



Wydział Informatyki

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

Symulator mocy pobieranej przez urządzenia potrzeb własnych elektrowni cieplnej

inż. Grzegorz Rumatowski

Promotor

dr hab. inż. Andrzej Urbaniak, prof. PP

Poznań, 2014

Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Wprowadzenie	2
1.2	Cel i zakres pracy	2
2	Podstawy teoretyczne	3
2.1	Elektrownie - zarys ogólny	3
2.2	Urządzenia potrzeb własnych	5
2.3	Charakterystyki wentylatorów i pomp	5
2.3.1	Charakterystyki wentylatorów	5
2.3.2	Charakterystyki pomp	10
3	Moc pobierana przez wentylatory i pompy	14
3.1	Wentylatory	14
3.2	Pompy	16
4	Wyznaczanie charakterystyk wentylatorów i pomp	17
4.1	Metoda obliczeń charakterystyk	17
4.2	Metoda interpolacji	22
5	Symulator mocy pobieranej przez wentylatory i pompy	22
5.1	Opis użytych technologii informatycznych	22
5.2	Projekt i realizacja interfejsu użytkownika	26
5.3	Implementacja programowa algorytmów	29
5.4	Wyniki symulacji	31
6	Regulacja wydatku wentylatorów	38
6.1	Podstawy i zasady regulacji	38
6.2	Analiza symulacyjna regulacji	41
7	Podsumowanie pracy	47
8	Literatura	47
A	Kod źródłowy	48
B	Instrukcja instalacji	48

1 Wstęp

1.1 Wprowadzenie

Branża energetyczna korzysta z informatyki w ograniczonym zakresie odnoszącym się do transmisji i obróbki danych z przyrządów pomiarowych (liczniki itp.) oraz systemów nadzorczych. Temat pracy wskazuje jednak, iż informatyka może być pomocnym narzędziem przy modelowaniu i symulacji urządzeń bloków energetycznych, co w efekcie ułatwia proces planowania budowy elektrowni pod względem oszczędności energetycznych. O efektywności energetycznej elektrowni konwencjonalnej (t.j. cieplnej) decyduje między innymi moc pobierana przez urządzenia potrzeb własnych. Odpowiednia symulacja tej mocy może być podstawą poprawnego wyboru rodzaju układów napędowych tych urządzeń. Zagadnienie poprawy efektywności energetycznej elektrowni cieplnej węglowej znalazło swoje odzwierciedlenie w ustawie z 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej [Dz.U. z 2011 r., Nr 94, poz. 551.] dotyczącej tylko układów potrzeb własnych. W treści pracy rozważa się zagadnienia z zakresu energetyki, informatyki i automatyki.

1.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest zaprojektowanie i realizacja programowa symulatora mocy czynnej pobieranej przez silniki napędowe wybranych urządzeń potrzeb własnych elektrowni cieplnej, w szczególności takich jak wentylatory podmuchu (powietrza) i ciągu (spalin) oraz pompy wody zasilającej. Symulator jest przeznaczony zarówno jako pomoc dydaktyczna dla studentów energetyki jak i dla projektantów bloków energetycznych.

Struktura pracy jest następująca. W rozdziale 2 przedstawiono definicje i określenia związane z tematyką pracy. Rozdział ten zawiera również opis charakterystyk wentylatorów i pomp. Rozdział 3 jest poświęcony analizie i wzorom obliczeniowym mocy pobieranej przez wentylatory i pompy. W rozdziale 4 zawarto analityczną i numeryczną metodę wyznaczania charakterystyk oraz schemat blokowy algorytmu obliczeń. Zawartość rozdziału 5 stanowi opis wykorzystanych, przy realizacji symulatora, technologii informatycznych, projekt i realizację interfejsu użytkownika, implementację algorytmów oraz wyniki symulacji. W rozdziale 6 zostały przedstawione zasady regulacji automatycznej, schemat blokowy układu regulacji wydajności wentylatorów i pomp oraz przebiegi procesu regulacji. Rozdział 7 stanowi podsumowanie pracy.

2 Podstawy teoretyczne

2.1 Elektrownie - zarys ogólny

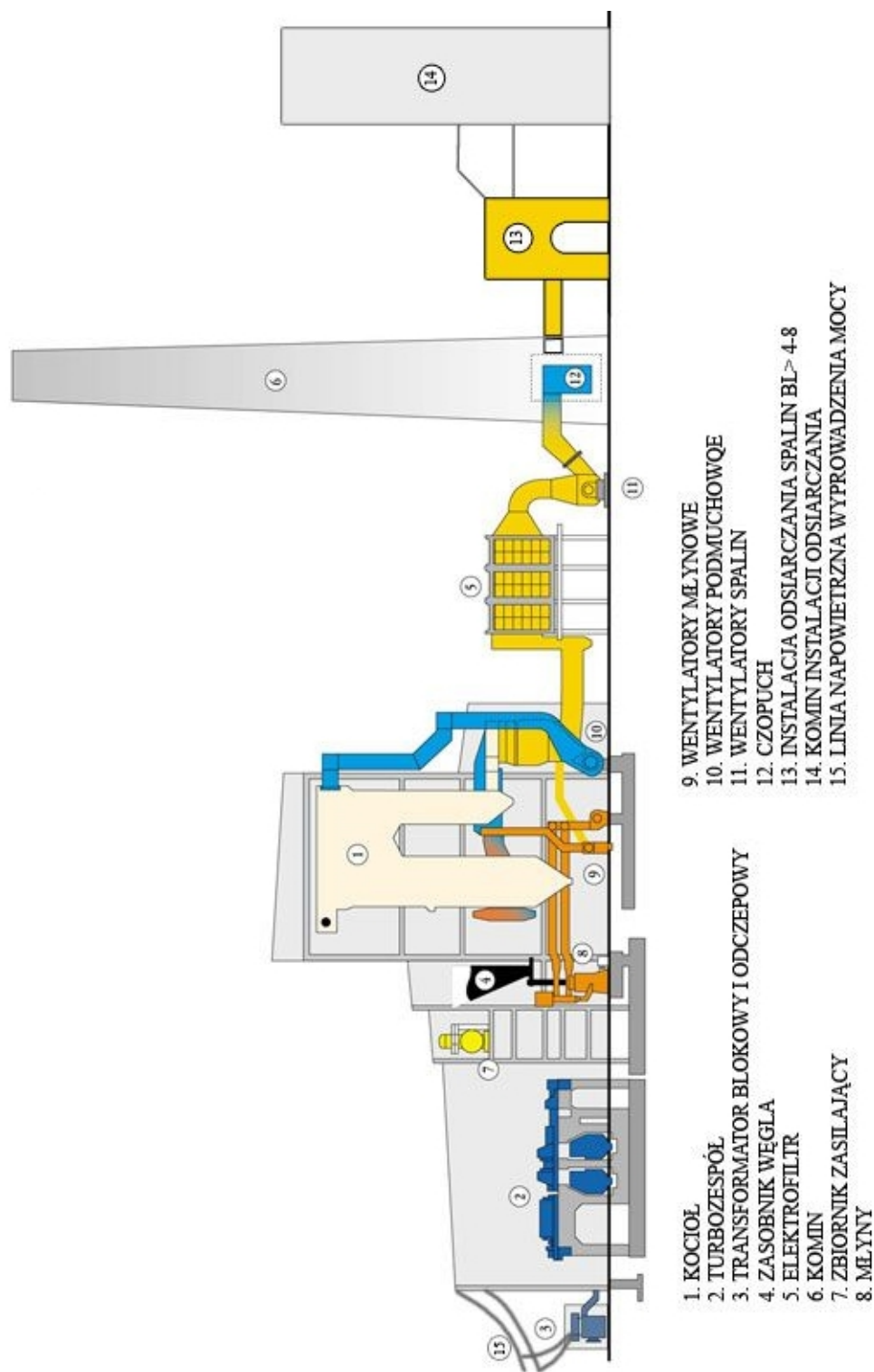
W Polsce wytwarzanie energii elektrycznej przebiega głównie w dużych elektrowniach, będących elektrowniami cieplnymi konwencjonalnymi, które wytwarzają ok 90% energii. Elektrownią nazywa się zakład wytwarzający energię elektryczną na skalę przemysłową poprzez wykorzystanie innych rodzajów energii (np. energię paliw organicznych). Proces wytwarzania energii elektrycznej w elektrowni cieplnej przebiega w układzie kilkustopniowych przemian energetycznych. Cykl produkcji energii elektrycznej w elektrowni cieplnej rozpoczyna się od podania paliwa, którego energia chemiczna jest zamieniana na energię cieplną w procesie spalania. Uzyskane w ten sposób ciepło jest wykorzystywane do wytworzenia pary w kotle, napędzającej turbinę. Powstała energia mechaniczna turbiny jest zamieniana na energię elektryczną za pomocą generatora. W wytwarzaniu energii elektrycznej można wyróżnić cztery istotne układy:

- układ paliwo–powietrze–spaliny,
- układ parowo–wodny,
- układ chłodzenia,
- układ elektryczny

Większość energii elektrycznej w Polsce jest wytwarzana przez elektrownie cieplne konwencjonalne, opalane węglem kamiennym lub brunatnym. Największymi elektrowniami cieplnymi są:

1. Bełchatów, opalana węglem brunatnym, o mocy osiągalnej 5342 MW
2. Kozienice, opalana węglem kamiennym, o mocy 2600 MW
3. Opole, opalana węglem kamiennym, o mocy 2160 MW
4. Turów, opalana węglem brunatnym, o mocy 2000 MW
5. Dolna Odra, opalana węglem kamiennym, o mocy 1708 MW

Elektrownie cieplne składają się z **bloków energetycznych** obejmujących kocioł parowy, turbinę parową, generator oraz szereg urządzeń pomocniczych. Na rysunku 2.1 przedstawiono usytuowanie podstawowych urządzeń w bloku energetycznym o mocy 200 MW.



Rysunek 2.1: Usytuowanie podstawowych urządzeń bloku 200 MW

2.2 Urządzenia potrzeb własnych

Oprócz głównych urządzeń występujących w elektrowni cieplnej, takich jak kotły, wytwornice pary, turbozespoły, wymagane są również urządzenia pomocnicze. Praca tych urządzeń związana jest z poborem mocy stanowiącej część mocy całkowitej wytwarzanej w elektrowni. Urządzenia te nazywano **urządzeniami potrzeb własnych**. Urządzenia potrzeb własnych dzieli się pod względem funkcjonalnym w zależności od urządzenia podstawowego. Rozróżnienie to definiuje następujący podział urządzeń potrzeb własnych:

- kotłowe urządzenia potrzeb własnych,
- turbinowe urządzenia potrzeb własnych

W skład *urządzeń potrzeb własnych kotłowych* wchodzi: urządzenia do podawania i przygotowania paliwa, urządzenia połączone z procesem spalania (t. j. dostarczaniem powietrza, usuwaniem spalin oraz produktów spalania), jak i urządzenia w obiegu parowo-wodnym zasilającym kotły. W grupie *urządzeń potrzeb własnych turbinowych* znajdują się: urządzenia obiegu parowo-wodnego w części turbinowej i układu regeneracji, urządzenia bezpośrednio połączone z pracą turbozespołu oraz urządzenia obiegu chłodzenia i obiegu ciepłowniczego. Urządzenia potrzeb własnych zużywają część wytworzonej w elektrowni energii. Największymi odbiornikami, zarówno pod względem ilości jak i mocy całkowitej, są: pompy wody zasilającej, wentylatory spalin i powietrza oraz pompy wody chłodzącej. Procentowy udział mocy urządzeń potrzeb własnych w stosunku do mocy elektrowni cieplnej zawiera się w granicach od 9 do 12%.

2.3 Charakterystyki wentylatorów i pomp

2.3.1 Charakterystyki wentylatorów

Ważnym elementem układu urządzeń potrzeb własnych w elektrowniach cieplnych są wentylatory kotłowe do których należą wentylatory powietrza (podmuchu) i wentylatory spalin (ciągu). **Wentylator** to wirnikowa maszyna przepływowa służąca do przetłaczania par i gazów przy określonym ciśnieniu. Wentylatory znajdują różnorodne zastosowanie w elektrowniach cieplnych, jednak największa ich grupa to wentylatory kotłowe. Grupa ta składa się z *wentylatorów powietrza (podmuchu)* i *wentylatorów spalin (ciągu)*, oraz w niektórych przypadkach, *wentylatorów młynowych*. Zadanie wentylatorów powietrza polega na dostarczeniu do kotła niezbędnej do spalania ilości powietrza oraz sprężenie go do ciśnienia, potrzebnego do pokonania oporów

przepływu powietrza do komory paleniskowej. Zadaniem wentylatorów spalin jest usunięcie spalin z kotła do komina oraz zapewnienie odpowiedniego podciśnienia w komorze paleniskowej. Ze względu na budowę konstrukcyjną wentylatorów rozróżnia się: **wentylatory promieniowe** i **wentylatory osiowe**. Przepływ gazu lub pary w wentylatorach osiowych jest równoległy do osi wirnika, a w wentylatorach promieniowych przepływ jest prostopadły do osi wirnika. Wentylatory promieniowe używane są w przypadku wysokich ciśnień, natomiast wentylatory osiowe stosuje się przy niskich ciśnieniach a stosunkowo dużych objętościach gazu lub pary. Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi wentylator są:

- wydajność (wydatek, przepływ),
- spręż (spiętrzenie),
- moc,
- sprawność

Wydajność (wydatek, przepływ) wentylatora Q jest to objętość lub masa czynnika przetłaczanego w jednostce czasu (w m^3/s lub kg/s), dla warunków umownych. Wydajność wentylatora powietrza (podmuchu) można określić wzorem: [TULI 1976]

$$Q_{pow} = (0,242 \cdot 10^{-3}W_d + 0,5)\lambda\dot{m} \cdot \frac{273 + t_{pow}}{293} \cdot \frac{101325}{p_{pow}} \quad (2.1)$$

Podobnie dla wentylatora spalin (ciągu) mamy:

$$Q_{sp} = [(0,242 \cdot 10^{-3}W_d + 0,5)\lambda + 1,15]\dot{m} \cdot \frac{273 + t_{sp}}{293} \cdot \frac{101325}{p_{sp}} \quad (2.2)$$

gdzie:

W_d – wartość opałowa paliwa w kJ/kg ,

λ – współczynnik nadmiaru powietrza,

\dot{m} – ilość spalonego paliwa w kg/s ,

t_{pow} – temperatura powietrza w $^{\circ}C$,

t_{sp} – temperatura spalin w $^{\circ}C$,

Q – wydatek (zwany też wydajnością lub przepływem) w m^3/s

Spręż (spiętrzenie)

$$\Delta p = \Delta p_{wy} - \Delta p_{wl} \quad (2.3)$$

jest różnicą ciśnień między wlotem i wylotem wentylatora. Ciśnienia na wlocie p_{wl} i wylocie p_{wy} wentylatora są określone wzorami:

$$p_{wl} = p_{wlst} + \rho \frac{v_{wl}^2}{2} \quad (2.4)$$

$$p_{wy} = p_{wyst} + \rho \frac{v_{wy}^2}{2} \quad (2.5)$$

gdzie:

p_{wlst}, p_{wyst} – ciśnienia statyczne na wlocie i wylocie wentylatora,
 v_{wl}, v_{wy} – prędkości powietrza na wlocie i wylocie,
 ρ – gęstość czynnika

Zatem spiętrzenie wentylatora

$$\Delta p = p_{wyst} - p_{wlst} + \rho \frac{v_{wy}^2 - v_{wl}^2}{2} \quad (2.6)$$

$$\Delta p = \Delta p_{st} + \Delta p_d \quad (2.7)$$

gdzie:

Δp_{st} – przyrost ciśnienia statycznego w wentylatorze,
 Δp_d – przyrost ciśnienia dynamicznego w wentylatorze.

