkady, Warszawa 1990
- [14] Jarzębski Z. M., *Energia słoneczna- konwersja fotowoltaiczna*, PAN, Warszawa 1990
- [15] Kamler J., Mańk A., *Odbiorniki fotoelektryczne i ich zastosowanie*, WNT, Warszawa 1996;
- [16] Klugman E., Klugman-Radziemska E., *Alternatywna źródła energii. Energetyka fotowoltaiczna*, Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko Białystok 1999
- [17] Smolec W., *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*, PWN, Warszawa 2000
- [18] Rodacki T., Kandyba A., *Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
- [19] Nalewaj K., Złonkiewicz Z., *Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego w warunkach województwa lubelskiego*, Rynek Energii Nr 1(38) – 2002
- [20] Pawłowski W., *Stanowisko laboratoryjne do badania systemów fotowoltaicznych*, Lublin 2002 - praca dyplomowa
- [21] Kanadys J., *Badanie panelu fotowoltaicznego – stanowisko laboratoryjne – praca dyplomowa*, Lublin 2011
- [22] Nalewaj K., Złonkiewicz Z., *Stanowisko laboratoryjne do badania baterii słonecznej*, Wybrane problemy Energetyki zasobów odnawialnych Nr 22, Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, seria: Mechanika, Problemy inżynierii mechanicznej i robotyki, Kraków, 2004, s.133-139.

Ćwiczenie 7

Modelowanie układów cieplnych metodami elektrycznymi

1.1. Podstawowe analogie cieplno-elektryczne

Wiele podstawowych problemów fizycznych można opisać równaniami różniczkowymi zwykłymi lub cząstkowymi. Ponieważ w szeregu przypadkach analiza matematyczna jest uciążliwa, badania obiektów fizycznych można sprowadzić do badania ich modeli. Stany cieplne obiektu można poznać analizując model o odpowiednio mniejszych gabarytach, zbudowany na zasadzie podobieństwa fizycznego. Często jednak tego rodzaju analizy z różnych powodów nie można przeprowadzać. W takich przypadkach badanemu obiektowi przyporządkowuje się układ elektryczny, którego stan jest opisany analogicznymi równaniami różniczkowymi, w których będą występować zmienne elektryczne.

Zjawiskami analogicznymi nazywamy takie zjawiska fizyczne, których istota jest odmienna, lecz równania opisujące je są identyczne pod względem formalnym. Analizując podstawowe równania dotyczące przewodzenia ciepła, a zwłaszcza równanie Fouriera i Fouriera-Kirchhoffa, łatwo dostrzec, że ich postać jest identyczna z niektórymi równaniami z zakresu elektrotechniki

Wykorzystanie analogii elektrycznych do rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła daje szczególną przewagę modeli matematycznych nad modelami fizycznymi, co wynika z łatwości regulacji zmian i pomiarów wielkości elektrycznych

Z matematycznego punktu widzenia, przez modelowanie matematyczne rozumiemy takie wzajemne przyporządkowanie dwóch układów równań opisujących dwa różne zjawiska fizyczne, że wielkości zmienne w obu zjawiskach spełniają warunek przekształcenia analogicznego, wskaźniki podobieństwa zaś są równe 1.

Analogie cieplno-elektryczne mają charakter matematyczny, doszukiwanie się fizycznych podobieństw prowadzi do nieporozumień.

Wynika to chociażby z faktu, że mocy cieplnej P odpowiada prąd elektryczny I , czyli wielkość o innym charakterze niż moc. Energii cieplnej $Q_t = P\tau$ odpowiada ładunek elektryczny $Q_e = I\tau e$ wielkość, która nie jest równoważna energii.

Energia pola elektrycznego kondensatora gromadzona w dielektryku nie jest odpowiednikiem energii gromadzonej w akumulatorze. Różnice te nie wykluczają jednak podobieństwa matematycznego między kondensatorami i akumulatorami ciepła, które charakteryzują odpowiednio: pojemność elektryczna i pojemność cieplna.

W tabeli 1 przedstawiono przykłady analogii cieplno-elektrycznych.

Tab.1.1. Analogie między wielkościami cieplnymi i elektrycznymi [1]

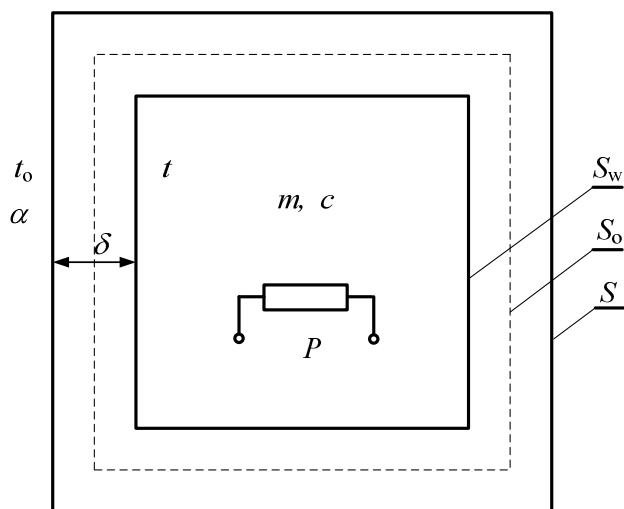
Wielkości cieplne	Wielkości elektryczne
$q = -\lambda \text{ grad } t$ q – gęstość mocy cieplnej, λ – przewodność cieplna właściwa, t – temperatura	$j = -\gamma \text{ grad } V$ j – gęstość prądu, γ – konduktywność, V – potencjał elektryczny
$q = \frac{t_1 - t_2}{\delta} = \Delta t$ δ – długość toru cieplnego	$j = \gamma \frac{V_1 - V_2}{l} = \Delta V$ l – długość toru elektrycznego
$P = q F_t$ P – moc cieplna, F_t – przekrój toru cieplnego	$I = j F_e$ I – prąd elektryczny, F_e – przekrój toru elektrycznego
$P = \frac{\Delta t}{W}$ W – opór cieplny	$I = \frac{\Delta V}{R}$ R – rezystancja
$W_p = \frac{\delta}{\lambda F_t}$ W_p – opór przewodzenia	$R = \frac{l}{\gamma F_e}$
$\nabla^2 t - \frac{c_t \rho_t}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial \tau_t} = 0$ τ_t – czas zjawisk cieplnych, c_t – ciepło właściwe, ρ_t – gęstość masy elementów układu termokinetycznego	$\nabla^2 V - \frac{c_e \rho_e}{\gamma} \frac{\partial V}{\partial \tau_e} = 0$ τ_e – czas zjawisk elektrycznych, c_e – pojemność elektryczna właściwa, ρ_e – gęstość masy elementów układu elektrycznego
C_t – pojemność cieplna	C_e – pojemność elektryczna

Zasady modelowania matematycznego zilustruje prosty przykład układu cieplnego.

Ciało o masie m i cieple właściwym c , pokryte warstwą izolacji cieplnej o grubości d , znajduje się w temperaturze równej temperaturze otoczenia t_0 . Niech ciało będzie nagrzewane równomiernie za pomocą grzejnika elektrycznego (rys.1).

Przyjmujemy, że współczynnik przejmowania ciepła α z zewnętrznej powierzchni do otoczenia i współczynnik przewodności ciepłej właściwej λ są stałe. Założenie to oznacza, że jest stały również współczynnik przenikania ciepła k wyrażający się wzorem:

$$k = \frac{1}{\frac{\delta}{\lambda} \frac{S}{S_0} + \frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$



Rys. 1. Przykład układu cieplnego

Opór cieplny układu oraz pojemność cieplna są opisane następująco

$$W = \frac{1}{S k} \quad (2)$$

$$C_t = mc \quad (3)$$

Jeżeli moc cieplna grzejnika wynosi P , to dla podanych wyżej założeń otrzymujemy równanie różniczkowe nagrzewanego ciała

$$C_t \frac{\partial T}{\partial \tau_t} + \frac{T}{W} = P \quad (4)$$

gdzie $T = t - t_0$

Wprowadzając skale analogii, jako stosunek wielkości cieplnych do elektrycznych otrzymamy:

$S_C = C_t / C_e$ – skala pojemności,

$S_t = T / U$ – skala temperatur,

$S_w = W / R$ – skala oporów,

$S_p = R_p / U_0$ – skala mocy,

$S_\tau = \tau_t / \tau_e$ – skala czasu.