Użyteczna moc wentylatora określona jest wzorem:

$$P = Q \cdot \Delta p \quad (2.8)$$

gdzie:

Q – wydatek (wydajność, przepływ) w m^3/s ,
 Δp – spręż (spiętrzenie) w Pa,
 P – moc w W.

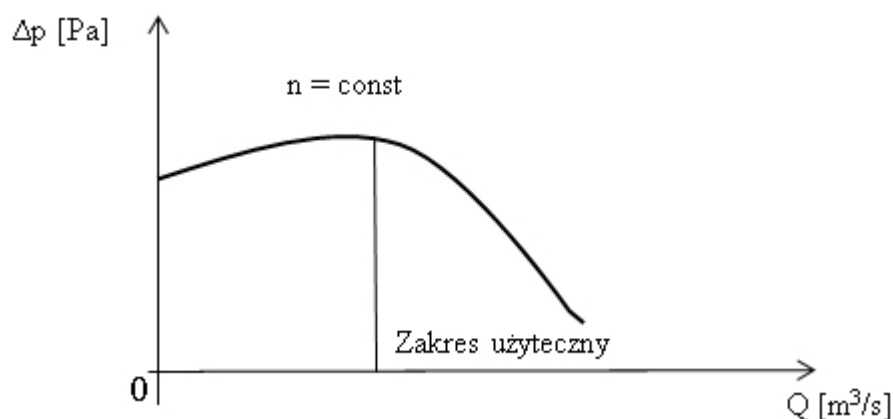
Sprawność wentylatora η jest stosunkiem mocy użytecznej wentylatora P do mocy na jego wale P_w czyli

$$\eta = \frac{P}{P_w} \quad (2.9)$$

Na pełną charakterystykę wentylatora składają się trzy następujące charakterystyki:

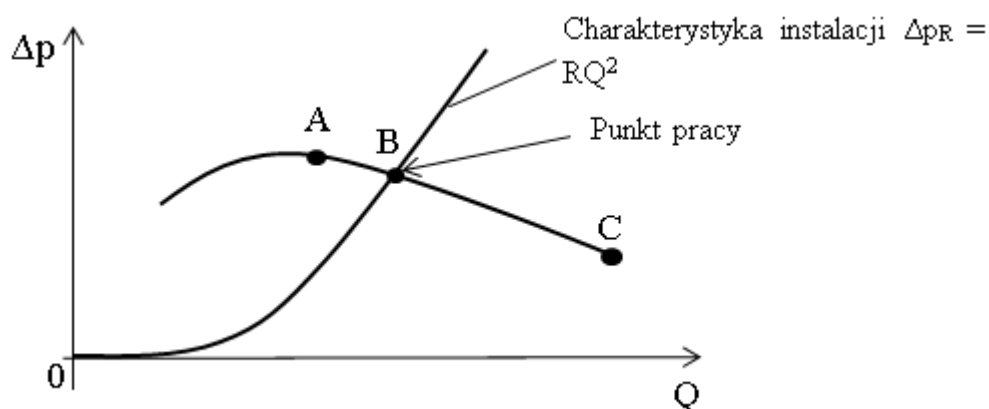
- charakterystyka przepływowa $\Delta p = f(Q)$,
- charakterystyka sprawności $\eta = f(Q)$,
- charakterystyka mocy $P = f(Q)$.

Główną charakterystyką wentylatora jest charakterystyka podstawowa obrazująca zależność między wytwarzanym ciśnieniem Δp a wydajnością Q wentylatora. Kształt tej charakterystyki ilustruje krzywa przedstawiona na rys. 2.2



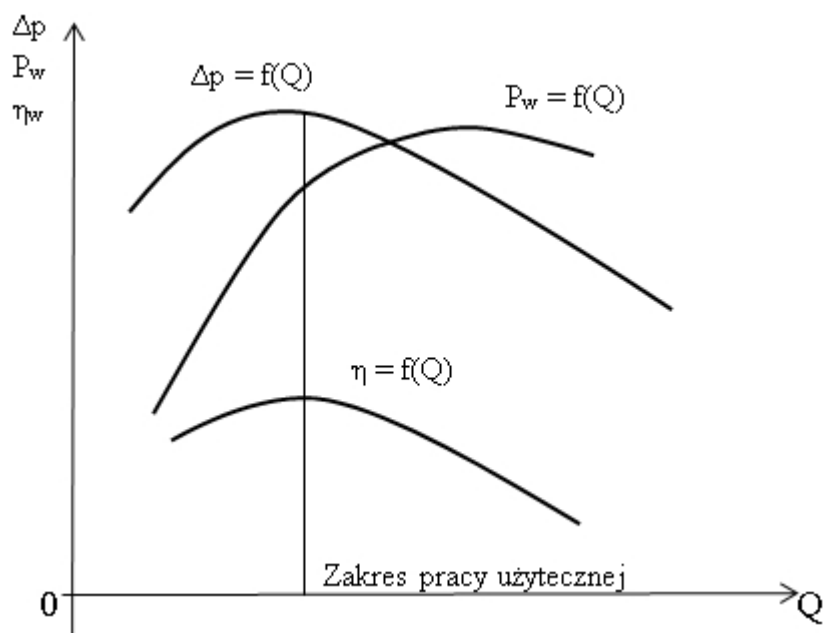
Rysunek 2.2: Charakterystyka podstawowa wentylatora (n – prędkość obrotowa)

Punkt pracy wentylatora leży na przecięciu charakterystyki wydajności (przepływu) wentylatora w zakresie użytecznym (dopuszczalnym) z charakterystyką instalacji (rys. 2.3). Użyteczny zakres pracy wentylatora znajduje się między punktami A i C. Pracę wentylatora w zakresie niestatecznym (na lewo od punktu A) charakteryzują drgania powietrza w instalacji oraz niska sprawność.



Rysunek 2.3: Punkt pracy i użyteczny zakres pracy wentylatora

Do pełniejszego scharakteryzowania wentylatora, oprócz charakterystyki podstawowej służą dodatkowo: charakterystyka sprawności oraz charakterystyka mocy pobieranej. Typowe wykresy tych charakterystyk zostały przedstawione na rys. 2.4.



Rysunek 2.4: Typowe charakterystyki wentylatora

2.3.2 Charakterystyki pomp

Do urządzeń potrzeb własnych elektrowni cieplnej pobierających największą moc należą pompy wody zasilającej kocioł i pompy wody chłodzącej. Zasada działania pompy (wirowej) polega na przekazywaniu energii kinetycznej obracającego się wirnika cząstkom cieczy. Różnica prędkości cząstek cieczy między wylotem i wlotem wirnika wytwarza różnicę ciśnień $\Delta p = p_{wy} - p_{wl}$. Wytworzona różnica ciśnień pomiędzy stroną ssawną (wlotem) a stroną tłoczną (wylotem) zapewnia ciągłość pracy pompy. Podstawową charakterystyką pracy pompy jest charakterystyka wydajności $H = f(Q)$ określająca zależność wysokości podnoszenia H od wydajności Q pompy uzyskiwana najczęściej przez dławienie przepływu Q na przewodzie tłocznym. Dla uzyskania charakterystyki przepływu konieczny jest pomiar ciśnienia na ssaniu i na tłoczeniu dla różnych wartości przepływu Q i dokonanie przeliczeń według wzoru [TATA 2006]

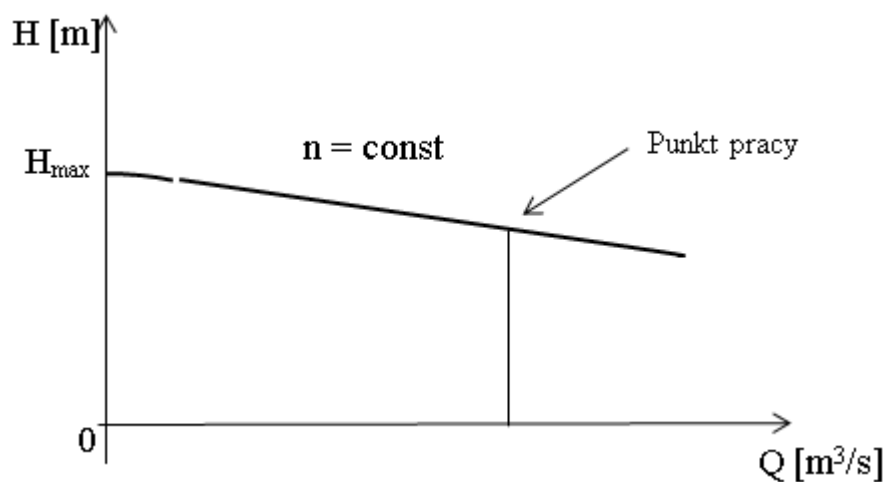
$$H = \frac{p_{wy} - p_{wl}}{\rho_{H_2O} \cdot g} + \Delta z + \frac{v_{wy}^2 - v_{wl}^2}{2g} \quad (2.10)$$

gdzie:

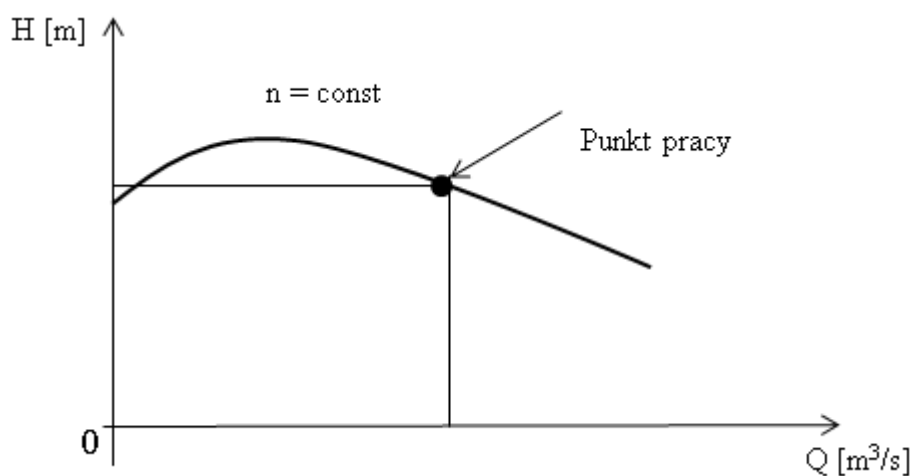
- p_{wl} – ciśnienie na ssaniu, w Pa,
- p_{wy} – ciśnienie na tłoczeniu, w Pa,
- Δz – różnica poziomów pomiędzy wlotem a wylotem pompy w m,
- v_{wl} – prędkość średnia wody na wlocie pompy w m/s ,
- v_{wy} – prędkość średnia wody na wylocie pompy w m/s ,
- ρ_{H_2O} – gęstość wody w kg/m^3 ,
- g – przyspieszenie ziemskie w m/s^2 ,
- H – wysokość podnoszenia w m.

Rozróżnia się dwa następujące rodzaje charakterystyk wydajności pomp wirowych:

- charakterystyki stateczne,
- charakterystyki niestateczne.



Rysunek 2.5: Stateczna charakterystyka wydajnościowa pompy wirowej dla ustalonej prędkości obrotowej



Rysunek 2.6: Niestateczna charakterystyka wydajnościowa pompy wirowej dla ustalonej prędkości obrotowej

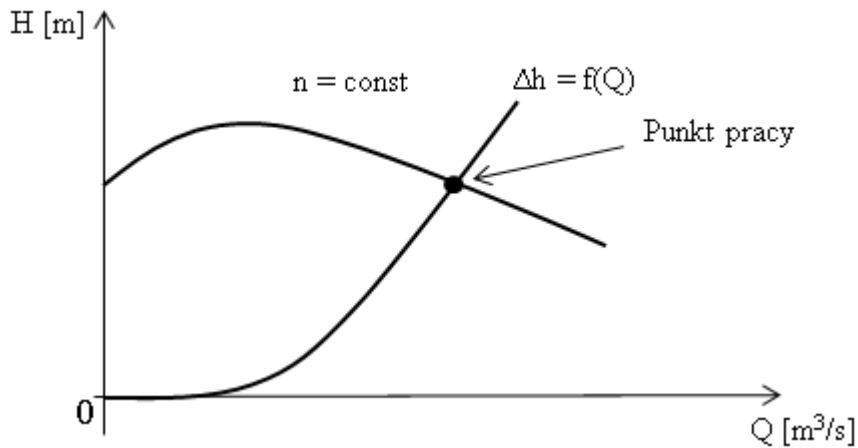
Liniowy model matematyczny charakterystyki statecznej ma postać:

$$H = H_{\text{max}} - R_h \cdot Q \quad (2.11)$$

gdzie R_h oznacza wewnętrzną oporność hydrauliczną pompy.

Stateczna charakterystyka przepływu jest cechą pomp o małej liczbie łopatek i o małym kącie spływu z łopatek na wylocie. Punkt pracy pompy o

niestatecznej charakterystyce przepływu $H = f(Q)$ znajduje się w jej opadającej części i jest miejscem przecięcia tej charakterystyki z charakterystyką rurociągu (przewodów) $\Delta h = f(Q)$ (rys. 2.7).



Rysunek 2.7: Wyznaczanie punktu pracy pompy

Moc użyteczna pompy jest określona zależnością:

$$P_u = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (2.12)$$

gdzie:

- Q – wydajność pompy, w m^3/s ,
- H – wysokość podnoszenia wody w m,
- γ – ciężar właściwy wody w kG/m^3 .