Wyrażając wielkości cieplne przy pomocy wielkości elektrycznych i skali analogii otrzymamy

$$C_e \frac{S_C S_t}{S_\tau S_p} \frac{\partial U}{\partial \tau_e} + \frac{S_t}{S_w S_p} \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \quad (5)$$

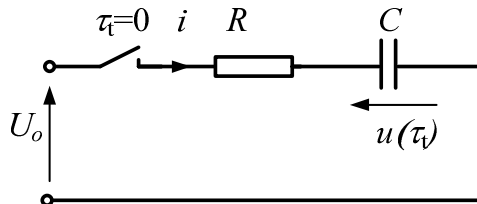
Przyjmując

$$\frac{S_C S_t}{S_\tau S_P} = 1 \quad \frac{S_t}{S_W S_P} = 1 \quad (6)$$

otrzymujemy analogiczne równanie opisujące zjawiska w układzie elektrycznym

$$C_e \frac{\partial U}{\partial \tau_e} + \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \quad (7)$$

Układem analogowym, modelującym przyrost temperatury $T(\tau) = t(\tau) - t_0$ rozważanego ciała, jest zatem prosty obwód elektryczny zawierający rezystor R i kondensator o pojemności C_e połączone w szeregowo, przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Układ analogowy modelujący przyrost temperatury w układzie przedstawionym na rysunku 1

Wartości parametrów modelu U_0 , C_e , R dobieramy w ten sposób, aby przy danych wartościach wielkości cieplnych C_t , W , P były spełnione związki pomiędzy skalami analogii.

Do przeprowadzenia obliczeń Szczególnie korzystne jest zastosowanie programów komputerowych analizujących obwody elektryczne, nie ma wówczas problemów przy doborze elementów RC, jak w przypadku budowy modelu fizycznego (np. model Beukena).

W ćwiczeniu przedstawiono model dyskretny RC układu termokinetycznego ściany pieca komorowego w postaci płyty dwuwarstwowej (szamota i wata żuźłowa). Analizę tak otrzymanego obwodu przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Pspice [3]. Otrzymane przebiegi wielkości elektrycznych posłużyły do obliczenia temperatury i mocy cieplnej w poszczególnych warstwach płyty

1.2. model analogowy RC Beukena

W rozważaniach dotyczących przenoszenia i akumulowania ciepła w stanach nieustalonych podstawowym równaniem różniczkowym jest równanie Fouriera-Kirchhoffa

$$\nabla^2 t - \frac{c_t \rho_t}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial \tau_t} = - \frac{p_v}{\lambda} \quad (8)$$

gdzie p_v - gęstość objętościowa mocy źródeł ciepła.

Równanie (1) w przypadku rozważania liniowego i bezźródłowego pola temperatur we współrzędnych prostokątnych dla płaskiej płyty o grubości d przyjmuje postać [1,2]

$$\frac{\partial^2 t(x_t, \tau_t)}{\partial x_t^2} = \frac{c_t \rho_t}{\lambda} \frac{\partial t}{\partial \tau_t} \quad (9)$$

gdzie $x_t \in (0, \delta)$ oraz $\tau_t (0, \infty)$

Wprowadzając do równania (2) wyrażenia określające opór cieplny

$$W = \frac{\delta}{\lambda F_t} \quad (10)$$

oraz pojemność cieplną

$$C_t = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \rho_t c_t F_t \delta \quad (11)$$

otrzymamy

$$\frac{\partial^2 t(x_t, \tau_t)}{\partial x_t^2} = \frac{C_t W}{\delta^2} \frac{\partial t}{\partial \tau_t} \quad (12)$$

Rozwiązanie tego równania jest każdorazowo uzależnione od określonych warunków początkowych i brzegowych. Duża różnorodność tych warunków utrudnia stosowanie metod analitycznych.

Przebiegi cieplne w pewnych warunkach można łatwiej wyznaczać na modelu elektrycznym. Procesy elektromagnetyczne występujące w jednorodnej linii długiej RC o parametrach rozłożonych w jednym kierunku opisuje równanie

$$\frac{\partial^2 V(x_t, \tau_e)}{\partial x_t^2} = \frac{RC_e}{l^2} \frac{\partial V}{\partial \tau_e} \quad (13)$$

gdzie $x_t \in (0, l)$ oraz $\tau_e (0, \infty)$

Definiując współczynniki skali w postaci:

$S_t = t/V$ – skala temperatur,

$S_\tau = \tau_t/\tau_e$ – skala czasu,

$S_\delta = x_t/x_e = \delta/l$ – skala wymiarów liniowych,

$S_W = W/R$ – skalę oporów,

$S_C = C_t/C_e$ – skalę pojemności

możemy równanie (13) przedstawić następująco

$$\frac{S_W S_C}{S_\tau} \frac{\partial^2 t(x_t, \tau_t)}{\partial x_t^2} = \frac{C_t W}{\delta^2} \frac{\partial t}{\partial \tau_t} \quad (14)$$

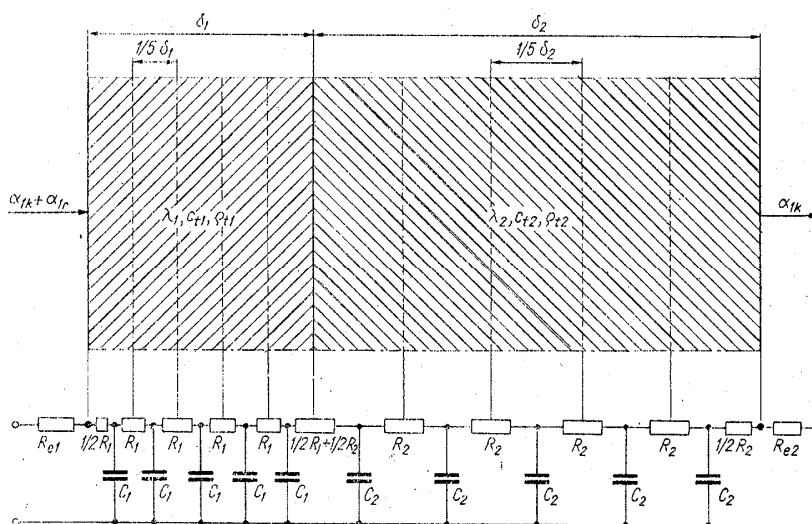
przy czym powinien być więc spełniony warunek

$$\frac{S_w S_C}{S_\tau} = 1 \quad (15)$$

Z powyższego wynika, że zakładając skalę czasu ustala się jednocześnie wartość iloczynu RC_e .

1.3. Obliczanie temperatury w ścianie pieca

Jako przykład obliczeń rozważono dwuwarstwową ścianę pieca komorowego (szamota i wata żuźlowa), która z jednej strony przejmuje ciepło przez promieniowanie i konwekcję, z drugiej zaś oddaje ciepło wyłącznie przez konwekcję (rys. 3).



Rys. 3. Układ termokinetyczny w postaci płyty płaskiej równoległościenniej, nieskończenie rozciągłej, dwuwarstwowej i jego model elektryczny dyskretny RC

W pracy [1] rozpatrywano taki układ, określając wartości elementów elektrycznych dyskretnego modelu analogowego, biernego RC. Zakładano przy tym, że z tak dobranych rezystorów i kondensatorów zostanie wykonany model fizyczny. Wiązało się to z ograniczeniami w zakresie doboru wartości tych elementów.

W przedstawionym przykładzie, podobnie jak w pracy [1], dokonano podziału każdej warstwy płyty na 5 elementarnych warstw o jednakowej grubości, jednak przy założeniu skali czasu $S_\tau = 1$. W tablicy 2 podano parametry przyjęte do obliczeń.

Tab.1.2. Dane materiałowe i wartości współczynników przejmowania ciepła [1]

szamota	wata żużlowa
przewodność cieplna właściwa	
$\lambda_1=1,163 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	$\lambda_2=0,0465 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
ciepło właściwe	
$c_{t1}=1,13 \cdot 10^3 \text{ W}\cdot\text{s/(kg}\cdot\text{K)}$	$c_{t2}=0,741 \cdot 10^3 \text{ W}\cdot\text{s/(kg}\cdot\text{K)}$
gęstość	
$\rho_{t1}=1800 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{t2}=100 \text{ kg/m}^3$
C_t – pojemność cieplna	C_e – pojemność elektryczna
grubość warstwy	
$\delta_1=0,1 \text{ m}$	$\delta_2=0,2 \text{ m}$
współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję	
$\alpha_{1k}=50 \text{ W/(m}^3\cdot\text{K)}$	$\alpha_{2k}=10 \text{ W/(m}^3\cdot\text{K)}$
współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie	
$\alpha_{1r}=250 \text{ W/(m}^3\cdot\text{K)}$	$\alpha_{2r}=0 \text{ W/(m}^3\cdot\text{K)}$