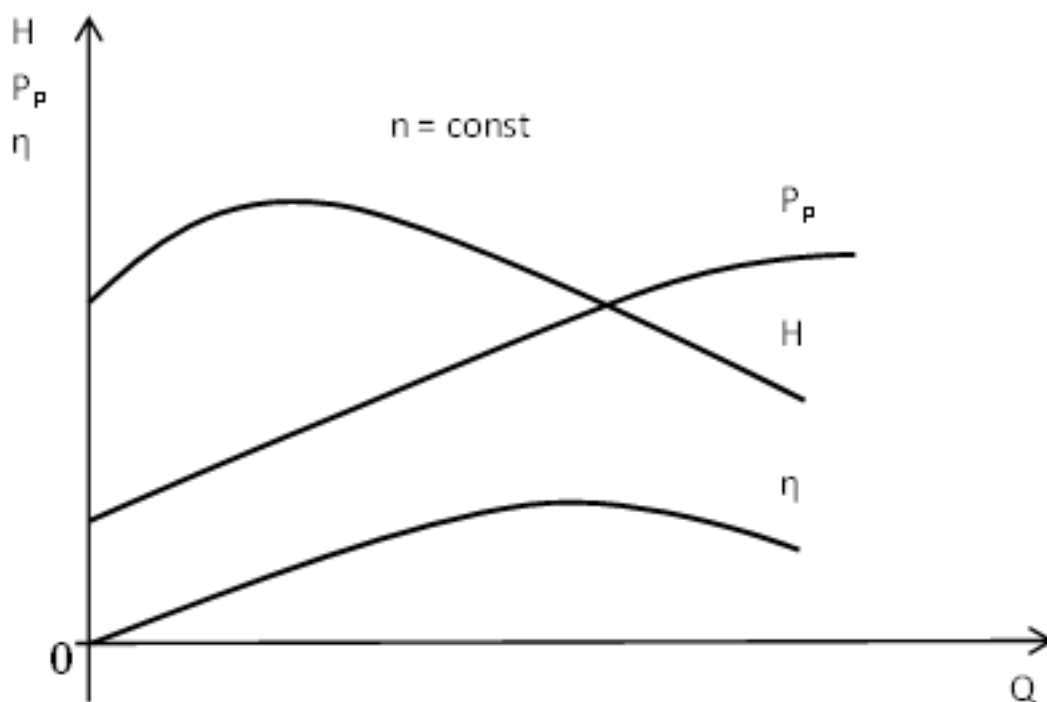
Jeżeli znane są ciśnienia na ssaniu i tłoczeniu pompy, to moc użyteczną można obliczyć wg. wzoru

$$P_u = Q \cdot (p_{wy} - p_{wl}) \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (2.13)$$

Oprócz charakterystyki przepływowej pompy ważnymi charakterystykami są następujące charakterystyki:

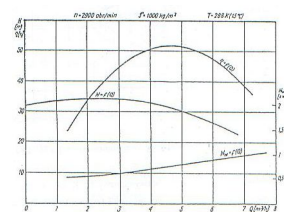
- charakterystyka mocy,
- charakterystyka sprawności.

Typowe kształty wszystkich trzech charakterystyk pompy wirowej zostały przedstawione na rys. 2.8.



Rysunek 2.8: Typowe charakterystyki pompy wirowej

Przykładowe charakterystyki konkretnej pompy wirowej przedstawiono na rys. 2.9.



Rysunek 2.9: Charakterystyka pompy wielostopniowej 25YNL2 przy stałej liczbie obrotów

Zauważyć można, że w przypadku pomp posługujemy się także wysokością pompowania H wyrażoną w metrach, będącą odpowiednikiem różnicy ciśnień na ssaniu i tłoczeniu.

3 Moc pobierana przez wentylatory i pompy

3.1 Wentylatory

Moc użyteczna wentylatora jest określona wzorem:

$$P = Q\Delta p \cdot 10^{-3} \text{ [kW]} \quad (3.1)$$

gdzie:

Q – wydajność wentylatora, w m^3/s ,
 Δp – różnica ciśnień (spręż), w Pa .

Moc przekazywana na wał wentylatora jest określona wzorem:

$$P_w = \frac{Q\Delta p \cdot 10^{-3}}{\eta} \text{ [kW]} \quad (3.2)$$

gdzie η oznacza sprawność wentylatora, a iloczyn $Q\Delta p$ oznacza moc użyteczną wentylatora w Watach. Moc P_w określa jednocześnie moc silnika napędowego wentylatora.

Wykorzystanie wzoru (3.2) do wyznaczania charakterystyki mocy $P_w = f(Q)$ na wale wentylatora, wymaga znajomości charakterystyki podstawowej $\Delta p = f(Q)$ i charakterystyki sprawności $\eta = f(Q)$ wentylatora.

Jeżeli silnikiem napędowym wentylatora jest silnik trójfazowy, to moc elektryczna P_{el} pobierana przez taki silnik jest określona zależnością:

$$P_{el} = \sqrt{3} \cdot UI \cdot \cos\varphi \quad (3.3)$$

gdzie:

U – napięcie międzyfazowe,
 I – prąd przewodowy,
 $\cos\varphi$ – współczynnik mocy silnika.

Moc pobieraną przez silnik napędowy można również obliczyć wg. wzoru:

$$P_{el} = \frac{P_w}{\eta_s} \quad (3.4)$$

przy czym η_s oznacza sprawność silnika. Ostatecznie moc pobierana z sieci potrzebna do pracy wentylatora jest określona zależnością:

Ostatecznie moc pobierana z sieci potrzebna do pracy wentylatora jest określona zależnością:

$$P_{el} = \frac{Q \Delta p}{\eta_s \eta} \quad (3.5)$$

W pracy do wyznaczenia funkcji opisującej przebieg charakterystyki dla znanych wartości współrzędnych punktów charakterystyki, uzyskanych w sposób analityczny lub pomiarowy, zastosowano metodę interpolacji.

Do przeliczania wartości Q , Δp i P po zmianie prędkości obrotowej z n_1 na n_2 służą wzory:

$$Q_2 = \frac{n_2}{n_1} Q_1 \quad (3.6)$$

$$\Delta p_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \cdot \Delta p_1 \quad (3.7)$$

$$P_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \cdot P_1 \quad (3.8)$$

Zmianę gęstości czynnika z wartości ρ_1 na ρ_2 uwzględnia zależność:

$$\Delta p_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \Delta p_1 \quad Q_1 = Q_2 = Q = const \quad (3.9)$$

Zmianę temperatury uwzględnia zależność:

$$\Delta p_2 = \frac{T_1}{T_2} \Delta p_1 \quad Q_1 = Q_2 = Q = const \quad (3.10)$$

Zmianę mocy użytecznej wentylatora określa wzór:

$$P_2 = \frac{\rho_2}{\rho_1} P_1 = \frac{T_1}{T_2} P_1 \quad (3.11)$$

Moc pobierana przez wentylator:

$$P_{w2} = \frac{Q \Delta p}{\eta} = \frac{P_2}{\eta} = \frac{\rho_2}{\eta \rho_1} \quad (3.12)$$

3.2 Pompy

Moc pobierana przez pompę (moc na wale) jest określona zależnością:

$$P_p = \frac{P_u}{\eta_p} \quad (3.13)$$

gdzie:

η_p – sprawność pompy,
 P_u – moc użyteczna pompy.

Po uwzględnieniu wzoru (2.12) mamy:

$$P_p = \frac{\gamma QH}{\eta_p} \quad (3.14)$$

przy czym ciężar właściwy $= \rho \cdot g$ (ρ – gęstość, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$).
Zatem

$$P_p = \frac{9,81 \cdot \rho \cdot QH}{\eta_p} \cdot 10^{-3} \quad (3.15)$$

gdzie:

Q – wydajność pompy w m^3/s ,
 H – wysokość podnoszenia wody w m,
 ρ – gęstość właściwa wody w kg/m^3 .

Jeżeli znane są ciśnienia na wlocie p_{wl} i wylocie p_{wy} , to moc pobierana przez pompę jest określona wzorem:

$$P_p = \frac{Q(p_{wy} - p_{wl})}{\eta_p} \cdot 10^{-3} [\text{kW}] \quad (3.16)$$

gdzie:

p_{wl} – ciśnienie na ssaniu (na wlocie) w Pa,
 p_{wy} – ciśnienie na tłoczeniu (na wylocie) w Pa.

Moc na wale pompy P_p czyli moc dostarczana pompie jest mocą silnika napędowego P_s pompy ($P_p = P_s$). Na podstawie znajomości sprawności η_s silnika napędowego można moc pobieraną przez silnik obliczyć wg. wzoru:

$$P_{el} = \frac{P_p}{\eta_s} = \frac{P_s}{\eta_s} \quad (3.17)$$

Moc elektryczną P_{el} pobieraną przez trójfazowy silnik napędowy pompy określa wzór (3.3). Wzory przeliczeniowe dla charakterystyk pomp po zmianie prędkości obrotowej silnika napędowego pokrywają się ze wzorami (3.6) - (3.8).

4 Wyznaczanie charakterystyk wentylatorów i pomp

4.1 Metoda obliczeń charakterystyk

Przedstawiona metoda dotyczy wentylatorów promieniowych podmuchu i spalin. Decydującą rolę w kształtowaniu charakterystyki przepływowej wentylatora odgrywa koło wirnikowe. Przepływ przez wieniec łopatkowy koła wirnikowego odgrywa podstawową rolę w procesie sprężania. Przyrost ciśnienia (spręż)

$$\Delta p = \Delta i \eta \quad (4.1)$$

gdzie η jest sprawnością wentylatora, a Δi określa przekazaną pracę (przyrost entalpii). Przekazana praca

$$\Delta i = u_2 c_{2u} \quad (4.2)$$

przy czym

u_2 – prędkość obwodowa wirnika,
 c_{2u} – składowa prędkości obwodowej zależna od ułopatkowania wirnika.

Prędkość obwodowa

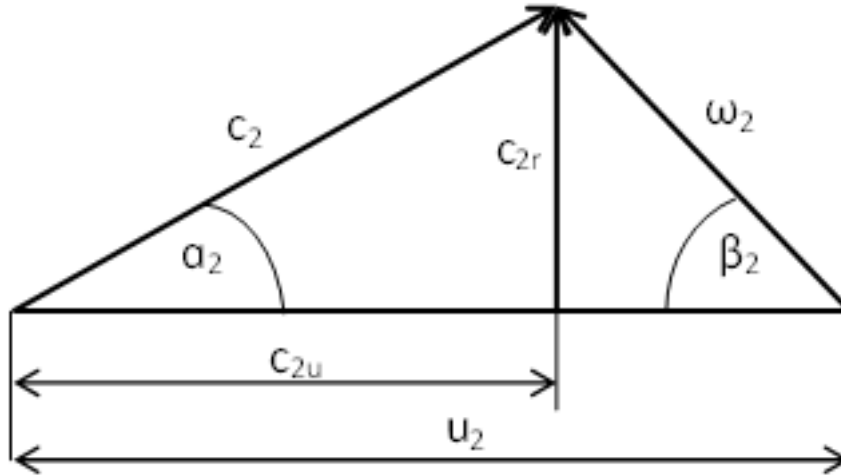
$$u_2 = \omega_2 \cdot r_2 = \frac{2\pi n r_2}{60} = \frac{\pi n d_2}{60} \quad [m/s] \quad (4.3)$$

gdzie

d_2 – średnica zewnętrzna wienca łopatkowego w m,

n – prędkość obrotowa w obr/min .

Trójkąt prędkości został przedstawiony na rys 4.1 [TULI 1976]



Rysunek 4.1: Trójkąt prędkości (c_{2r} - wektor składowej promieniowej prędkości, β_2 – kąt wylotowy łopatki, α_2 – kąt wypływającego strumienia(kąt położenia wektora prędkości w przepływie przez wieniec łopatkowy))

Przekazana praca (entalpia) w warunkach znamionowych

$$u_2 c_{2u} = \frac{\Delta p_{zn}}{\rho \eta_{zn}} \quad (4.4)$$

Stąd

$$c_{2u} = \frac{\Delta p_{zn}}{u_2 \rho \eta_{zn}} \quad (4.5)$$

Z trójkąta prędkości (rys.4.1) mamy

$$c_{2u} = u_2 - c_{2r} \operatorname{ctg} \beta \quad (4.6)$$

Po podstawieniu do zależności (4.2) otrzymujemy:

$$\Delta i = u_2(u_2 - c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2) \quad (4.7)$$

$$\Delta i = u_2^2(1 - \varphi_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2) \quad (4.8)$$

gdzie

$$\varphi_{2r} = \frac{c_{2r}}{u_2} = \frac{c_{2u} \operatorname{tg} \alpha_2}{u_2} \quad (4.9)$$

α_2 (kąt wypływającego strumienia) jest wskaźnikiem prędkości koła wirnikowego [TULI 1976]. Z zależności (4.8) dla $\Delta i = 0$ otrzymujemy

$$\widehat{\varphi_{2r}} = \operatorname{tg} \beta_2 \quad (4.10)$$

Po podstawieniu do (4.8) mamy

$$\Delta i = u_2^2 \left(1 - \frac{\varphi_{2r}}{\widehat{\varphi_{2r}}} \right) \quad (4.11)$$

Po wprowadzeniu współczynnika zmniejszenia mocy określonego wzorem [TULI 1976]

$$\mu_0 = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_2}}{z^{0,7}} \quad (\text{z-liczba łopatek}) \quad (4.12)$$

oraz przyjęciu liniowej zależności wydajności od przekazanej pracy można zależność (4.11) zapisać w postaci:

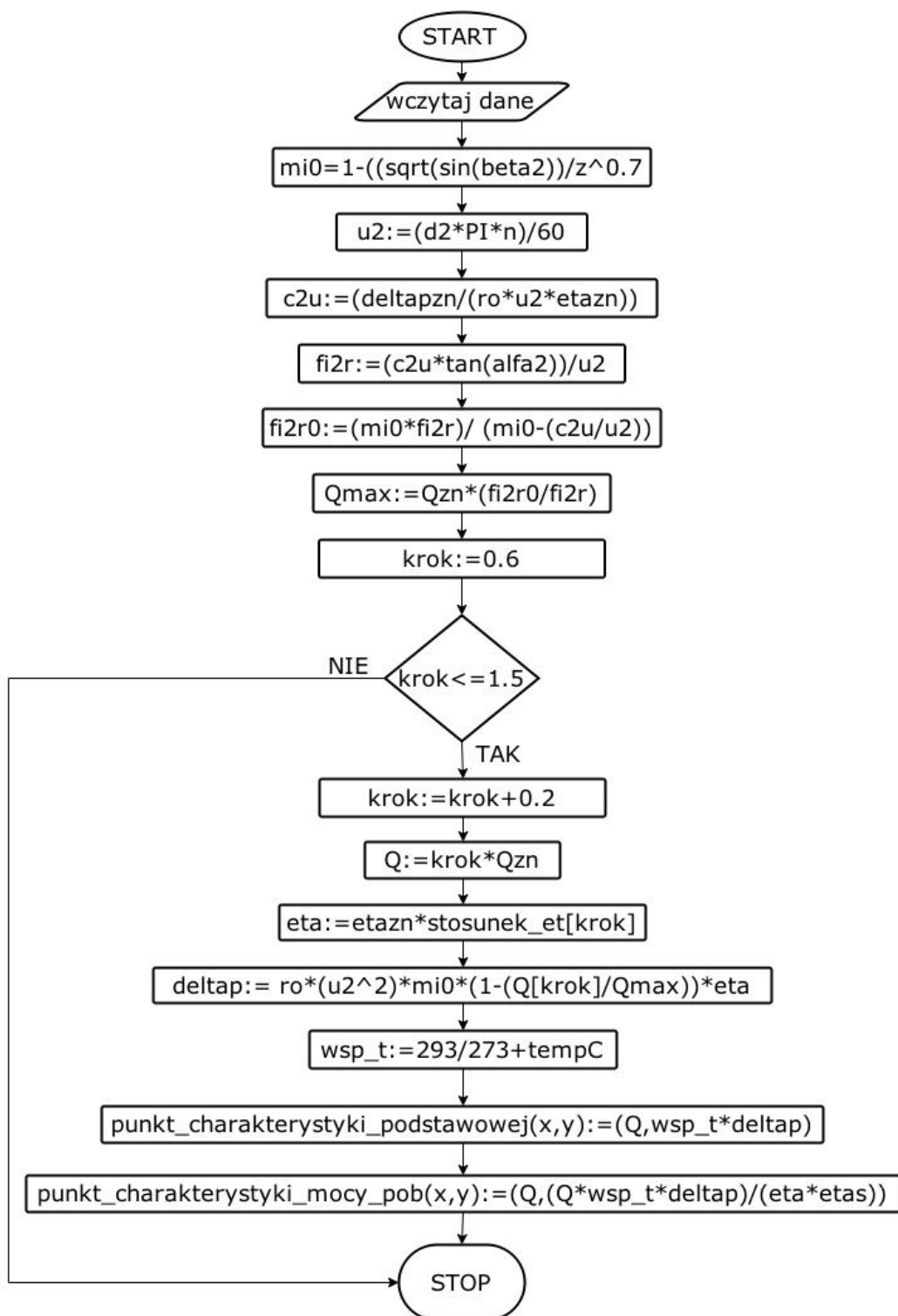
$$\Delta i = u_2^2 \mu_0 \left(1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right) \quad (4.13)$$

przy czym

$$\frac{Q}{Q_{max}} = \frac{\varphi_{2r}}{\widehat{\varphi_{2r}}} \quad (4.14)$$

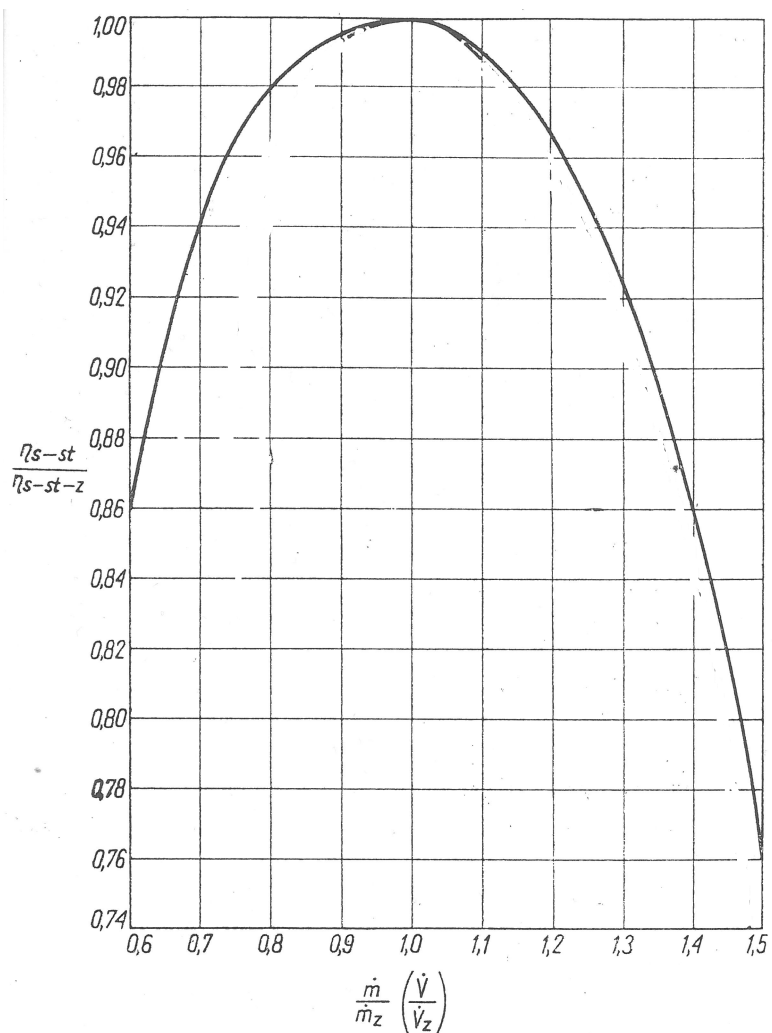
Ostatecznie przyrost ciśnienia (spręż) jest określony zależnością

$$\Delta p = \eta_w \Delta i = \eta_w u_2^2 \mu_0 \left(1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right) \quad (4.15)$$



Rysunek 4.2: Schemat blokowy obliczeń charakterystyk wentylatora

Schemat blokowy algorytmu obliczeń charakterystyk wentylatora przedstawiono na rys.4.2



Rysunek 4.3: Zależność stosunku sprawności izentropowych i stosunku natężeń przepływu [TULI 1976]

W przedstawionym schemacie blokowym wymagana jest znajomość stosunku sprawności izentropowych. Stosunek ten określa krzywa przedstawiona na rys. 4.3.

4.2 Metoda interpolacji

Jedną z metod interpolacji jest metoda interpolacji Lagrange’a polegająca na wyznaczeniu wielomianu interpolacyjnego określonego wzorem [WIKI]:

$$W(x) = \sum_{i=1}^n y_i \frac{\prod_{j \neq i} (x - x_j)}{\prod_{j \neq i} (x_i - x_j)} \quad j = 0, 1, \dots, n \quad (4.16)$$

na podstawie współrzędnych (x_i, y_i) .

Do wyznaczenia przebiegu charakterystyk wentylatorów i pomp, dla znanych współrzędnych punktów charakterystyk, uzyskanych w sposób analityczny lub pochodzących z danych pomiarowych producenta, wykorzystano zmodyfikowaną metodę Lagrange’a zwaną barycentryczną metodą interpolacji [KRZY]. Metoda barycentryczna wymaga jedynie $O(n)$ operacji, w porównaniu do oryginalnej metody Lagrange’a wymagającej $O(n^2)$ operacji.

5 Symulator mocy pobieranej przez wentylatory i pompy

5.1 Opis użytych technologii informatycznych

Podstawową platformą realizacji części programowej jest przeglądarka internetowa. Przeglądarka internetowa to program komputerowy, którego głównym zadaniem jest pobieranie i wyświetlanie stron internetowych. Wedle serwisu StatCounter (<http://gs.statcounter.com/>) procentowy udział przeglądarek dla komputerów osobistych na rynku w październiku 2014 przedstawiał się następująco (pierwsze 3 pozycje):

1. Google Chrome - 47,63%
2. Internet Explorer - 19,3%
3. Mozilla Firefox - 17,04%

Do tworzenia stron internetowych służy HTML (ang. *HyperText Markup Language*). HTML to hipertekstowy język znaczników, umożliwiający uzyskanie odpowiedniej struktury dla treści strony internetowej. Aktualna wersja HTML, to HTML5. Specyfikacja języka HTML5, opracowana przez grupę roboczą WHATWG (ang. *Web Hypertext Application Technology Working Group*, patrz pod (<http://www.whatwg.org/specs/web-apps/current-work/>) i W3C (ang. *World Wide Web Consortium*, patrz pod

<http://www.w3.org/html/wg/>), z dniem 28 października 2014 uzyskała status rekomendacji. Znaczniki języka HTML pozwalają na oznaczenie wybranego fragmentu treści dokumentu, jakim jest strona internetowa. W ten sposób zostaje ustalona hierarchia elementów. Kod podstawowego dokumentu HTML5 wygląda następująco:

```
<!doctype html>
<html>
  <head>
    <meta charset="UTF-8" />
    <title>...</title>
  </head>
  <body>
    ...
  </body>
</html>
```

Powyższy przykład pokazuje, że każdy dokument HTML5 posiada strukturę modułową, składającą się z nagłówka dokumentu (ang. head), zawartego między znacznikami <head> i </head> oraz ciała dokumentu (ang. body), zawartego między znacznikami <body> i </body>.

Znaczniki dokumentu HTML tworzą hierarchiczne drzewo, w którym każdy znacznik, poza głównym znacznikiem <html>, znajduje się w innym znaczniku, będącym jego rodzicem. Element posiadający rodzica może również zawierać elementy potomne. Owa koncepcja hierarchicznego drzewa jest nazywana **obiektywnym modelem dokumentu** (ang. DOM - Document Object Model). Obiektywny model dokumentu jest niezależny od języka programowania i platformy oraz pozwala na dynamiczną manipulację dokumentów. Standard DOM został zdefiniowany przez W3C i jest dostępny pod adresem: <http://www.w3.org/DOM/>.

Modyfikacja wyglądu strony internetowej za pomocą języka HTML jest dość ograniczona. Rozwinięta możliwość wpływania na wygląd dokumentu dają kaskadowe arkusze stylów (ang. CSS - Cascading Style Sheets). Kaskadowe arkusze stylów to język pozwalający na opisanie wyglądu dokumentu, a więc definiujący format elementów strony internetowej. Formatowanie dokumentu HTML, zdefiniowane w arkuszu stylów, jest zbiorem reguł określających styl dla wybranych elementów. Każda reguła składa się z dwóch części: selektora i deklaracji (definicji), złożonej ze zbioru par: właściwość (cecha, własność)-wartość.


```
selektor {  
    właściwość: wartość;  
    inna-właściwość: jakieś wartości;}
```

Użycie CSS ma następujące zalety:

- oddzielenie formy od treści dokumentu,
- ułatwione zarządzanie dokumentami HTML,
- zmniejszenie rozmiaru strony internetowej.

Selektor wskazuje do jakiego elementu odnosi się reguła, deklaracja zaś określa jakie wartości przyjmą właściwości tego elementu. Następująca reguła określa, iż tekst wszystkich elementów typu `p` będzie wyświetlany kolorem zielonym:

```
p {color:green}
```

Selektory można podzielić na kilka rodzajów:

- selektor typu (elementu), odnoszący się do wszystkich elementów określonego typu (jak w przykładzie powyżej),
- selektor klasy,
- selektor identyfikatora,
- selektor atrybutu,
- selektor ogólny (uniwersalny).

Selektor klasy odnosi się do wszystkich elementów o określonej wartości atrybutu `class`. Reguła

```
.akapit { color: blue; }
```

zostanie zastosowana dla elementów każdego typu, posiadających klasę `akapit`, np.:

```
<p class="akapit">  
...  
</p>
```

Selektor identyfikatora stosuje się do wszystkich elementów z określoną wartością unikatowego atrybutu `id`. Przykładowo reguła

```
#footnote {color: grey;}
```

dotyczy wszystkich elementów posiadających atrybut `id="footnote"`, np.:

```
<div id="footnote">
...
</div>
```

Selektor atrybutu odwołuje się do każdego elementu, zawierającego określony atrybut. **Selektor ogólny (uniwersalny)** stosuje się do każdego typu elementu w dokumencie i jest oznaczany gwiazdką `*`.

Ważnymi cechami CSS są kaskadowość oraz dziedziczenie. **Kaskadowość** ustala hierarchię stylów w zależności wagi deklaracji. Waga jest określana według precyzji selektora, kolejności dodawania arkuszy oraz kolejności danej reguły. Oprócz tego istnieje oznaczenie `!important` nadająca każdej regule z tym oznaczeniem pierwszeństwo.

Pełen opis techniki kaskadowych arkuszy stylów nie jest jednak tematem tej pracy i wykracza poza jej ramy.

Popularne przeglądarki internetowe nie tylko wyświetlają strony internetowe, lecz są jednocześnie środowiskiem wykonawczym dla programów napisanych w języku JavaScript. Język programowania JavaScript jest językiem:

- interpretowanym,
- zorientowanym obiektowo,
- bazującym na prototypach,
- dynamicznie typowanym,
- słabo typowanym.

Interpretowany język programowania jest wczytywany w całości i wykonywany przez interpreter, instrukcja po instrukcji. Interpreter języka jest niezbędny do wykonania programu napisanego w języku interpretowanym. Popularnymi językami interpretowanymi są: JavaScript, Perl, Python, Ruby. Programowanie **zorientowane obiektowo** jest popularnym paradygmatem (wzorcem, modelem) programowania polegającym na definiowaniu programów za pomocą obiektów łączących stan (czyli dane) i zachowanie (czyli metody, procedury). W modelu programowania obiektowego wyróżnia się dwa podtypy: programowanie oparte na klasach i programowanie oparte na prototypach. Klasa jest definicją dla obiektów, obejmującą ich dopuszczalny stan i ich zachowanie. W JavaScript model obiektowy bazuje na prototypach, czyli modelach obiektów. W języku JavaScript wszystko jest obiektem

(również funkcje), a każdy obiekt posiada swój prototyp. Obiekty dziedziczą po innych obiektach. **Dynamiczne typowanie** polega na przypisaniu typów do wartości przechowywanych w zmiennych, podczas uruchomienia programu. Typ zmiennej wynika z wartości przechowywanej przez zmienną. Słabe typowanie charakteryzuje się automatyczną konwersją różnych typów danych, przykładowo w poleceniu

```
console.log("Wynikiem jest:" + 23);
```

liczba 23 zostanie automatycznie skonwertowana w łańcuch znaków.

Wsparcie dla języka JavaScript w popularnych przeglądarkach jest na różnym poziomie. Warto więc sprawdzić jakie elementy języka są wspierane przez jaką przeglądarkę. Pomocny w tym jest internetowy serwis CanIUse (<http://caniuse.com/>), który nie tylko sprawdzi czy dany element JavaScript jest wspierany w wybranej przeglądarce, ale również uczyni to z elementami języków HTML i CSS. Warto dodać, iż język JavaScript jest implementacją standardu języka ECMAScript (<http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-290.htm>). Obecnie trwają prace nad szóstą wersją języka ECMAScript, dla której częściowe wsparcie oferują popularne przeglądarki. Szczegółowe omówienie całości języka JavaScript mogłoby być tematem odrębnej pracy.