Korzystając z zależności

$$S_\tau = S_w \quad S_C = \frac{1}{RC_e} \cdot \frac{\delta^2}{a_t} \quad (16)$$

iloczyn RC_e dla pierwszej warstwy przyjmuje postać

$$(RC_e)_1 = \frac{\delta_1^2}{a_{t1} S_\tau} \quad (17)$$

gdzie

$$a_{t1} = \lambda_1 / (c_{t1} \rho_{t1})$$

przy założonej skali czasu $S_\tau = 1$, wartość iloczynu wyniesie

$$(RC_e)_1 = 17489,3 \, \Omega \cdot F \quad (18)$$

Zakładamy, że pojemność jednego czwórnika wynosi 1F. Wobec tego $C_{e1} = 5 \text{ F}$.
Pojemność cieplna elementu pierwszej warstwy o powierzchni jednostkowej $F_t = 1 \text{ m}^2$ przyjmie wartość

$$(C_t)_1 = c_{t1} \rho_{t1} \delta_1 F_{t1} = 20,34 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{s} / \text{K} \quad (19)$$

Skala pojemności i skala oporu wyniosą

$$S_c = \frac{(C_t)_1}{(C_e)_1} = 40680 \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{K} \cdot \text{F}} \quad (20)$$

$$S_w = \frac{S_t}{S_c} = 2,4582 \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{W} \cdot \Omega} \quad (21)$$

Na podstawie skal S_t oraz S_w można wyznaczyć rezystancje i pojemności czwórników modelujących każdą warstwę płyty oraz rezystancje modelujące opory dopływu i odpływu ciepła. Ponieważ opór cieplny przewodzenia jednego elementu warstwy podzielonej na n części o jednakowej grubości wyraża zależność

$$W = \frac{\delta}{n \lambda F_t} \quad (22)$$

zatem opór cieplny jednego elementu warstwy pierwszej gdy $n = 5$ wynosi

$$W_1 = 0,017916 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (23)$$

oraz opór cieplny jednego elementu warstwy drugiej przyjmie wartość

$$W_2 = 0,86022 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (24)$$

Odpowiadające oporom cieplnym wartości rezystancji można wyznaczyć korzystając ze skali oporów

$$S_w = \frac{W}{R} \quad (25)$$

$$R_1 = \frac{W_1}{S_w} = 728,83 \Omega \quad (26)$$

$$R_2 = \frac{W_2}{S_w} = 34993,9 \Omega$$

Pojemność czwórników drugiej warstwy (wata żużlowa) określamy na podstawie zależności

$$S_c = \frac{C_{t2}}{C_{e2}} \quad (27)$$

$$C_{e2} = \frac{C_{t2}}{5 S_c} = 0,072861 \text{ F}$$

Opory cieplne dopływu i odpływu ciepła obliczamy następująco

$$W_{a1} = \frac{1}{(\alpha_{1k} + \alpha_{1r}) \cdot F_t} = 3,333 \cdot 10^{-3} \frac{K}{W} \quad (28)$$

$$W_{a2} = \frac{1}{\alpha_{2k} \cdot F_t} = 0,1 \frac{K}{W}$$

Odpowiadające tym oporom cieplnym wartości rezystancji wyniosą

$$R_{e1} = \frac{W_{a1}}{S_w} = 135,59 \Omega \quad (29)$$

$$R_{e2} = \frac{W_{a2}}{S_w} = 4068 \Omega$$

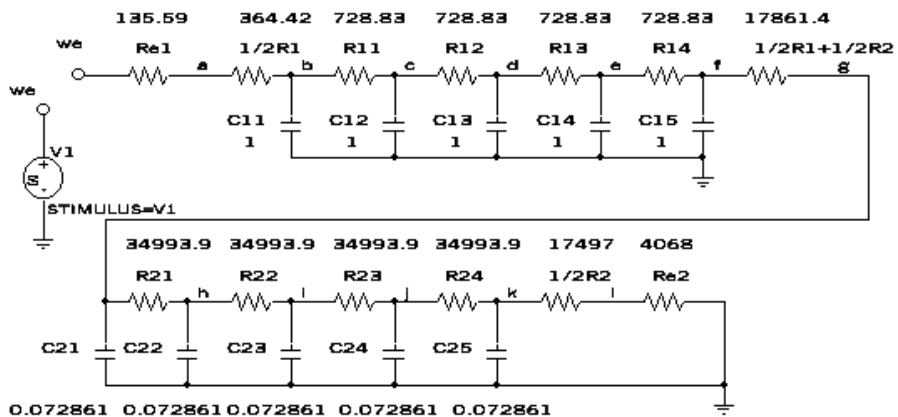
Przyjmując skalę temperatur

$$S_t = \frac{t}{V} = 1 \frac{K}{V} \quad (30)$$

skala mocy wyniesie

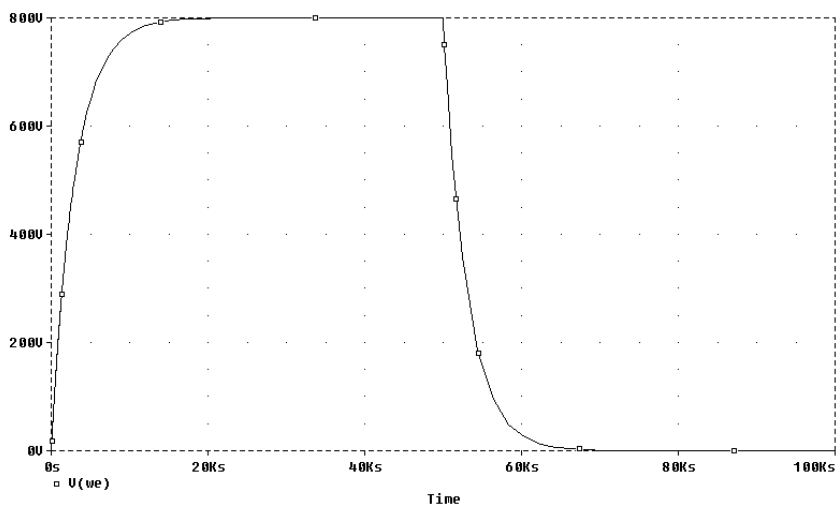
$$S_p = \frac{P}{I} = \frac{S_t}{S_w} = 40680 \frac{W}{A} \quad (31)$$

Model elektryczny ściany pieca, którą rozpatrujemy jako płytę o grubości d , nieskończenie rozległą w dwóch pozostałych kierunkach, przedstawia rysunek 4.