5.2 Projekt i realizacja interfejsu użytkownika

Interfejs użytkownika (ang. *user interface*, *UI*) to w informatyce określenie sposobu interakcji maszyny z użytkownikiem. Interakcja ta odbywa się za pomocą urządzeń wejścia-wyjścia. Najczęściej wykorzystywanymi rodzajami interfejsu użytkownika są:

- wiersz poleceń (ang. *Command Line Interface*, *CLI*),
- interfejs tekstowy (ang. *text-based user interface*, *TUI*),
- interfejs graficzny (ang. *graphical user interface*, *GUI*),
- interfejs strony internetowej (ang. *web-based user interface*, *WUI*),
- interfejs głosowy (ang. *voice user interface*, *VUI*).

W pracy za interakcję z użytkownikiem odpowiadają strony internetowe wyświetlane przez przeglądarkę, tak więc mamy do czynienia z interfejsem strony internetowej. Zasadniczo zaprojektowanie interfejsu ogranicza się do realizacji odpowiednich stron internetowych. Stroną startową symulatora jest

strona z opcjami wyboru rodzaju symulatora, jakiego uruchomienie jest požądane przez użytkownika. Opcje wyboru wykonano przy pomocy znacznika `<input>` typu radio języka HTML. Wybór jest zatwierdzany przyciskiem oraz użytkownik zostaje przekierowany do odpowiedniej strony. Przekierowanie i obsługę przycisku zrealizowano za pomocą języka JavaScript.

Symulator mocy pobieranej przez urządzenia potrzeb własnych

Co chcesz wykonać?

- ☐ obliczenia charakterystyk: wentylatora podmuchu (powietrza)
- ☐ obliczenia charakterystyk: mocy wentylatora ciągu (spalin)
- ☐ interpolacja charakterystyk: przepływowej i poboru mocy wentylatora
- ☐ interpolacja charakterystyk: przepływowej i poboru mocy pompy

wybierz

Rysunek 5.1: Strona początkowa, z wyborem rodzaju symulacji

Strony odpowiadające typom wentylatorów składają się z formularza do nadania danych oraz prezentacji graficznej wyników symulacji. Formularz służący do wprowadzenia potrzebnych danych musi być zaprojektowany i wykonany w taki sposób aby maksymalnie ułatwić użytkownikowi wprowadzanie danych. Na rys. 5.2 przedstawiono rozmieszczenie elementów formularza dla symulatora wykorzystującego metodę obliczeniową.

liczba łopatek:	<input type="text" value="8"/>	
kąt wypływającego strumienia:	<input type="text" value="22"/>	[°]
wylotowy kąt łopatkowy:	<input type="text" value="58,46"/>	[°]
średnica zewnętrzna wieńca łopatkowego:	<input type="text" value="1,96"/>	[m]
spręż w punkcie znamionowym:	<input type="text" value="4,1"/>	[kPa]
sprawność znamionowa wentylatora:	<input type="text" value="0,81"/>	
sprawność silnika:	<input type="text" value="0,89"/>	
prędkość obrotowa silnika:	<input type="text" value="980"/>	[obr/min]
wydajność wentylatora w punkcie znamionowym:	<input type="text" value="56"/>	[m³/s]
temperatura czynnika:	<input type="text" value="20"/>	[°C]

oblicz i wykreśl

Rysunek 5.2: Rozmieszczenie podstawowych elementów formularza

Do realizacji formularza nadawania danych zastosowano HTML5 w połączeniu z CSS3. Standard HTML5 wprowadził nowe typy i atrybuty pól wejściowych mających ułatwić konstruowanie formularzy oraz ich walidację. Jednym z nowych typów jest **number**, który wykorzystano w kodzie realizującym wygląd strony do nadawania danych. Typ ten posiada też liczne nowe atrybuty, które wyjaśnia się na poniższym przykładzie:

```
<input autofocus type="number" step="0.01" min="0" max="360" required>
```

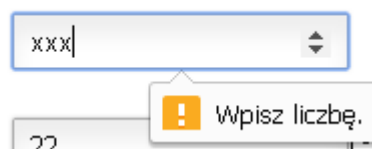
Znacznik input typu number (ponieważ nadajemy wartość liczbową) w przykładzie powyżej posiada atrybuty: autofocus, step, min, max, oraz required.

Atrybut `autofocus` uaktywnia element, aby był gotowy do wprowadzania danych w czasie ładowania strony. Atrybut `step` określa wielkość kroku zmiany przy nadawaniu wartości, atrybuty `min` i `max` - wartości minimalną i maksymalną. Najbardziej pożytecznym z punktu walidacji formularza jest atrybut `required`, określający wartość pola jako wymaganą. Jeśli pole z tym atrybutem nie zostanie wypełnione, to podczas wysłania formularza przeglądarka nie przekaże danych, lecz zwróci użytkownikowi uwagę, że nie wypełnił wskazanego pola. Zachowanie to ilustruje rys. 5.3.



Rysunek 5.3: Meldunek przeglądarki przy braku wypełnienia pola

Atrybut określający typ pola również jest pomocny przy walidacji formularza, bowiem przy nadaniu wartości nie odpowiadającej typowi zdefiniowanemu w polu, przeglądarka nas o tym poinformuje, jak widać to na rys. 5.4.



Rysunek 5.4: Meldunek przeglądarki przy wypełnieniu pola wartością nieodpowiedniego typu

We wcześniejszych wersjach HTML walidacja nie była możliwa, a trzeba ją było zaprogramować np. za pomocą języka JavaScript.

Projektowanie interfejsu użytkownika jest obszerną i wyspecjalizowaną interdyscyplinarną tematyką, której opisanie wykraczałoby poza zakres tej pracy.

5.3 Implementacja programowa algorytmów

Algorytm obliczeniowy przedstawiony w rozdziale 4 na rys. 4.2. zaimplementowano w języku JavaScript. Język ten wykorzystano w przygotowaniu

danych z formularza, obliczeniach oraz do wykreślenia charakterystyk. Każdemu rodzajowi symulatora odpowiada odpowiednia strona internetowa z formularzem do nadania danych oraz miejscem zarezerwowanym na wykres charakterystyki. Każda z tych stron wczytuje odpowiednie pliki z kodem w języku JavaScript. W przypadku metody obliczeniowej wg. algorytmu zaprezentowanego na schemacie blokowym (rys. 4.2) pliki z instrukcjami w JavaScript podzielono wg. celów którym służą. Istnieje więc plik z kodem realizującym obliczenia oraz plik z implementacją obsługi formularza i przygotowanie wykresu jak i wykreślenie charakterystyki na podstawie obliczeń. Podczas obliczeń zaokrąglono wyniki do trzech miejsc po przecinku unikając w ten sposób problemów z liczbami zmiennoprzecinkowymi. Do zaokrąglenia zastosowano wbudowaną metodę `toFixed` Problemy z liczbami zmiennoprzecinkowymi pojawiają się przy obliczeniach i powodowane są niemożliwością dokładnego przedstawienia w postaci binarnej niektórych liczb zmiennoprzecinkowych. Przykładowo, w JavaScript wykonanie operacji $0.1 + 0.2$ doprowadzi do wyniku `0.30000000000000004`. Obszerne wytłumaczenie problematyki liczb zmiennoprzecinkowych można znaleźć w [GOLD 1991].

Wyniki obliczeń są współrzędnymi dla barycentrycznej metody interpolacji, omówionej w rozdziale 4.2. Jako implementacje tej metody oraz wykreślanie charakterystyk wykorzystano bibliotekę JSXGraph [JSXG]. Jest to rozbudowana biblioteka z wieloma funkcjami z zakresu matematyki, służąca do celów dydaktycznych. Biblioteka ta do wykreślenia przebiegów funkcji wykorzystuje elementy `canvas`, wprowadzone w standardzie HTML5.

Kolejność wykonywania programu symulatora jest następująca: przeglądarka internetowa wczytując stronę przygotowaną w HTML5 jest informowana, iż należy jeszcze wczytać i zinterpretować trzy pliki w języku JavaScript. Informacja o potrzebie załadowania kodu w języku JavaScript jest umieszczona w nagłówku dokumentu HTML5. Do tego celu służy element `<script>` języka HTML. Odpowiedni fragment kodu HTML wygląda następująco:

```
<head lang="pl">
  <meta charset="UTF-8">
  <title>
    Obliczenia charakterystyk wentylatora podmuchu
  </title>
  <script src="../../js/jsxgraphcore.js"></script>
  <script src="../../js/obliczeniaWentylatora.js"></script>
  <script src="../../js/uiWentylatoraPodmuchu.js"></script>
  <link rel="stylesheet" href="../../css/formularzStyl.css">
  <link rel="stylesheet" href="../../css/jsxgraph.css" />
</head>
```

Jak widać znacznik `<script>` wczytuje instrukcje w języku JavaScript umieszczone w osobnym pliku. Alternatywnie można zamieścić cały kod JavaScript pomiędzy znacznikami `<script>` i `</script>`, jednak nie jest to zalecane. Umieszczenie programów JavaScript w oddzielnych plikach pozwala traktować plik jako moduł, który może być używany wielokrotnie oraz ułatwia przeprowadzenie uzupełnień. Plik z programem nie musi być umieszczony w lokalnym systemie, ale można wskazać na jego lokalizację w sieci internetowej. Takie podejście wymaga jednak, aby komputer był podłączony do sieci, co nie zawsze jest możliwe lub pożądane.

Program symulatora zbudowano modularnie, tzn. umieszczono wszystkie kaskadowe arkusze stylów (CSS) w osobnych plikach w osobnym folderze, wszystkie strony HTML również w odrębnych plikach i odrębnym folderze, oraz tak samo postąpiono z plikami zawierającymi kod w języku JavaScript.

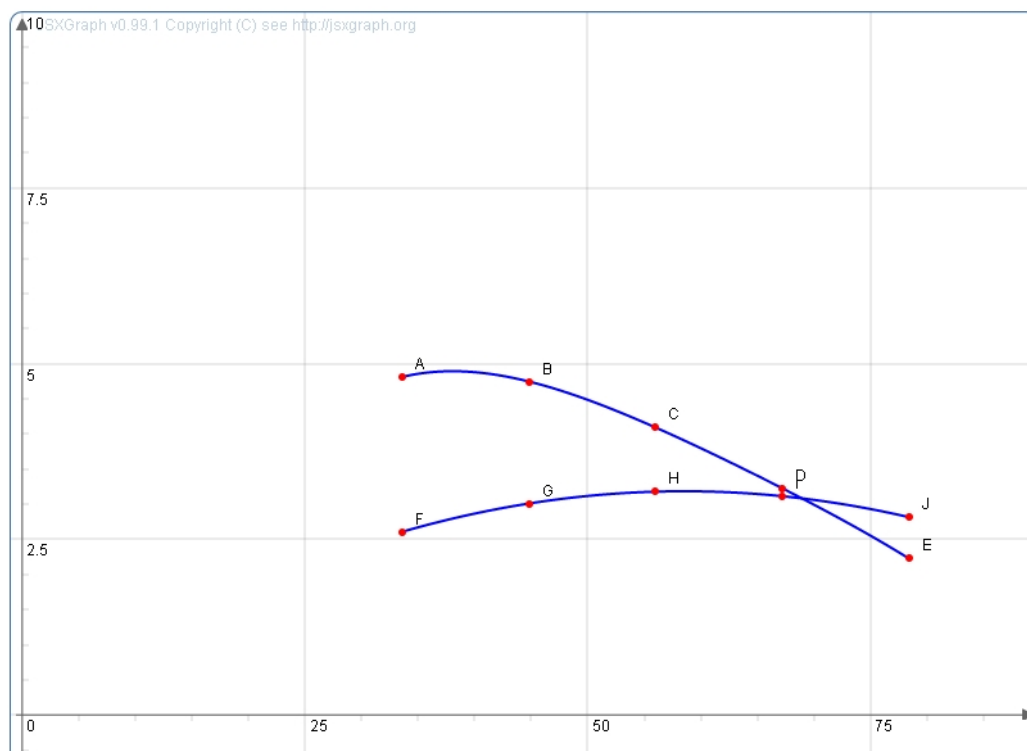
5.4 Wyniki symulacji

Symulacje przeprowadzono na następujących urządzeniach potrzeb własnych elektrowni:

- wentylator podmuchu (powietrza) WPWD-140/1,
- wentylator ciągu (spalin) BAB 106,
- wentylator osiowy WOR-2500/074,
- pompa wody zasilającej 15Z33.

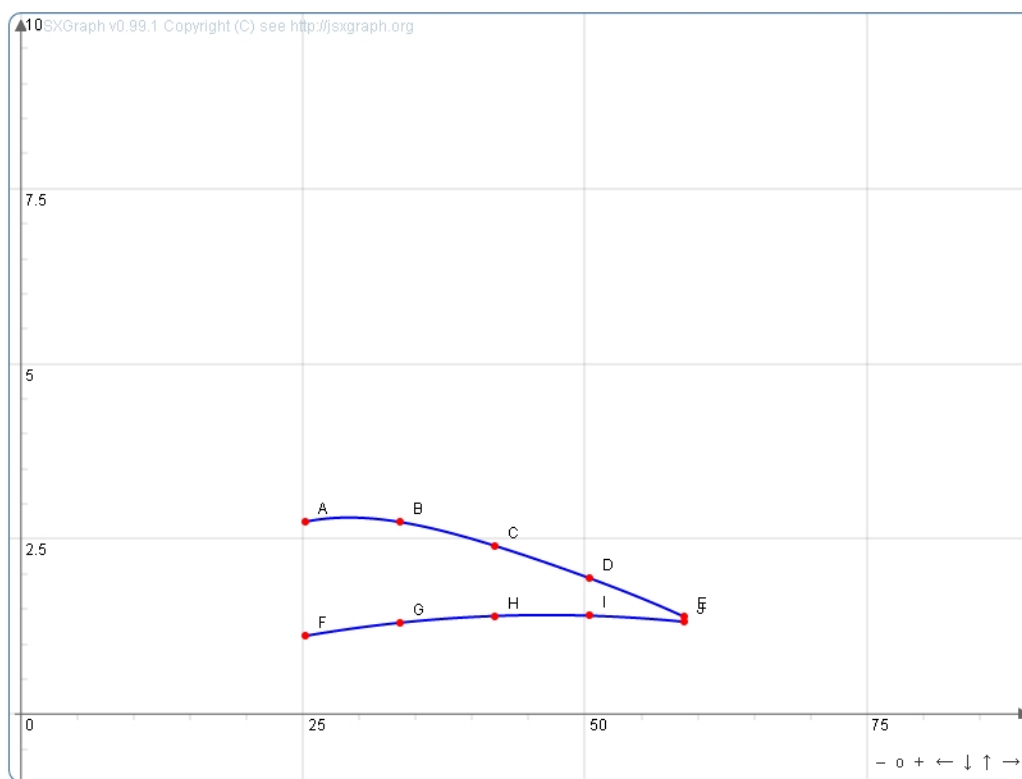
Wykresy charakterystyk przepływu i poboru mocy wyżej wymienionych urządzeń zostały przedstawione na rys. 5.5 – yyy. Zakres przebiegu charakterystyk obejmuje przede wszystkim część stateczną charakterystyki przepływowej, która odpowiada stabilnym punktom pracy urządzenia.