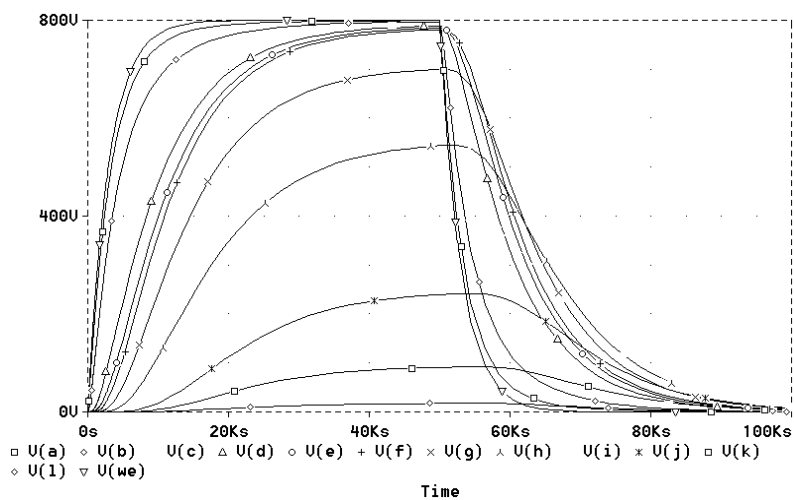


Rys. 4. Model dyskretny RC układu termokinetycznego płyty dwuwarstwowej

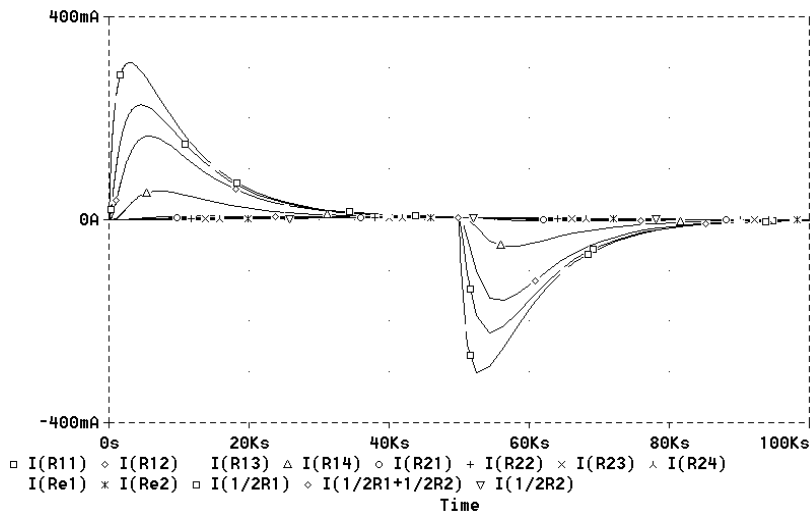
Rozwiązanie tego obwodu w stanie przejściowym uzyskano korzystając z programu PSpice. Zakładając przebieg temperatury źródła (rys. 2) otrzymano przebiegi temperatury i mocy cieplnej w poszczególnych warstwach ściany przedstawione na rysunkach 5, 6 i 7.



Rys. 5. Przebieg temperatury źródła ciepła, 1V – 1 K



Rys. 6. Przebieg temperatury w poszczególnych warstwach płyty oraz temperatury źródła ciepła 1V – 1 K



Rys. 7. Przebieg mocy cieplnej w poszczególnych warstwach płyty (wartości na osi rzędnych należy pomnożyć przez skalę mocy $S_p=40680 \text{ W/A}$)

Modelowanie układów cieplnych można łatwo realizować wykorzystując analogie cieplno-elektryczne i stosując programy numeryczne do obliczania obwodów elektrycznych. Przy czym nie istnieją ograniczenia w doborze rezystancji i pojemności takie, jak w przypadku budowy klasycznego, fizycznego modelu RC. Wybór skali temperatur w modelach fizycznych związany jest z wytrzymałością elektryczną kondensatorów i na ogół nie przekracza 100V [1]. Przy obliczeniach numerycznych możemy dowolnie przyjmować wartości napięcia zasilającego oraz kształtować jego przebieg w czasie. Zakładając skalę czasu równą jedności uzyskujemy w rozwiązaniu przebiegi temperatury w czasie rzeczywistym, co jest trudno osiągalne w fizycznych modelach RC.

2. INSTRUKCJA WYKONANIA ĆWICZENIA

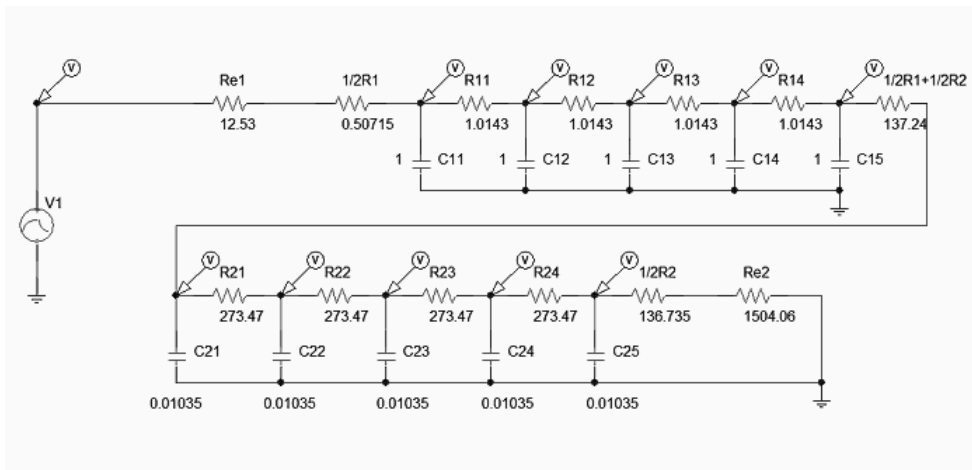
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie rozkładu temperatury w stanie przejściowym, w ścianie walcowego zbiornika na wodę, na jednostkę jego wysokości z uwzględnieniem warstwy izolacji. Przyjmując, że średnica zbiornika jest dużo razy większa od grubości jego ścianki, analizę można wykonać w układzie płaskim. W modelu symulacyjnym należy podzielić ściankę zbiornika i warstwę izolacji na pięć elementarnych warstw o jednakowej grubości i opracować model dyskretny RC układu termokinetycznego. Dane materiałowe do obliczenia parametrów modelu przedstawia tabela 2.1.