Rys. 5.5 przedstawia charakterystykę przepływu oraz poboru mocy wentylatora podmuchu dla prędkości obrotowej $n = 980^{obr}/min$. Wartości liczbowe osi rzędnych dla charakterystyki przepływowej (punkty od A do E) określają różnicę ciśnień w kPa. Dla charakterystyki poboru mocy (punkty od F do J) wartości liczbowe odczytywane na osi rzędnych należy pomnożyć przez 100 aby uzyskać wartość mocy w kW. Liczby na osi odciętych wyrażają wartości przepływu w m^3/s .



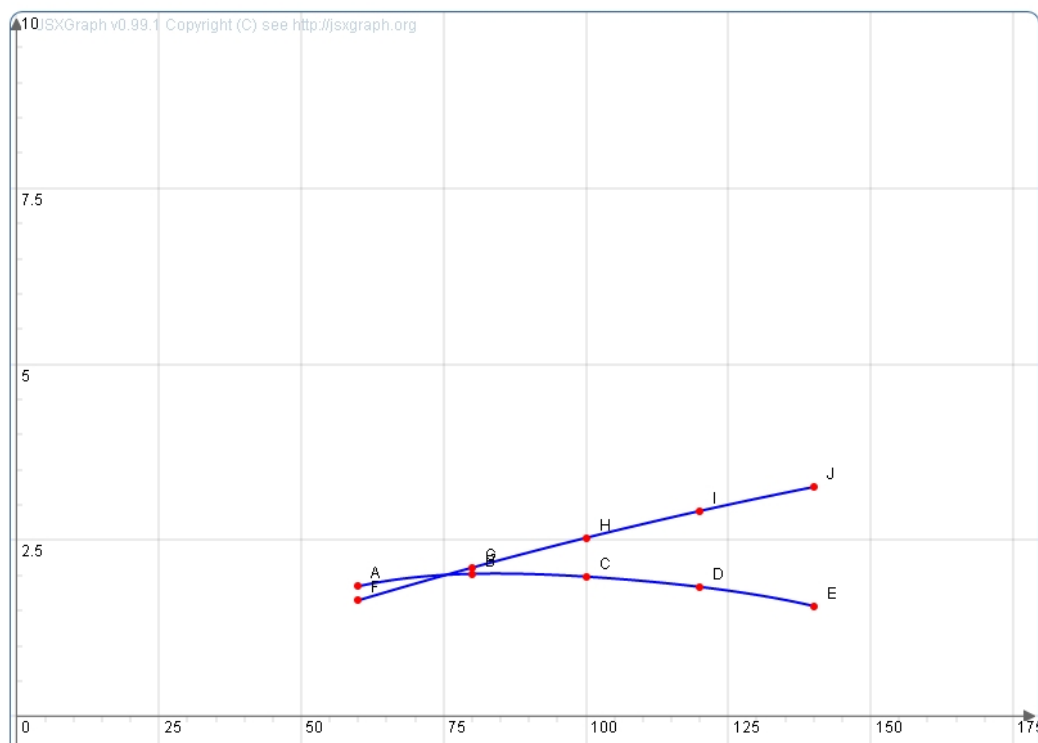
Rysunek 5.5: Charakterystyki: przepływowa i poboru mocy wentylatora poddmuchu WPWD-140/1 dla prędkości obrotowej $n = 980 \text{ obr/min}$

Na rys.5.6 przedstawiono charakterystykę przepływową i poboru mocy tego samego wentylatora dla prędkości obrotowej $n = 735 \text{ obr/min}$.



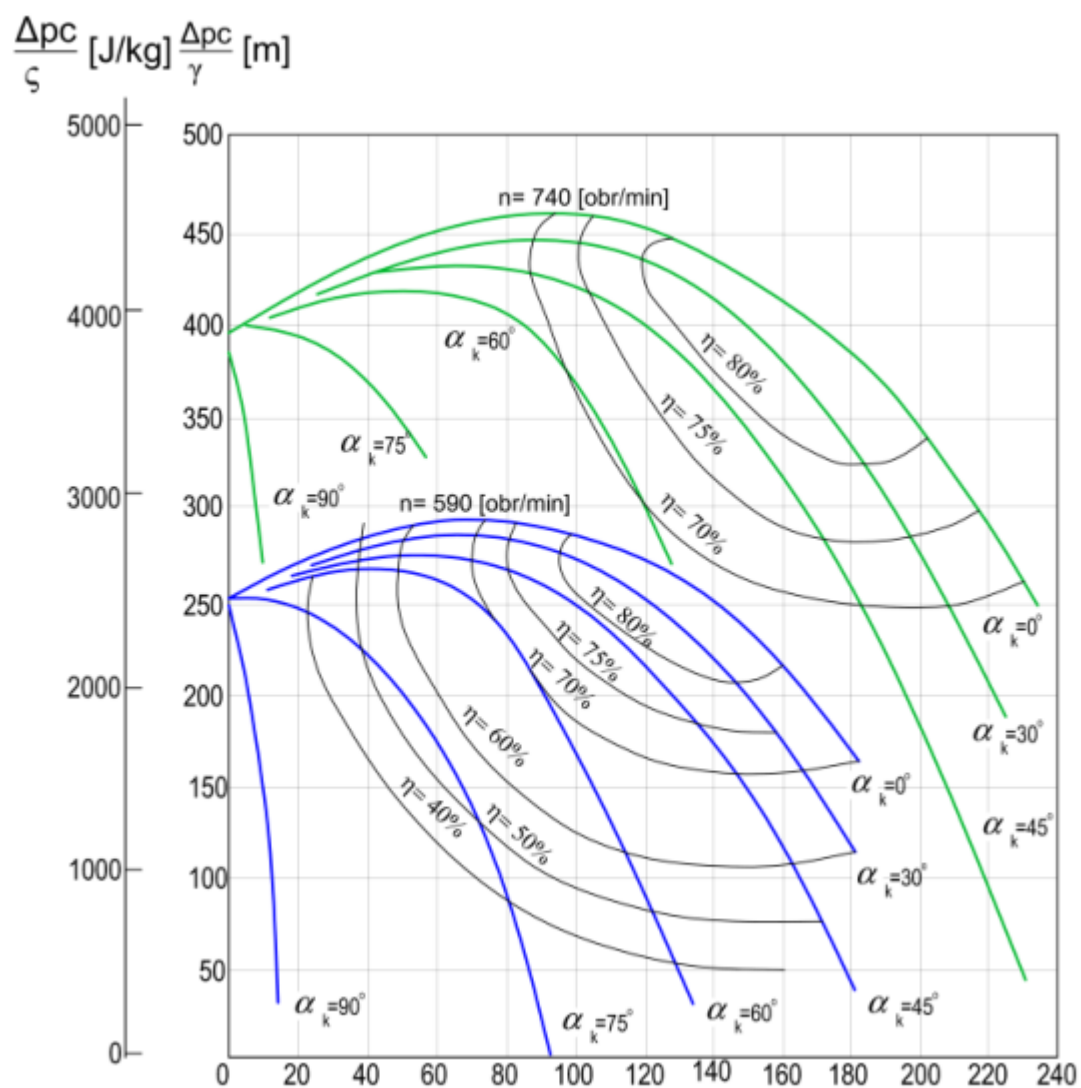
Rysunek 5.6: Charakterystyki: przepływowa i poboru mocy wentylatora poddmuchu WPWD-140/1 dla prędkości obrotowej $n = 735^{obr}/min$

Na rys. 5.7 przedstawiono charakterystykę przepływu oraz poboru mocy wentylatora ciągu BAB106 dla prędkości obrotowej $n = 590^{obr}/min$. Wartości liczbowe osi rzędnych dla charakterystyki przepływowej (punkty od A do E) określają różnicę ciśnień w kPa. Dla charakterystyki poboru mocy (punkty od F do J) wartości liczbowe odczytywane na osi rzędnych należy pomnożyć przez 100 aby uzyskać wartość mocy w kW. Liczby na osi odciętych wyrażają wartości przepływu w m^3/s .

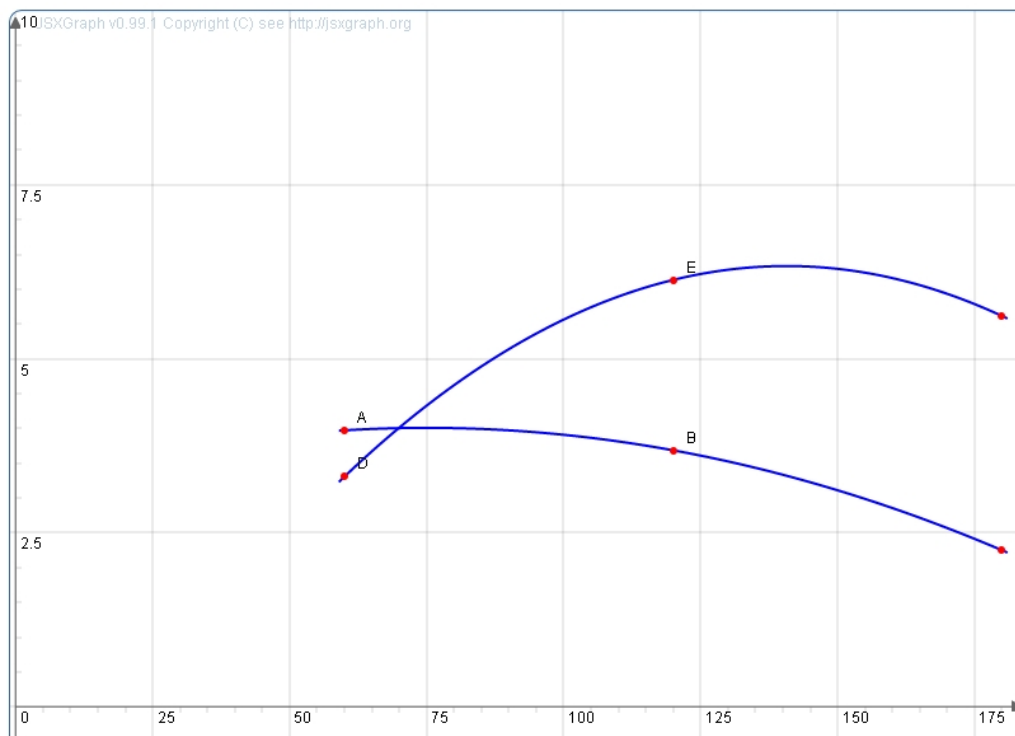


Rysunek 5.7: Charakterystyki: przepływowa i poboru mocy wentylatora ciągu BAB-106 dla prędkości obrotowej $n = 590 \text{ obr/min}$

Posługując się danymi z katalogu producenta (rys. 5.8.) [NOVO] uzyskano metodą interpolacji charakterystykę przepływu oraz poboru mocy (rys. 5.9) wentylatora ciągu dla prędkości obrotowej $n = 590 \text{ obr/min}$. Wartości liczbowe osi rzędnych dla charakterystyki przepływowej (punkty od A do C) określają różnicę ciśnień w kPa. Dla charakterystyki poboru mocy (punkty od D do F) wartości liczbowe odczytywane na osi rzędnych należy pomnożyć przez 100 aby uzyskać wartość mocy w kW. Liczby na osi odciętych wyrażają wartości przepływu w m^3/s .

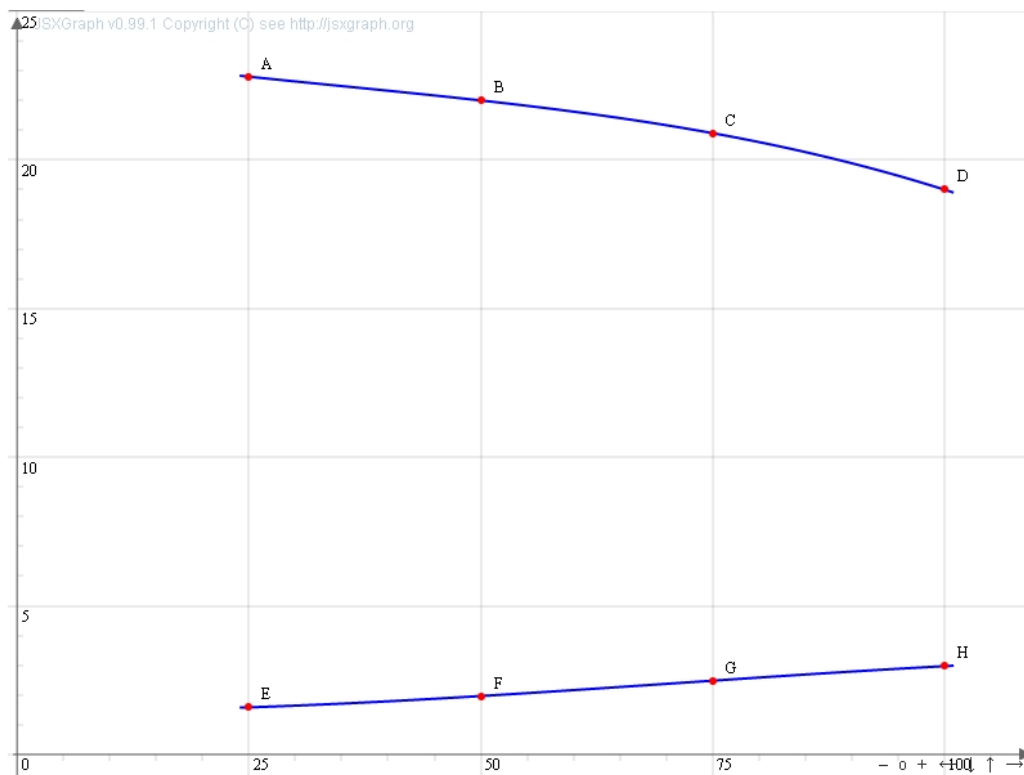


Rysunek 5.8: Charakterystyki przepływowe wentylatora ciągu BAB 106 z katalogu producenta [NOVO]



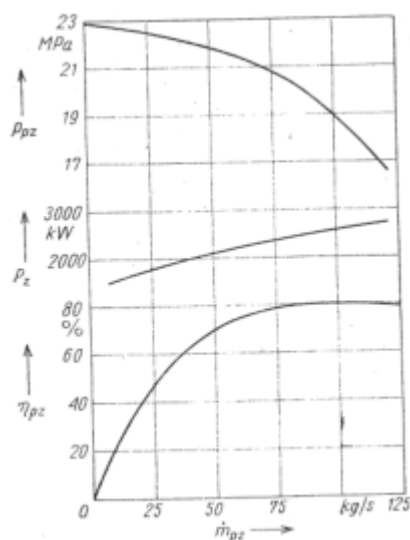
Rysunek 5.9: Charakterystyki: przepływowa i poboru mocy wentylatora ciągu BAB-106 dla prędkości obrotowej $n = 590 \text{ obr/min}$

Na rys. 5.10 przedstawiono charakterystykę przepływu oraz poboru mocy pompy wody zasilającej dla prędkości obrotowej $n = 3920 \text{ obr/m}$. Wartości liczbowe osi rzędnych dla charakterystyki przepływowej (punkty od A do E) określają różnicę ciśnień w kPa , dla charakterystyki poboru mocy (punkty od F do J) określają pobór mocy w MW . Liczby na osi odciętych wyrażają wartości przepływu w kg/s .