Tab. 2.1. Dane materiałowe i wartości współczynników przejmowania ciepła dla zbiornika

stal węglowa	warstwa izolacji
przewodność cieplna właściwa	
$\lambda_1=59,313 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	$\lambda_2=0,055 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
ciepło właściwe	
$c_{t1}=479 \text{ W} \cdot \text{s/(kg} \cdot \text{K)}$	$c_{t2}=837 \text{ W} \cdot \text{s/(kg} \cdot \text{K)}$
gęstość	
$\rho_{t1}=7850 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{t2}=186 \text{ kg/m}^3$
C_t – pojemność cieplna	C_e – pojemność elektryczna
grubość warstwy	
$\delta_1=0,02 \text{ m}$	$\delta_2=0,005 \text{ m}$
temperatura ścianki wewnętrznej	współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję
$T_{1w}=80 \text{ }^\circ\text{C}$	$\alpha_{2k}=10 \text{ W/(m}^3 \cdot \text{K)}$
	współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie
	$\alpha_{2r}=0 \text{ W/(m}^3 \cdot \text{K)}$

W edytorze schematów pakietu PSpiced (Schematics) [4] należy zbudować schemat podobny do przedstawionego na rys. 8, uwzględniając obliczone parametry elementów R i C . Dla kondensatorów przyjmując warunek początkowy $I_C=0$. Zmianę

temperatury wewnątrz zbiornika można odwzorować w programie PSpice poprzez źródło napięcia o charakterystyce wykładniczej (VEXP) [4]. Aby opisać to źródło należy zdefiniować następujące parametry: initial voltage (V1) – napięcie początkowe, peak voltage (V2) – napięcie do którego dąży amplituda sygnału, rise delay (td1) – czas opóźnienia narastania sygnału, rise time (tc1) – stała czasowa przedniego zbocza, fall delay (dt2) – czas opóźnienia opadania sygnału, (tc2) – stała czasowa tylnego zbocza. W przykładzie dla jednego z wymuszeń można przyjąć następujące parametry źródła: V1=10V, V2=80V, td1=0, tc1=1ks, dt2=10ks, tc2=10ks.



Rys. 8. Model dyskretny RC układu termokinetycznego ścianki zbiornika z izolacją

Analizę układu należy przeprowadzić dla różnych wartości parametrów źródła (czyli przebiegów temperatury w zbiorniku o różniących się kształtach) oraz przy ustalonych parametrach źródła dla różnych grubości warstwy izolacyjnej.

Aby zainicjować obliczenia należy z menu programu wybrać symulację stanów przejściowych Analysis/Setup oraz Bias Point Detail. Przykładowe ustawienia w oknie analizy stanów przejściowych: Print Step= 200, Final Time= 50ks, Step Ceiling= 2s.

Uruchomienie analizy następuje poprzez wybranie komendy Analysis/Simulate lub F11. Wyniki symulacji są dostępne w programie Probe.

Literatura do ćwiczenia 7

- [1] Hering M., *Termokinetika dla elektryków*, Warszawa, 1980
- [2] Goleman R., Nalewaj K., *Modelowanie układów cieplnych metodami elektrycznymi*, XXVI Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, IC–SPETO, Gliwice-Niedzica 2003, s. 147–150
- [3] Kącki E., *Termokinetika*, Warszawa, 1967
- [4] MicrosSim PSpice A/D & Basics+, *Circuit Analysis Software*, User's Guide, 1996.