Rysunek 5.10: Charakterystyki: przepływowa i mocy pobieranej dla pompy wody zasilającej 15Z33 i prędkości obrotowej $n = 590^{obr/min}$

Charakterystyki przedstawione na rys. 5.10 uzyskano na podstawie danych uzyskanych z [PAWL 1986] (str. 212) (rys. 5.11)



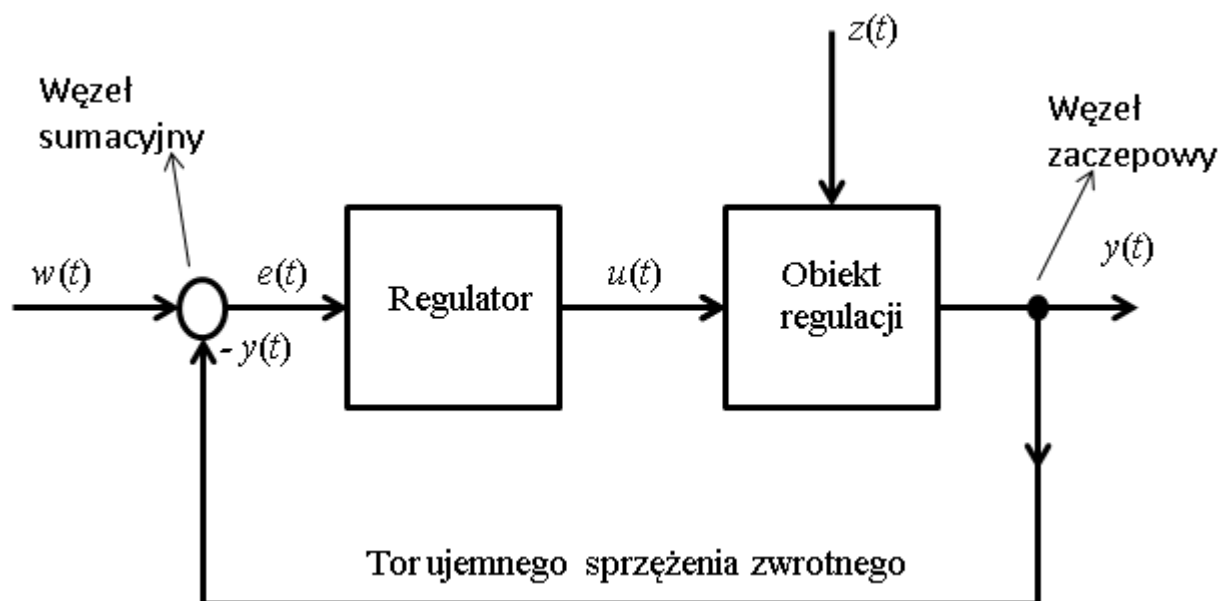
Rysunek 5.11: Charakterystyki pompy wody zasilajacej 15Z33 [PAWL 1986]

6 Regulacja wydatku wentylatorów

6.1 Podstawy i zasady regulacji

Zadanie regulacji określonej wielkości charakteryzującej obiekt fizyczny polega na utrzymywaniu przebiegu tej wielkości w zgodzie z góry zadanym (pożądanym) jej przebiegiem, niezależnie od zakłóceń pochodzących z otoczenia obiektu.

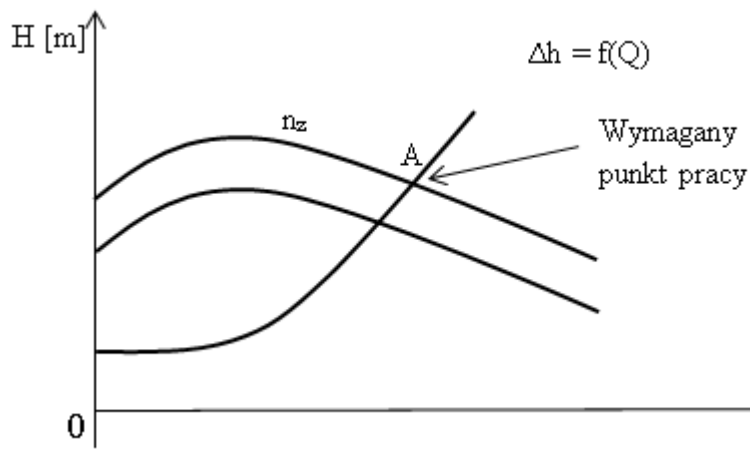
Realizacja zadania regulacji odbywa się w układzie regulacji automatycznej (zamkniętym układzie sterowania), którego zasadniczą cechą jest ujemne sprzężenie zwrotne. Schemat blokowy układu regulacji automatycznej przedstawiono na rys. 6.1. [URBA 2004]



Rysunek 6.1: Schemat blokowy układu regulacji automatycznej $y(t)$ - sygnał regulowany (wielkość regulowana), $w(t)$ - sygnał zadany (wartość zadana) wielkości regulowanej, $e(t) = w(t) - y(t)$ - sygnał błędu sterowania (uchyb regulacji), $u(t)$ - sygnał sterujący (sterowanie), $z(t)$ - sygnał zakłócający (zakłócenie, zaburzenie).

Dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu dokonuje się w układzie regulacji na bieżąco porównanie wielkości regulowanej $y(t)$ z jej przebiegiem zadany $w(t)$. Informacja o wyniku tego porównania $e(t)$ jest dostarczana regulatorowi, który na tej podstawie wypracowuje sygnał sterujący $u(t)$ obiektem, pozwalający doprowadzić przebieg wielkości regulowanej $y(t)$ do zrównania się z przebiegiem zadany $w(t)$. Oznacza to, że celem regulacji jest $e(t)=0$. Cel ten w układach liniowych osiąga się dzięki zastosowaniu regulatora proporcjonalno-całkującego (PI).

Zadaniem układu regulacji wydajności (przepływu, wydatku) wentylatora lub pompy jest utrzymanie stałej wartości wydajności Q na poziomie wartości zadanej Q_z , niezależnie od występujących zakłóceń przepływu w instalacji. Zadanie to można zrealizować przez utrzymywanie stałej prędkości obrotowej wentylatora lub pompy odpowiadającej zadanemu punktowi pracy A (rys.6.3). Po wystąpieniu odchylenia prędkości obrotowej od prędkości zadanej n_z odpowiadającej punktowi pracy regulator zapewnia powrót prędkości silnika napędowego do prędkości odpowiadającej wymaganemu punktowi pracy ($Q = Q_z, n = n_z$).



Rysunek 6.2: Ilustracja położenia wymaganego punktu pracy pompy na charakterystyce wydajności

Do napędu pomp i wentylatorów wykorzystywanych w procesie wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach ciepłych stosuje się silniki asynchroniczne trójfazowe. Prędkość obrotowa silnika asynchronicznego jest określona wzorem [GOGO 1961]:

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (6.1)$$

gdzie

f – częstotliwość napięcia zasilania w Hz,

p – liczba par biegunów,

s – poślizg,

n – prędkość obrotowa silnika w obr/min .

Moc elektryczna jest określona wzorem (3.3) a moment obrotowy silnika określa zależność:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{60P}{2\pi n} = 9,55 \frac{P}{n} \quad (6.2)$$

gdzie

P – moc na wale silnika w W,
 ω – prędkość kątowna wału silnika w rad/s ,
 n – prędkość obrotowa wału silnika w obr/min ,
 M – moment obrotowy w Nm

Moc na wale silnika

$$P = P_{el}\eta_s \quad (6.3)$$

przy czym η_s jest sprawnością silnika. Po podstawieniu wzorów (6.1) i (6.3) do wzoru (6.2) otrzymuje się:

$$M = 9,55 \frac{p\eta_s \sqrt{3}UI \cos\varphi}{60f(1-s)} = k \cdot \frac{U}{f} \quad (6.4)$$

gdzie stała

$$k = 9,55 \frac{p\eta_s \sqrt{3}I \cos\varphi}{60(1-s)} \quad (6.5)$$

Z zależności (6.4) wynika, że utrzymanie stałego momentu obrotowego wymaga zachowania stałego stosunku $\frac{U}{f}$. Stanowi to podstawę realizacji układu napędowego z użyciem przetwornic częstotliwości.

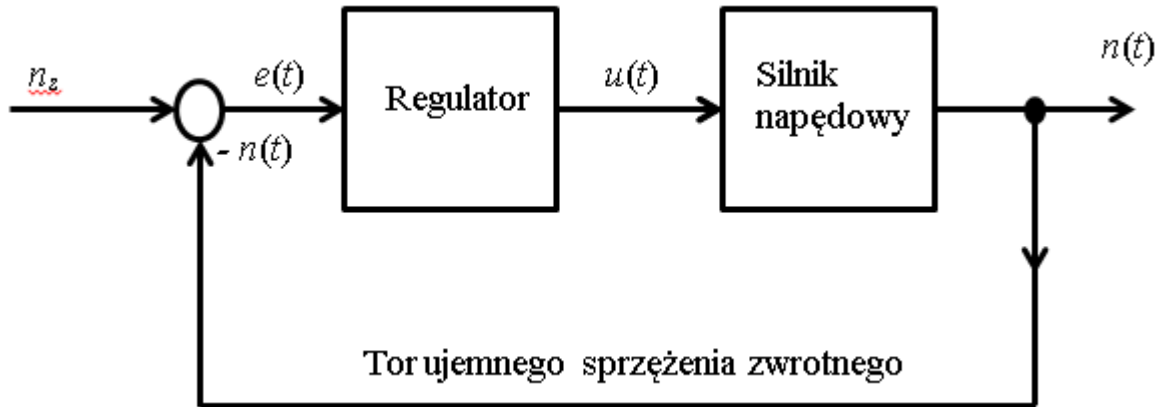
Przetwornice częstotliwości umożliwiają uzyskanie oszczędności energetycznych do 50% w stosunku klasycznych metod regulacji (dławienie, silniki wielobiegunowe).

Dla zmniejszenia poboru mocy do napędu pomp i wentylatorów stosuje się silnik asynchroniczny z przemiennikiem częstotliwości i falownikiem umożliwiającymi sterowanie prędkością silnika przez zmianę częstotliwości i wartości napięcia zasilającego silnik.

6.2 Analiza symulacyjna regulacji

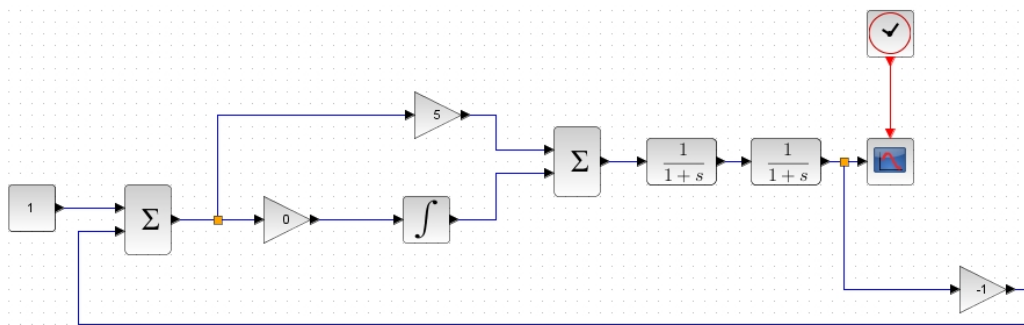
Schemat blokowy układu regulacji przepływu wentylatora lub pompy został przedstawiony na rys. 6.3. Zadaniem układu jest utrzymywanie stałej

wartości prędkości obrotowej silnika napędowego $n = n_z$ odpowiadającej wymaganemu przepływowi Q_z niezależnie od występujących zaburzeń powodujących odchylenia przepływu Q od wymaganej wartości Q_z .



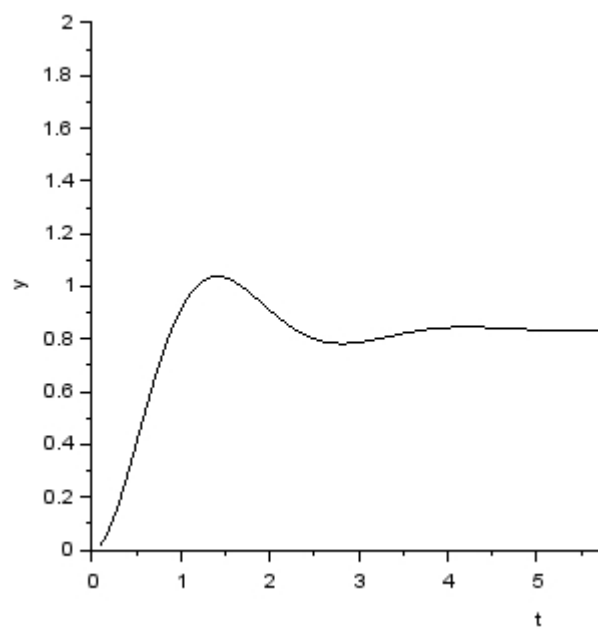
Rysunek 6.3: Schemat symulacyjny układu regulacji silnika napędowego

Schematy symulacyjne układu dla różnych nastaw parametrów regulatora i wyniki symulacji przedstawiono na rys. 6.4 - rys 6.10. Do realizacji schematów symulacyjnych zastosowano program komputerowy Scilab [SCIL], który jest programem open source. Silnik napędowy potraktowano jako obiekt inercyjny drugiego rzędu.

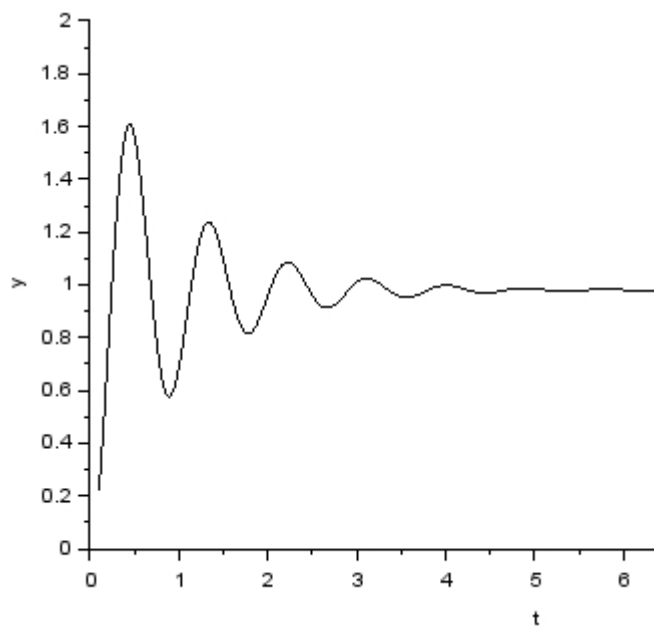


Rysunek 6.4: Schemat symulacyjny układu regulacji z regulatorem typu P

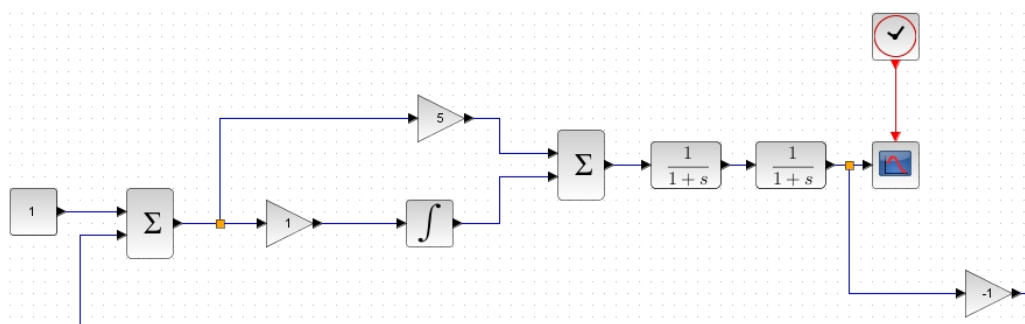
Przebieg procesu regulacji (odpowiedź skokowa) z regulatorem typu P o wzmocnieniu regulatora równym 5 przedstawia rys. 6.5.



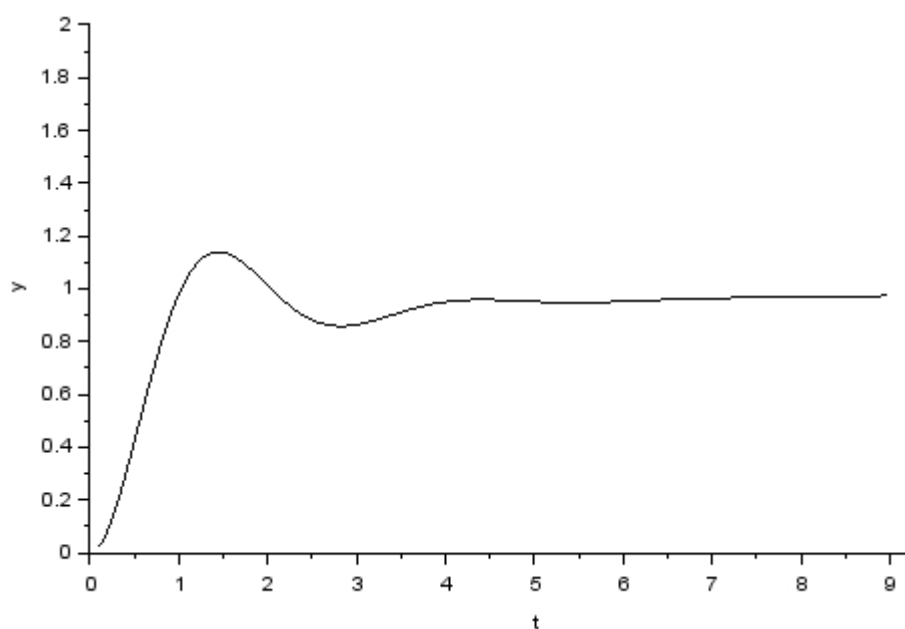
Rysunek 6.5: Odpowiedź skokowa dla wzmacnienia równego 5



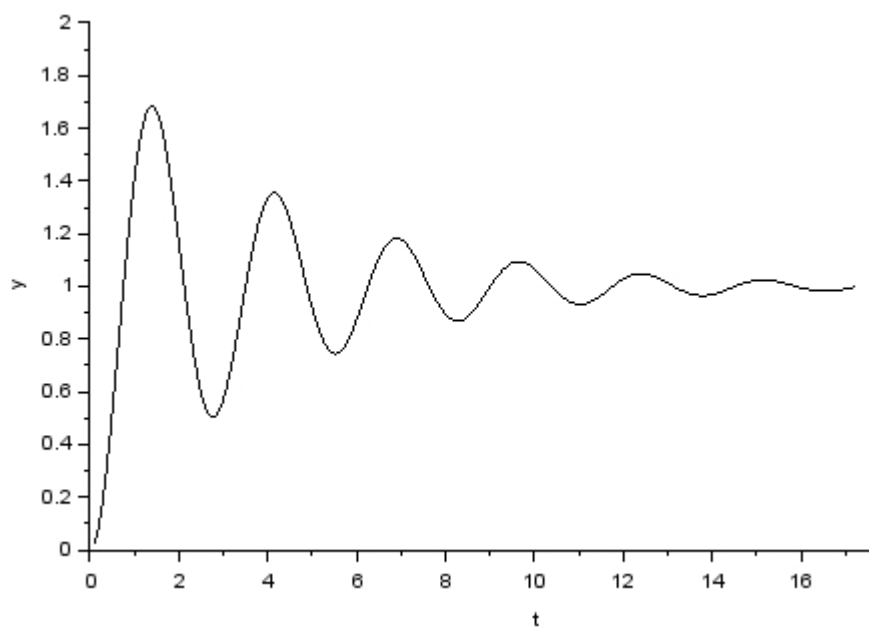
Rysunek 6.6: Odpowiedź skokowa dla wzmacnienia równego 50



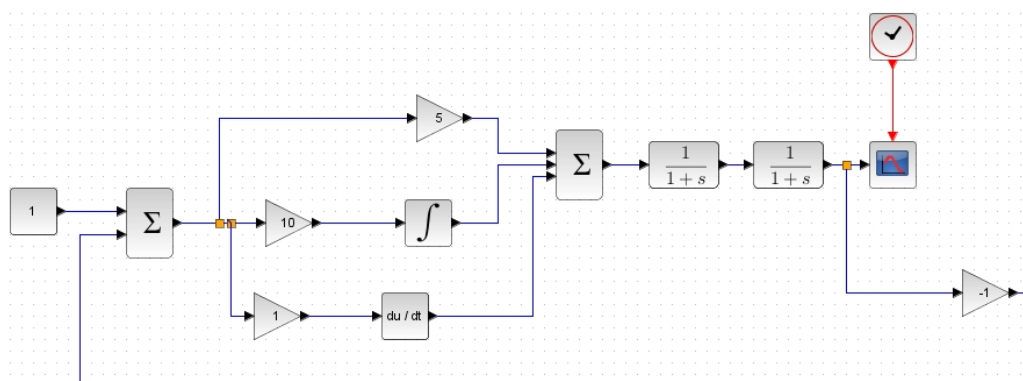
Rysunek 6.7: Schemat symulacyjny układu regulacji z regulatorem typu PI



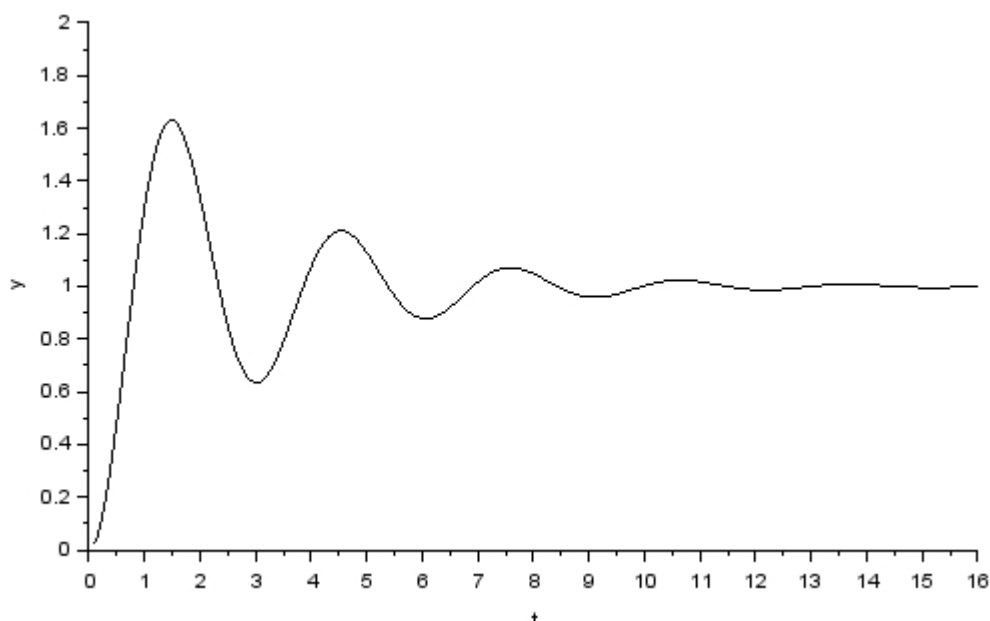
Rysunek 6.8: Odpowiedź skokowa układu z regulatorem PI dla wzmocnienia w torze proporcjonalnym równego 5, a w torze całkującym 1



Rysunek 6.9: Odpowiedź skokowa układu z regulatorem PI dla wzmocnienia w torze proporcjonalnym równego 5, a w torze całkującym 10



Rysunek 6.10: Schemat symulacyjny układu regulacji z regulatorem typu PID



Rysunek 6.11: Odpowiedź skokowa układu z regulatorem PID dla wzmocnienia w torze proporcjonalnym równego 5, w torze całkującym 10, a w torze różniczkującym 1

Z rys. 6.5 wynika, że czas stabilizowania wielkości regulowanej (prędkości obrotowej silnika napędowego) jest stosunkowo krótki, natomiast odchylenie tej wielkości w stanie ustalonym od wartości zadanej wynosi ok. 10%. Wynik uzyskany dla większego wzmocnienia (równego 50) przedstawiony na rys. 6.6. pokazuje, że proces stabilizowania wielkości regulowanej ma charakter oscylacyjny i wydłuża się. Natomiast odchylenie wielkości regulowanej w stanie ustalonym od jej wartości zadanej zmniejszyło się. Rysunek 6.8. przedstawia wyniki symulacji z regulatorem typu PI. Dla wzmocnienia w torze proporcjonalnym równego 5, a w torze całkującym 1 proces stabilizacji ma charakter oscylacyjny i wydłużył się w stosunku do procesu z regulatorem typu P. Natomiast odchylenie od wartości zadanej dąży do zera. Wzrost wzmocnienia toru całkującego spowodował wydłużenie się czasu stabilizacji i zwiększyła się oscylacyjność procesu (rys. 6.9.). Wprowadzenie regulatora typu PID spowodowało (rys. 6.11.) skrócenie czasu stabilizacji i zmniejszenie oscylacji.

O jakości procesu stabilizacji wielkości regulowanej decydują nastawy zastosowanego typu regulatora.

7 Podsumowanie pracy

W pracy zaproponowano algorytm obliczeniowy punktów charakterystyk przepływowych i mocy pobieranej dla wentylatorów podmuchu i ciągu. Algorytm bazuje na podstawach teorii przepływu gazów. Opracowano schemat blokowy algorytmu, a na jego podstawie zaimplementowano program symulatora w języku JavaScript. Implementację powiązano z następującymi technikami informatycznymi:

- HTML5,
- CSS3,
- przeglądarka internetowa

Ponadto zastosowano metodę barycentrycznej interpolacji Lagrange’a dla uzyskania przebiegów charakterystyk przepływowych i poboru mocy. W pracy przeprowadzono również analizę symulacyjną jakości regulacji prędkości obrotowej silnika napędowego wentylatorów i pomp, w zależności od nastaw regulatora.

Symulator poboru mocy zaproponowany w pracy zakłada jedynie znajomość danych katalogowych wentylatora lub pompy, koniecznych do określenia charakterystyki poboru mocy silnika napędowego. W przypadku znanych ponadto danych katalogowych silnika napędowego, można określić zapotrzebowanie mocy silnika napędowego na podstawie wielkości elektrycznych.

Platforma technologiczna wybrana do implementacji programowej pozwala na uruchomienie symulatora w każdym środowisku, które wspiera przeglądarkę internetową wraz z interpreterem języka JavaScript (przykładowo w systemach wbudowanych takich jak Raspberry Pi).

8 Literatura

Literatura

[GOGO 1961] Gogolewski Z., „Napęd elektryczny”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1961

[GOLD 1991] Goldberg D., „What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic”, Computing Surveys, marzec 1991, Association for Computing Machinery, dostępne pod: https://docs.oracle.com/cd/E19957-01/806-3568/ncg_goldberg.html

- [JSXG] Universitaet Bayreuth, „JSXGraph”, <http://jsxgraph.uni-bayreuth.de/>
- [KRZY] Krzyżanowski P., Plaskota L., „Metody numeryczne”, http://wazniak.mimuw.edu.pl/index.php?title=Metody_numeryczne
- [LAUD 1990] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F., “Elektrownie”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1990
- [NOVO] NOVOCON POLAND S.A., „Wentylatory promieniowe spalin BAB”, <http://www.novocon.pl/pub/File/Katalog%20BAB.pdf>
- [PAWL 1986] Pawlik M., Skierski J. „Układy i urządzenia potrzeb własnych elektrowni”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986
- [RAKO 1976] Rakowski J., „Automatyka urządzeń cieplnych siłowni”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1976
- [URBA 2004] Urbaniak A., „Podstawy automatyki”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004
- [SCIL] Scilab Enterprises S.A.S, „Scilab”, <http://www.scilab.org/>
- [TULI 1976] Tuliszką E., „Sprężarki, dmuchawy i wentylatory”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1976
- [TATA 2006] Tatarek A., „Pomiar Pompy wirowej”, Politechnika Wrocławska, 2006, http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~miernic/02dyd/download/instrukcje/20_badanie_pompy_wirowej.pdf
- [WIKI] Wikipedia, „Interpolacja wielomianowa”, http://pl.wikipedia.org/wiki/Interpolacja_wielomianowa

A Kod źródłowy

Kod źródłowy dostępny jest pod adresem https://github.com/grumatowski/symulator_mocy_pobieranej/

B Instrukcja instalacji

Instalacja polega na skopiowaniu plików i folderów w takiej hierarchii, w jakiej znajdują się w repozytorium z kodem źródłowym (dostępnym pod adresem w dodatku A). Uruchomienie symulatora polega na otwarciu pliku `index.html` w przeglądarce internetowej.